

РАО "ЕЭС РОССИИ"
Главный Вычислительный Центр Энергетики
Северо-Западный филиал

А.В.Бульчев, В.К.Вашин, Г.В.Меркурьев

**Методы и технические средства
контроля параметров и защиты
электродвигателей переменного
тока**

Учебное пособие

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

1996

Учебное пособие предназначено для слушателей групп повышения квалификации по курсу "Эксплуатация оборудования электростанций" и "Релейная защита электростанций".

Учебное пособие может быть использовано в практической работе эксплуатационного и ремонтного персонала АО-энерго, электростанций, ЦЭС и при обучении студентов электротехнических специальностей ВУЗов.

Учебное пособие рассмотрено и одобрено на заседании кафедры "Эксплуатация электротехнического оборудования станций".

Научный редактор д.т.н, проф. Г.М.Павлов

ВВЕДЕНИЕ

Действующие тенденции развития методов и технических средств защиты электродвигателей связаны с направлениями технического прогресса в нескольких областях техники. Во-первых, в сферах производства и эксплуатации электродвигателей, определяющих свойства и режимы работы защищаемых объектов. Во-вторых, в области разработки и производства элементной базы для обработки электрических сигналов.

Стремление производителей электрических машин более интенсивно использовать активные материалы в электрических машинах (повышение магнитной индукции в магнитопроводах и плотности тока в проводниках обмоток, снижение запаса механической прочности в подшипниковых узлах и т.п.) привело к существенному снижению перегрузочных возможностей современных электрических машин.

Условия эксплуатации электродвигателей также претерпевают глубокие изменения. Технологические процессы, в которых используется все большее число электродвигателей, неуклонно усложняются. Режимы работы электродвигателей становятся более динамичными и разнообразными по характеру.

В сложившихся условиях требования к средствам защиты электродвигателей повышаются, и традиционные решения часто оказываются недостаточно эффективными. Требуются новые подходы на основе представления защищаемых объектов более точными математическими моделями.

Немало аварий электродвигателей (и связанных с ними аварий в системах электроснабжения) можно предотвратить, если своевременно выявить их прогрессирующие дефекты. Для этого необходимы специальные средства контроля параметров электродвигателей предупредительного действия.

Так, очевидно, что ухудшение изоляции обмоток является предвестником возникновения повреждений (коротких замыканий) с катастрофическими последствиями. Поэтому непрерывный контроль состояния

изоляции позволяет, практически, исключить возможность внезапного повреждения изоляции из-за ее износа и не допустить развития более тяжелых аварий.

В этих условиях все настойчивее проявляется концепция создания целостной единой управляющей системы, обеспечивающей управление работой электродвигателя в нормальных условиях, контроль (измерение) параметров, характеризующих состояние и режим машины, и, безусловно, защиту питающей сети и электродвигателя в аварийных ситуациях.

Сегодня эта концепция может быть реализована в полной мере на базе стремительно развивающихся унифицированных микроэлектронных средств обработки электрических сигналов (интегральных микросхем, микропроцессоров, контроллеров, компьютеров). При этом открываются широчайшие возможности выполнения точных измерений, использования дополнительной информации о контролируемом объекте и окружающей среде, автоматизации процесса определения уставок, то есть тех функций, которых так не хватало электромеханическим средствам защиты.

В пособии целенаправленно рассмотрены особенности конструкций и режимов работы асинхронных и синхронных электродвигателей, проведен анализ наиболее распространенных видов повреждений и алгоритмов действия защит, предложены новые принципы действия защит и приведены примеры выполнения средств контроля параметров и защиты электродвигателей.

1. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ И В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

подавляющее большинство механизмов собственных нужд электростанций и механизмов в промышленности приводятся в действие электродвигателями переменного тока. Асинхронные электродвигатели составляют их наибольшую часть.

Для научно обоснованного решения задач, связанных с релейной защитой электродвигателей, необходимо иметь ясное представление о свойствах, конструктивных особенностях и предельных возможностях защищаемых электрических машин.

В связи с этим здесь приводятся важнейшие сведения об электродвигателях переменного тока, которые необходимы для анализа и синтеза средств релейной защиты.

1.1. Асинхронные электродвигатели и их основные характеристики

Классический асинхронный электродвигатель содержит два основных узла: неподвижный статор с трехфазной обмоткой, размещенной в пазах сердечника, и вращающийся ротор со своей трехфазной обмоткой. Обмотка ротора может быть постоянно замкнутой накоротко, или иметь выводы для подключения внешних цепей через скользящие контакты.

Короткозамкнутая обмотка ротора обычно состоит из ряда медных или алюминиевых стержней, расположенных в пазах и замкнутых по торцам кольцами. У двигателей с контактными кольцами (двигатели с фазным ротором) в пазы ротора укладывается трехфазная обмотка, аналогичная обмотке статора. Обмотка соединяется звездой, а три свободных вывода присоединяются к трем контактными кольцам, закрепленным на роторе, которые вместе с неподвижными щетками обеспечивают электрическую связь с неподвижными внешними резисторами или закорачивающими переключателями.

Трехфазная система токов обмотки статора создает магнитное поле, вращающееся с угловой скоростью:

$$\omega_1 = 2\pi f_1 / p,$$

которую принято называть синхронной.

Здесь f_1 - частота питающей сети; p - число пар полюсов обмотки статора.

Обмотки статора и ротора находятся в этом вращающемся магнитном поле и в них индуцируются э.д.с. Полагая, что результирующий магнитный поток имеет синусоидальную форму для действующего значения э.д.с. обмотки статора, можно записать следующее выражение [1]:

$$E_1 = 4,44 k_{\text{об1}} f_1 w_1 \Phi,$$

где Φ - амплитуда магнитного потока; $k_{\text{об1}}$ - обмоточный коэффициент обмотки статора, учитывающий длину шага обмотки; w_1 - число витков на фазу в обмотке статора.

Под действием э.д.с. E_2 в замкнутой обмотке ротора возникает ток. На проводники этой обмотки с током, находящиеся в магнитном поле, действуют электромагнитные силы. Вследствие этого ротор двигателя вращается по направлению вращения магнитного поля.

Скорость вращения ротора двигателя ω_2 меньше синхронной скорости вращения магнитного поля ω_1 . Относительное значение разности этих величин - есть скольжение:

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}.$$

Частота э.д.с. ротора пропорциональна разности скоростей вращения магнитного поля и ротора, т.е. - скольжению:

$$f_2 = sf_1.$$

При неподвижном роторе $f_1 = f_2$ и действующее значение э.д.с. обмотки ротора равно:

$$E_{2к} = 4,44 k_{\text{об2}} f_1 w_2 \Phi.$$

При вращающемся роторе:

$$E_2 = 4,44 k_{\text{об2}} f_1 s w_2 \Phi.$$

Здесь $k_{\text{об2}}$ - обмоточный коэффициент обмотки ротора; w_2 - число витков на фазу в обмотке ротора.

Как видно, э.д.с. в обмотке ротора изменяется пропорционально скольжению:

$$E_2 = s E_{2k}.$$

Отношение э.д.с. обмоток статора и ротора в неподвижном состоянии принято называть коэффициентом трансформации асинхронной машины:

$$k_E = E_1 / E_{2k} = w_1 k_{\phi 61} / w_2 k_{\phi 62}.$$

Физические процессы в асинхронном двигателе во многом сходны с процессами, происходящими в трансформаторе. Поэтому по аналогии с трансформатором для научного анализа асинхронных машин целесообразно использовать схему замещения.

Если при неподвижном роторе правомерность представления асинхронного двигателя схемой замещения не вызывает сомнений, то при вращающемся роторе это требует обоснования.

Так, при вращающемся роторе, кроме изменения э.д.с. E_2 , в зависимости от скольжения изменяется и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора:

$$x_2 = s x_{2k}.$$

Здесь x_{2k} и x_2 - индуктивные сопротивления рассеяния обмотки ротора при неподвижном и вращающемся роторе.

С учетом этого, используя приведенные к обмотке статора величины, для цепи ротора можно записать следующее уравнение:

$$s \dot{E}'_{2k} + j \dot{I}'_2 s x'_{2k} + \dot{I}'_2 R'_2 = 0$$

Разделив это уравнение на s и решив его относительно \dot{I}'_2 , получим:

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{E}'_{2k}}{R'_{2/s} + j x'_{2k}}.$$

Это уравнение цепи, в которой к источнику э.д.с. \dot{E}'_{2k} подключено комплексное сопротивление

$$R'_{2/s} + j x'_{2k}.$$

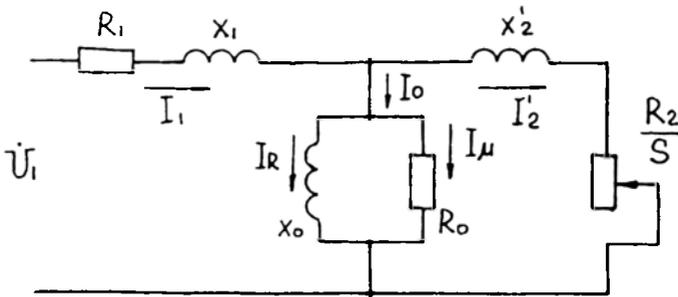
Как видно, только активная составляющая этого сопротивления зависит от скольжения.

В результате приведения E_2 к цепям статора получим следующее равенство:

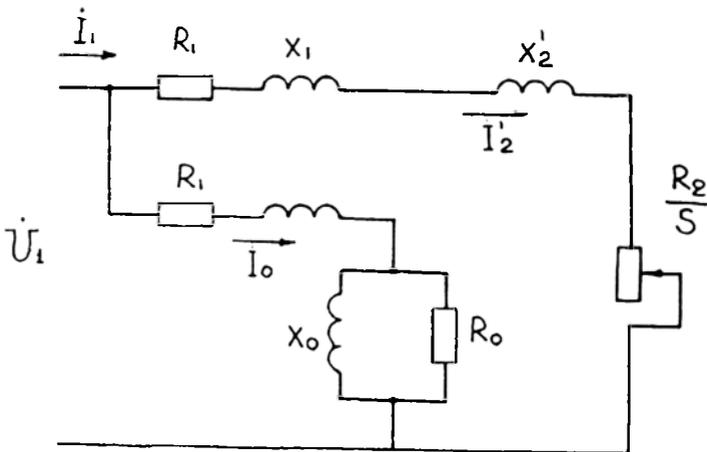
$$E'_{2k} k_E E_{2k} = (w_1 k_{\phi 61} / w_2 k_{\phi 62}) 4,44 f_1 w_2 k_{\phi 62} \Phi = 4,44 k_{\phi 61} f_1 w_1 \Phi = E_1 = E.$$

Таким образом, имея равные э.д.с. ротора и статора с одной частотой, можно представить цепи ротора и статора в виде одной схемы замещения [1].

На рис. 1.1, а показана Т-образная схема замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.



а)



б)

Рис.1.1

На схеме обозначены: R_0 и X_0 - эквивалентное сопротивление потерь в стали и индуктивное сопротивление намагничивания; R_1 и X_1 - активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора;

I_0 - ток намагничивания; I_μ и I_R - индуктивная и активная составляющие тока намагничивания; U_1 - фазное напряжение питания.

В некоторых случаях более удобно пользоваться Г-образной схемой замещения, в которой ветвь намагничивания вынесена на зажимы источника питания (рис. 1.1, б). Для расчетов, где допустимо отклонение параметров схемы в пределах 5 процентов, их можно принять равными параметрам исходной Т-образной схемы замещения. Если необходима более высокая точность, то параметры должны определяться с учетом поправочных коэффициентов [1].

Преобразование энергии в асинхронных электродвигателях неизбежно сопровождается потерями: электрическими, магнитными, механическими и добавочными.

Активная мощность P_1 , подводимая к трехфазному асинхронному электродвигателю из питающей сети, частично расходуется на покрытие магнитных потерь в стали и электрических потерь в обмотке статора:

$$P_1 = 3 U_1 I_1 \cos \varphi.$$

Активная мощность, которая передается со статора на ротор, определяется в соответствии со схемой замещения:

$$P_2 = 3 (I_2')^2 R_2 / s.$$

Эта мощность поступает на ротор через магнитное поле, что и определило ее название - электромагнитная мощность.

Часть электромагнитной энергии расходуется в обмотке ротора в виде электрических потерь, а оставшаяся часть преобразуется в полную механическую мощность.

Полезная механическая мощность на валу двигателя P_2 меньше полной механической мощности на величину механических и добавочных потерь.

Отношение полезной механической мощности на валу к потребляемой активной электрической мощности - есть коэффициент полезного действия (к.п.д.) асинхронного двигателя:

$$\eta = P_2 / P_1,$$

разность между этими двумя мощностями равна суммарным потерям

в двигателе:

$$DP = P_1 - P_2.$$

Следует подчеркнуть, что на заводской табличке двигателя указываются номинальные значения: полезной мощности на валу; линейного напряжения питания; к.п.д. и коэффициента мощности.

Например, если на табличке указаны $P_1 = 15$ кВт, $U_H = 380$ В, $\cos \varphi_H = 0,8$, $\eta_H = 0,75$, то двигатель потребляет из сети в номинальном режиме мощность:

$$P_1 = P_H / \eta_H = 15 / 0,75 = 20 \text{ кВт.}$$

Важное практическое значение имеет зависимость вращающего момента асинхронного электродвигателя от скольжения.

Электромагнитный вращающий момент M , развиваемый асинхронным двигателем, связан с электромагнитной мощностью соотношением [1]:

$$M = P_3 / \omega_1 = 3(I_2')^2 R_2' / s \omega_1.$$

Следует отметить, что вращающий момент асинхронного двигателя пропорционален активной мощности, которая выделяется в активном сопротивлении обмотки ротора.

Используя схему замещения, эту связь можно выразить через параметры статора и ротора:

$$M = \frac{3U_1^2 R_2'}{\omega_1 s [(R_1 + R_2' / s)^2 + (x_1 + x_2')^2]}.$$

Анализируя приведенную выше формулу, можно получить достаточно полное представление о механических свойствах асинхронных двигателей.

Прежде всего необходимо отметить, что вращающий момент двигателя зависит от трех групп величин: первая - величины, определяемые конструкцией электродвигателя (R_1, R_2', x_1, x_2'); вторая - величины, характеризующие источник питания (уровень напряжения и частота); третья - величины, связанные с механической нагрузкой (момент сопротивления, скольжение или скорость вращения ротора).

На рис. 1.2,а показана естественная механическая характеристика асинхронного двигателя при неизменных напряжении и частоте источника питания.

Важное значение для оценки рабочих свойств асинхронной машины в режиме двигателя ($0 < s < 1$) имеют особые точки механической характеристики, соответствующие пусковому моменту M_n , максимальному - M_m и номинальному вращающему моменту M_n .

Во время пуска двигателя в ход, пока ротор неподвижен, скольжение равно 1. Поэтому э.д.с. и ток обмотки ротора максимальны. Соответственно ток обмотки статора превышает номинальный ток двигателя в несколько раз. Но двигатель развивает сравнительно небольшой вращающий момент, который и принято называть пусковым. Несоответствие между пусковым током и пусковым моментом связано с преобладанием индуктивной составляющей в сопротивлении обмотки ротора в период пуска, а вращающий момент, как уже отмечалось, пропорционален активному сопротивлению этой обмотки.

Пусковой момент двигателя можно определить так:

$$M_n = \frac{3U_1^2 R_2'}{\omega_1 [(R_1 + R_2')^2 + (x_1 + x_2')^2]}.$$

Чтобы двигатель развернулся под нагрузкой, его пусковой момент должен быть больше момента сопротивления рабочего механизма. Под действием пускового момента ротор двигателя начинает вращаться, скольжение уменьшается, а вращающий момент увеличивается.

При некотором значении скольжения $s_{кр}$, называемом критическим, вращающий момент двигателя достигает максимального значения M_m .

Взяв производную от электромагнитного вращающего момента по скольжению и приравняв ее нулю, можно получить уравнение относительно скольжения. Решение этого уравнения дает значение скольжения, при котором вращающий момент имеет максимальное значение:

$$s = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2}}.$$

Здесь знак плюс соответствует двигательному, а минус - генераторному режимам работы машины.

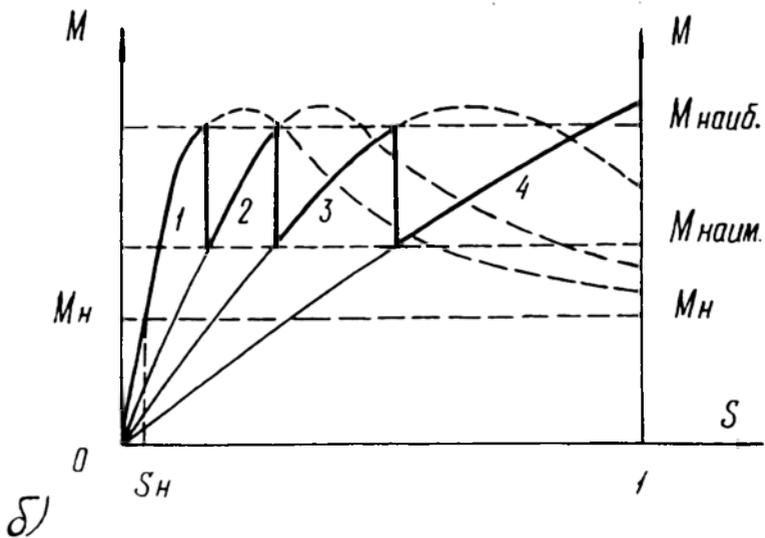
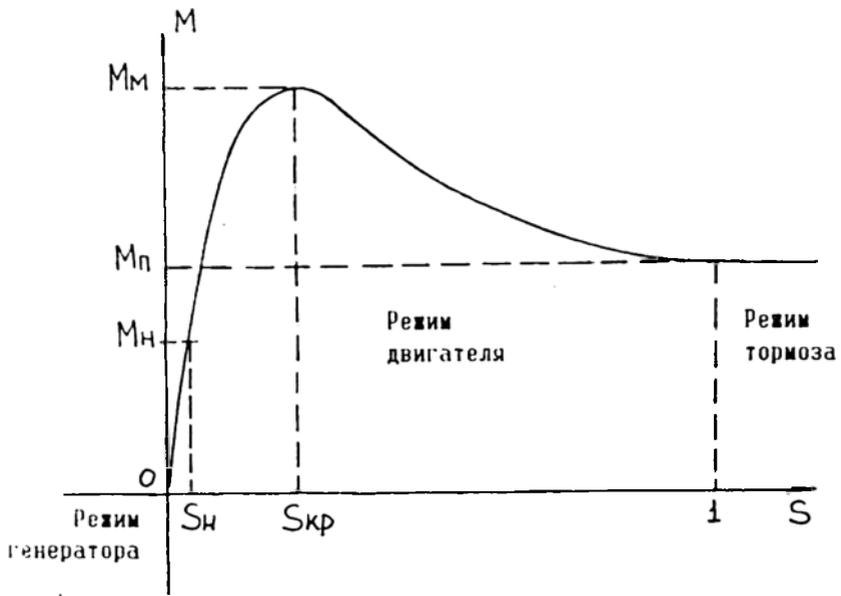


Рис 1.2

Используя это значение скольжения, можно определить максимальный вращающий момент двигателя:

$$M_M = \frac{3U_1^2}{2\omega_1[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2}]}$$

Для электродвигателей мощностью более 1 кВт, практически, всегда $R_1 \ll (x_1 + x_2')$, и можно принять $R_1 = 0$. Тогда формулы для критического скольжения и максимального вращающего момента упрощаются:

$$s \approx \pm \frac{R_2'}{x_1 + x_2'}; \quad M_M \approx \frac{3U_1^2}{2\omega_1(x_1 + x_2')}$$

Отношение текущего значения вращающего момента к максимальному позволяет получить упрощенное широкоиспользуемое выражение для механической характеристики двигателя в относительных единицах:

$$\frac{M}{M_M} = \frac{2}{s/s_{кр} + s_{кр}/s}$$

Это соотношение дает возможность построить механическую характеристику по каталожным данным.

Номинальный вращающий момент двигателя соответствует номинальному скольжению, значение которого обычно находится в диапазоне от 0,01 до 0,1, причем меньшие значения относятся к крупным, а большие - к мелким двигателям. Он определяется так:

$$M_M = \frac{P_{2H}}{\omega_H} = \frac{60P_{2H}}{2\pi n_H} = 9,55 \frac{P_{2H}}{n_H} \text{ (Н/м)},$$

где P_{2H} - номинальная полезная механическая мощность на валу (Вт);
 $\omega_H = 2\pi n_H / 60$ - номинальная угловая скорость вращения ротора (1/с);
 n_H - номинальная частота вращения ротора (об/мин).

При работе двигателя с малыми скольжениями от 0 до $s_{кр}$, к которым относится и номинальное, увеличение скольжения под действием тормозного момента вызывает увеличение вращающего момента двигателя. Благодаря этому обеспечивается устойчивая работа двигателя.

При скольжении больше $s_{кр}$ работа двигателя неустойчива, т.к. на этом участке характеристики увеличение скольжения сопровождается уменьшением вращающего момента.

Механические характеристики асинхронных двигателей могут быть весьма разнообразными, но обычно соблюдаются определенные соотношения между основными параметрами. Так, для того, чтобы обеспечить успешный пуск двигателя, необходимо иметь $M_p / M_n > 1$, а для нормальной работы под нагрузкой, как правило, выдерживается соотношение $M_m / M_n = 1,8 - 2,5$.

Необходимо отметить, что механическую характеристику асинхронного двигателя с фазным ротором можно изменять путем включения дополнительных сопротивлений в цепь ротора. На рис. 1.2,б показано семейство механических характеристик двигателя с фазным ротором при различных сопротивлениях в цепи ротора. Как видно, можно подобрать такие сопротивления, при которых пусковой момент становится равным (или близким) по величине максимальному вращающему моменту двигателя, а характеристика - практически, линейной (4).

Таким образом, у двигателя с фазным ротором можно регулировать скорость вращения ротора и обеспечить достаточно плавный пуск, если последовательно уменьшать сопротивления в цепи ротора и соответственно переходить от одной к другой искусственной характеристике (4, 3, 2) до естественной (1), когда внешние сопротивления снижаются до нуля.

1.2. Конструкции асинхронных электродвигателей

Асинхронные электродвигатели общего применения мощностью от 0,025 до 400 кВт с номинальным напряжением до 1000 В выпускаются единичными сериями. В каждой серии имеется широчайший набор двигателей по номинальным мощностям, напряжениям питания и скоростям вращения вала. Машины одной серии выполняются для единых условий эксплуатации, имеют подобные конструкции и однотипные основные характеристики. Сегодня отечественная промышленность ориентирована на выпуск электродвигателей новой унифицированной серии АИ, но

отдельные заводы продолжают выпуск машин предыдущей единой серии 4А [2, 3].

В зависимости от конструкции ротора все эти электродвигатели делят на две большие группы: двигатели с короткозамкнутой обмоткой (рис. 1.3) и фазной - на роторе (рис. 1.4).

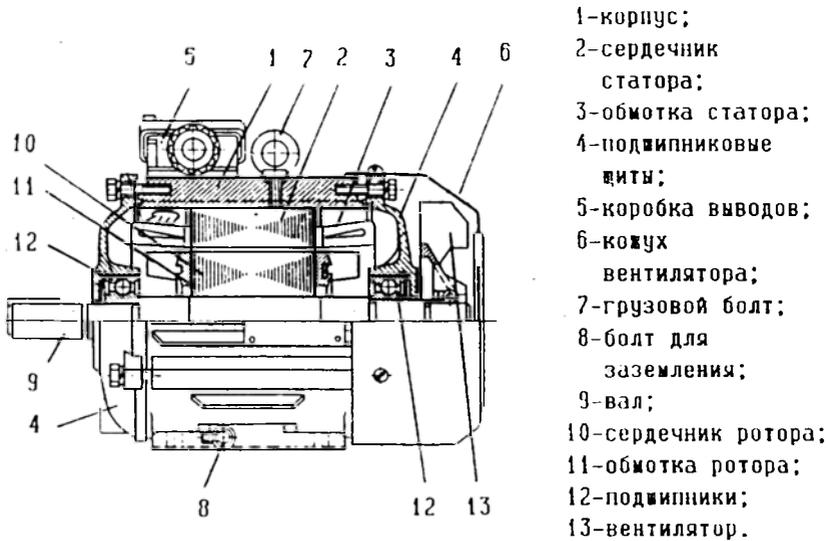


Рис. 1.3

Конструкции статоров, корпусов, подшипниковых щитов и общая компоновка машин обеих видов не имеют существенных различий. Статор машины серии АИ состоит из корпуса 1 и сердечника 2 с обмоткой 3. Корпус двигателя цельный, отлит из алюминиевого сплава. Внутри корпуса установлен сердечник, а снаружи к нему крепятся подшипниковые щиты 4, коробка выводов обмоток 5, кожух вентилятора 6, грузовой болт 7 и болт для подключения заземления 8.

Все вращающиеся элементы двигателя крепятся к валу двигателя 9. Сердечник ротора 10 с обмоткой 11 и внутренние обоймы шариковых подшипников 12 напрессованы на вал. На нерабочем конце вала укреплен

вентилятор 13. Кожух вентилятора и ребра корпуса обеспечивают определенное направление движения охлаждающего воздуха.

Два подшипниковых щита обеспечивают фиксированное положение ротора относительно статора с равномерным воздушным зазором. Они крепятся к корпусу двигателя болтами, а наружные обоймы подшипников, на которых вращается ротор, устанавливаются в специальных гнездах.

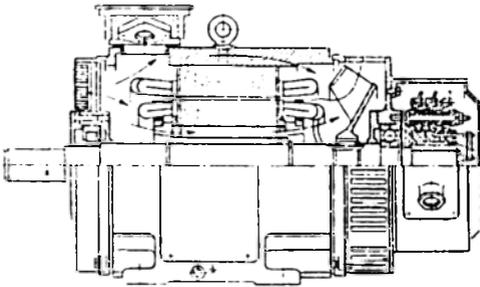


Рис. 1.4

Сердечники статора и ротора набираются из изолированных листов электротехнической стали. Изоляция листов статора - лаковая, а ротора - окалина, образующаяся в процессе прокатки стали. В пазах сердечника статора и ротора размещены обмотки.

Обмотки короткозамкнутых роторов не имеют специальной корпусной изоляции. Их выполняют путем заливки пазов алюминием или его сплавами, причем одновременно отливают стержни обмоток, замыкающие кольца и вентиляционные лопатки. Форма пазов роторов выбирается в зависимости от требований к пусковым характеристикам двигателя.

Для повышения пускового момента используют эффект вытеснения тока. Он заключается в неравномерном распределении тока по поперечному сечению стержней обмотки ротора. С увеличением частоты тока в обмотке ротора плотность тока уменьшается в нижней части стержня и увеличивается в верхней части, обращенной к воздушному зазору.

Поэтому в начальный момент пуска при $S = 1$ активное сопротивление обмотки ротора возрастает. Это вызывает увеличение пускового момента. В процессе разгона частота тока ротора снижается и, следовательно, уменьшается эквивалентное активное сопротивление обмотки ротора. При малых скольжениях эффект вытеснения тока практически отсутствует.

Для получения требуемых улучшенных пусковых характеристик пазы выполняют глубокими (больше глубины проникновения магнитного поля, которую обычно принимают равной 15 мм) с сечением в виде фигур с уменьшенной площадью в верхней части (рис. 1.5, а, б, в). Роторы двигателей для тяжелых условий пуска выполняют с двойной белничьей клеткой (рис. 1.5, г). Здесь эффект вытеснения тока проявляется в большей степени.

Фазные роторы асинхронных машин имеют более сложную конструкцию. В пазах роторов укладывается обмотка со специальной корпусной и витковой изоляцией с тем же числом полюсов, что и обмотка статора.

Обмотка статора соединяется в звезду и имеет три вывода, которые подключены к трем контактными кольцам, расположенным на выступающем конце вала и изолированным друг от друга. Через неподвижные прилегающие к контактным кольцам щетки в цепь обмотки ротора можно включать добавочные сопротивления или замыкать обмотку накоротко. Это позволяет получить большой пусковой момент и ограничить пусковой ток двигателя, а также обеспечить плавный пуск двигателя и регулировать частоту вращения ротора.

Конструкции обмоток статоров асинхронных машин весьма разнообразны и имеют определенные особенности в зависимости от мощности машин. Так, обмотки статоров двигателей мощностью до 15 кВт обычно выполняются однослойными из круглого изолированного провода. Здесь в каждом пазу находятся проводники только одной фазы обмотки. Расположение проводников в пазу произвольно (рис. 1.6), они

как бы всыпаны в паз. Отсюда произошло и название конструкции обмотки - "всыпная".

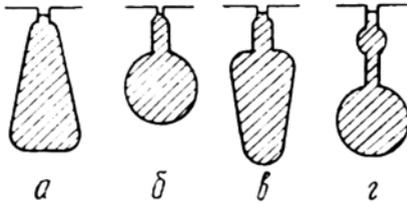


Рис. 1.5

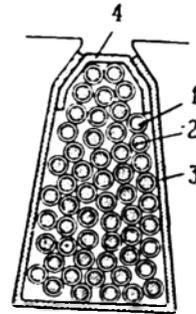


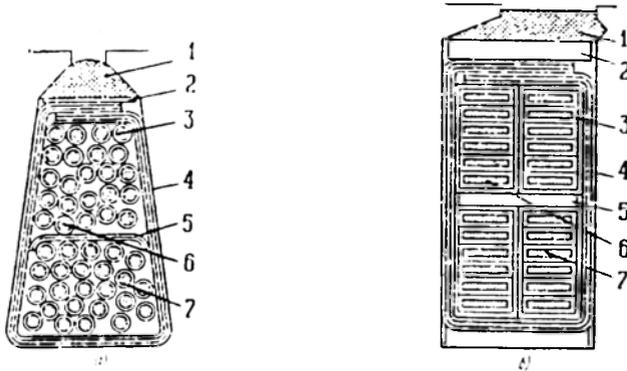
Рис. 1.6

Изоляция между отдельными витками 1 обеспечивается здесь за счет изоляционного покрытия проводников 2 (лак, эмаль и т.п.). Все проводники изолированы от сердечника прокладкой 3, которая является корпусной изоляцией. Проводники закрепляются в пазу с помощью специального деревянного или пластмассового клина 4.

В лобовых частях катушки разных фаз могут соприкасаться и их дополнительно изолируют специальными прокладками различной формы. Эти прокладки выполняют роль междуфазной изоляции.

Обмотки статоров машин мощностью от 15 кВт до 100 кВт, как правило, двухслойные и изготавливаются из круглого провода (рис. 1.7, а). В машинах большей мощности для двухслойных обмоток используют прямоугольные проводники, которые укладывают в полуоткрытые пазы (рис. 1.7, б). Эти обмотки могут выполняться как с диаметральным, так и с укороченным шагом, что способствует их широкому применению. При диаметральном шаге в каждом из пазов расположены верхние и нижние стороны катушек одной фазы. В обмотках с укороченным шагом имеются пазы, в которых размещаются стороны катушек, принадлежащие разным фазам. Поэтому в двухслойных обмотках между нижней и верхней

сторонами катушек обязательно устанавливается изолирующая прокладка, которая должна выдерживать полное номинальное напряжение машины.



1-клин;
2-изоляционная прокладка;
3-проводники;
4-корпусная изоляция;

5-изоляционная прокладка
между слоями обмотки;
6-проводники верхнего слоя;
7-проводники нижнего слоя.

Рис.1.7

Асинхронные двигатели большой мощности (машины с номинальной мощностью более 100 кВт и номинальным напряжением выше 1000 В) выпускаются небольшими сериями, имеют те же основные узлы, что и низковольтные машины, но отличаются размерами и некоторыми деталями.

Так, электродвигатели широко распространенной серии АД-2 выпускаются мощностью от 315 кВт до 8000 кВт с номинальным напряжением 6 кВ. Электродвигатели мощностью до 800 кВт имеют щитовые подшипники (рис. 1.8, а), а более крупные машины - стоячковые подшипники скольжения с принудительной смазкой (рис. 1.8, б).

Сердечник статора состоит из пакетов с вентиляционными каналами или охлаждающими сегментами между ними. Пакеты набираются из отдельных сегментов электротехнической стали толщиной 0,5 мм.

Активная сталь удерживается в корпусе статора в запрессованном состоянии специальными нажимными кольцами из немагнитного чугуна.

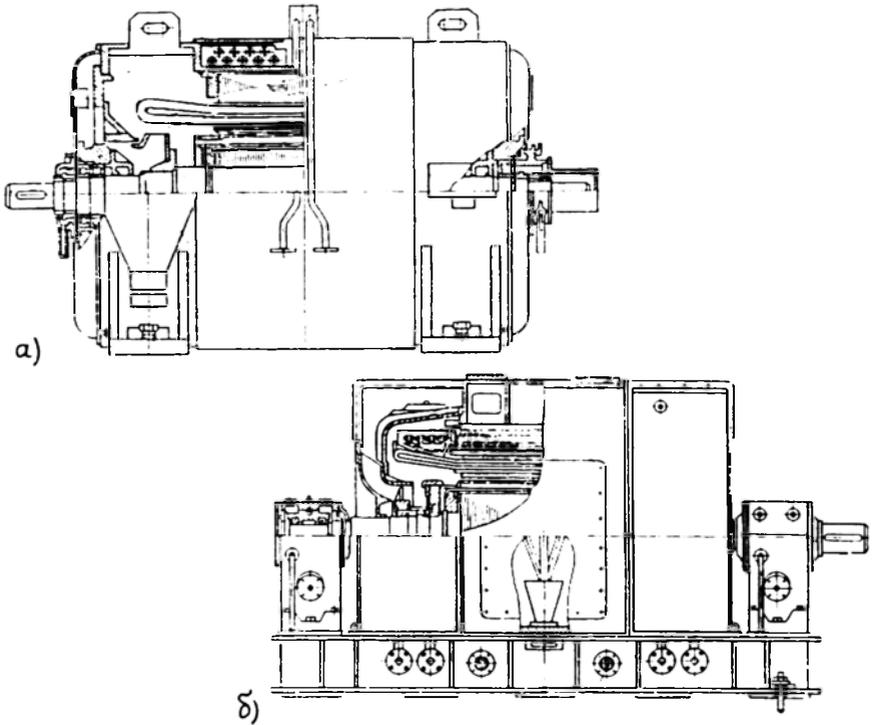


Рис. 1.8

Обмотка статора стержневая. Стержни имеют непрерывную изоляцию, выполненную на термоактивных связующих типа монолит-2.

Короткозамкнутая обмотка ротора выполнена из медных стержней, концы которых замкнуты медными кольцами. У двигателей мощностью меньше 500 кВт для обмотки ротора применяют алюминий.

1.3. Нормальные режимы работы асинхронных двигателей

Системы релейной защиты электрического оборудования обычно контролируют состояние защищаемого объекта, используя информацию лишь о токах и напряжениях. Эти величины, как правило, достаточно полно характеризуют режимы работы двигателей и наиболее удобны для обработки.

Исследования режимов работы двигателей удобно проводить, пользуясь Г-образной схемой замещения (рис. 1.1,б). Использование этой упрощенной схемы замещения вполне правомерно, так же как и Т-образной схемы, приведенной на рис. 1.1, а [1].

В режиме холостого хода ротор двигателя вращается, не выполняя полезной работы, с частотой, близкой к синхронной. При этом скольжение и, следовательно, ток ротора, практически равны нулю. Учитывая это, в соответствии со схемой замещения ток статора и его фазу можно определить так:

$$I_x = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_{CT})^2 + (x_1 + x_\mu)^2}};$$

$$\varphi_x = \arccos \frac{R_1 + R_{CT}}{\sqrt{(R_1 + R_{CT})^2 + (x_1 + x_\mu)^2}}.$$

При наличии полезной нагрузки двигателя частота вращения ротора снижается и увеличивается скольжение. Это вызывает повышение тока ротора и соответственно тока статора, который равен сумме двух токов:

$$I_1 = I_0 + I_2'.$$

Здесь первое слагаемое - это ток намагничивания, который, практически, равен току холостого хода и не изменяется по амплитуде и фазе при изменении частоты вращения ротора. Второе слагаемое - это ток ротора:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_{2/s}')^2 + (x_1 + x_2')^2}};$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_1 + R_{2/s}'}{\sqrt{(R_1 + R_{2/s}')^2 + (x_1 + x_2')^2}}.$$

Ток статора и коэффициент мощности, соответствующие номинальному режиму работы двигателя, приводятся в паспорте двигателя.

Если номинальный ток статора не известен, то его можно определить так:

$$I_{1н} = \frac{P_{н}}{\sqrt{3} U_{лн} \eta_{н} \cos \varphi_{н}}.$$

где $U_{лн}$ - номинальное линейное напряжение питания; $\eta_{н}$ и $\cos \varphi_{н}$ - к.п.д. и коэффициент мощности, соответствующие номинальному режиму работы двигателя.

Наибольший рабочий ток протекает по обмотке статора при пуске двигателя, когда ротор неподвижен и скольжение равно 1:

$$\begin{aligned} I_{1н} &= I_0 + I_{2пн}; \\ I_{2п} &= \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}}. \end{aligned}$$

Соответствующий этому режиму коэффициент мощности равен:

$$\cos \varphi_{п} = \frac{R_1 + R_2'}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}}.$$

Для процесса пуска асинхронного двигателя характерно изменение фазы пускового тока. По мере разгона двигателя уменьшается скольжение и увеличивается активная составляющая сопротивления ротора $R_{2,з}'$. В результате этого повышается коэффициент мощности и снижается уровень тока статора. На рис. 1.9 показано изменение тока статора в процессе пуска асинхронного двигателя под нагрузкой. Если двигатель пускается в ход под нагрузкой, то в начале процесса коэффициент мощности составляет 0,4 - 0,5. В завершающей стадии он приближается к номинальному значению 0,8 - 0,85. Если же двигатель пускается без нагрузки, то после некоторого повышения в завершающей стадии пуска, коэффициент мощности снижается до уровня, определяемого режимом холостого хода.

Следует отметить, что диапазон изменения тока статора в нормальных рабочих режимах достаточно велик. Так, в режиме холостого хода ток статора обычно составляет 20 - 40 % номинального тока статора, а пусковой ток превышает номинальный в 3 - 7 раз.

Время разгона двигателя (это, практически, время протекания пускового тока по обмотке) зависит как от собственных параметров двигателя, так и от характеристик приводимого механизма. Наиболее быстро, за время в пределах 10 с, разгоняются насосы. Механизмы с большими маховыми массами (дымососы, дробилки и др.) могут иметь время разгона несколько десятков секунд.

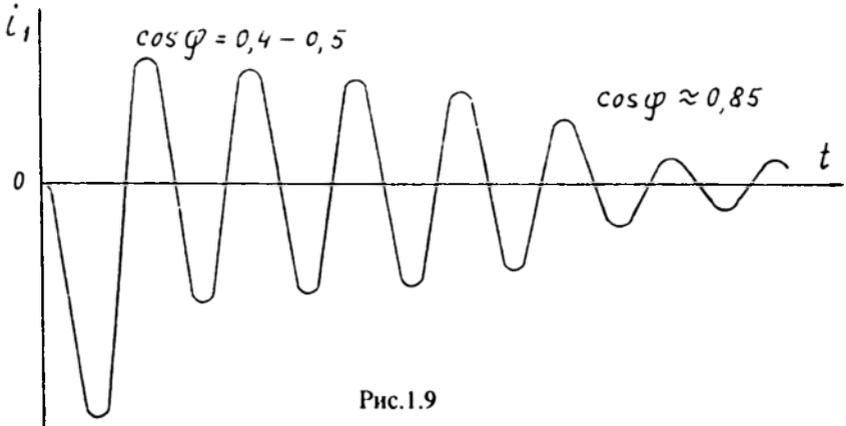


Рис.1.9

Учитывая то, что ток статора двигателя при пуске соизмерим по уровню с током короткого замыкания, процесс пуска следует рассмотреть более подробно.

Пуск асинхронного двигателя в физическом смысле представляет собой процесс разгона некоторой вращающейся массы из состояния покоя до установившейся скорости вращения при противодействии момента сопротивления. Этот процесс описывается уравнением движения [4]:

$$M_{\text{из}} = M - M_c - J \frac{d\omega}{dt},$$

где M - вращающий момент электродвигателя; M_c - момент сопротивления; $M_{\text{из}}$ - избыточный (динамический) момент; $J = G D_2 / 4$ - суммарный момент инерции агрегата двигатель-механизм, приведенный к валу двигателя.

Это уравнение целесообразно представить в относительных единицах:

$$m_{1B} = -\tau_J \frac{ds}{dt}$$

Здесь $m_{1B} = \frac{M_{1B}}{M_H}$; $\tau_J = \frac{GD^2 \omega_0}{4M_H}$ - механическая постоянная времени агрегата; M_H - номинальный вращающий момент двигателя; ω и ω_0 - текущая и синхронная угловые скорости.

Время, соответствующее изменению скольжения от S_1 до S_2 , находится путем интегрирования уравнения движения:

$$t = -\tau_J \int_{S_1}^{S_2} ds / m_{1B} .$$

Если допустить, что избыточный момент есть постоянная величина, равная номинальному моменту двигателя, то время разгона двигателя до синхронной (номинальной) скорости будет равно механической постоянной времени:

$$t_{\text{ПНОМ}} = -\tau_J \int_1^0 ds = +\tau_J .$$

Эту величину иногда называют номинальным временем пуска, и она дает наглядное представление о физическом смысле механической постоянной времени.

Так, механическая постоянная времени - это величина, равная времени разгона двигателя от неподвижного состояния до синхронной скорости под действием постоянного избыточного момента, равного номинальному моменту двигателя.

Для того, чтобы определить реальное время пуска двигателя, необходимо иметь механические характеристики двигателя и приводимого механизма. Описание этих характеристик в виде аналитических зависимостей очень громоздко, а часто и невозможно. Наиболее распространено графическое представление механических характеристик. Поэтому при практических расчетах для релейной защиты и автоматики, где допустимы погрешности до 10 %, удобно пользоваться графоаналитическим методом.

Во-первых, строится механическая характеристика двигателя (1) и механизма (2) в относительных единицах. За базисную величину

принимается номинальный момент двигателя и все механические параметры приводятся к валу двигателя. Путем графического вычитания строится кривая избыточного момента (3) (рис. 1.10).

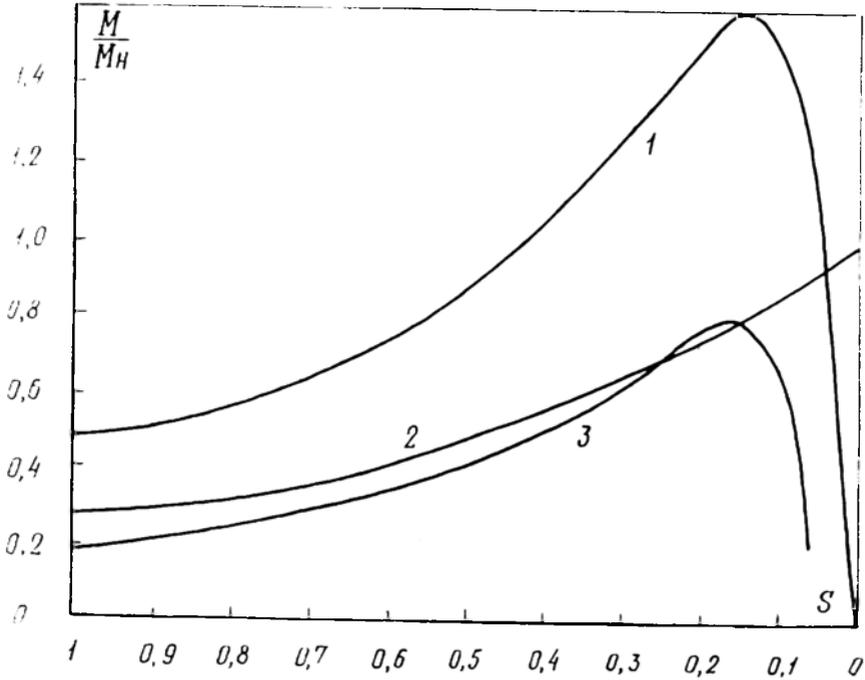


Рис. 1.10

Во-вторых, область, ограниченная кривой избыточного момента и осью абсцисс, разбивается на ряд прямоугольников с основанием Δs_i и высотой $\Delta m_{\text{из}i}$.

В третьих, вычисляется время пуска двигателя:

$$t = -\tau_J \sum_{i=1}^{1=n} \Delta s_i / \Delta m_{\text{из}i}.$$

Рассмотрим пример. Пусть необходимо определить время пуска электродвигателя воздухоудвки. $P_n = 500$ кВт; $n_0 = 750$ об/мин; маховые массы двигателя и воздухоудвки: $G D_{\text{эд}}^2 = 42$ кгм; $G D_B^2 = 1200$ кгм. Механические характеристики представлены на рис. 1.10.

Согласно рисунку, можно записать:

$$t_{11} = \tau_J \left[\frac{0,1}{0,2} + \frac{0,1}{0,22} + \frac{0,1}{0,26} + \frac{0,1}{0,32} + \frac{0,1}{0,38} + \frac{0,1}{0,43} + \frac{0,1}{0,57} + \frac{0,1}{0,72} + \frac{0,05}{0,8} + \frac{0,05}{0,75} + \frac{0,05}{0,3} \right] = 2,76 \tau_J ;$$

$$t_J = \frac{(G D_{ЭД}^2 + G D_B^2) \omega_0}{4 M_H} = \frac{(G D_{ЭД}^2 + G D_B^2) n_0}{364 P_H} = \frac{(42 + 1200) 750^2}{364 \cdot 500 \cdot 10^3} = 3,8 \text{ с.}$$

$$t_{11} = 2,76 \times 3,8 = 10,6 \text{ с.}$$

1.4. Повреждения электродвигателей

Подавляющее большинство аварий электродвигателей связано с разрушением изоляции. Наиболее уязвимым элементом асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором является изоляция обмотки статора.

В процессе эксплуатации изоляция подвергается тепловым, механическим и химическим воздействиям, а также воздействиям влаги, поверхностного загрязнения и электрического поля. Изоляция длительно сохраняет свои свойства в условиях, когда интенсивность воздействия всех этих факторов не превышает допустимого уровня. Чрезмерно интенсивное воздействие даже одного из факторов может привести к быстрому разрушению изоляции.

Наиболее часто повреждения изоляции вызывает тепловое воздействие.

При высокой температуре изоляция интенсивно стареет, снижается электрическая и механическая прочность, образуются трещины, теряется эластичность и, как следствие, возникают благоприятные условия для пробоя.

Кроме того, ухудшается способность противостоять вибрации и ударам, проникновению влаги и агрессивных компонентов окружающей среды. Усадка при нагреве приводит к ослаблению креплений и колебаниям катушек, клиньев, пазовых прокладок и других деталей, что способствует возникновению повреждений механического характера.

Нагрев обмотки происходит, в основном, за счет мощности, выделяющейся в проводниках при прохождении тока [4]. Перегрев же обмотки

обычно обуславливается воздействием сверхтоков, вызванных ненормальными режимами работы двигателя.

Оценить температуру обмотки с приемлемой для релейной защиты точностью можно путем решения уравнения теплового баланса [4]:

$$\Delta P dt = \alpha F T dt + c G dt,$$

где ΔP - активная мощность, выделяющаяся в обмотке; α - коэффициент теплоотдачи, который зависит от конструкции обмотки и условий вентиляции; F - площадь поверхности обмотки; T - превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды; c - удельная теплоемкость материала обмотки; G - масса обмотки.

Первое слагаемое в правой части уравнения определяет энергию, отводимую от обмотки через ее поверхность. Второе слагаемое - тепловую энергию, которая расходуется на изменение температуры обмотки. Энергия, выделяющаяся в обмотке за время dt , определяется электрическими потерями в ней:

$$\Delta R dt = I^2 r dt,$$

где I - ток в обмотке; r - эквивалентное активное сопротивление обмотки.

Решение уравнения теплового баланса имеет следующий вид:

$$T = T_y - (T_y - T_{нач}) e^{-t/\tau}.$$

Здесь $T_{нач}$ и T_y - начальное и установившееся значения превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды; $\tau = cG/(\alpha F)$ - постоянная времени нагрева обмотки;

$$T_y = \frac{\Delta R}{\alpha F} = \frac{I^2 r}{\alpha F}.$$

На рис. 1.11 показаны процессы изменения температуры обмотки при разных значениях тока и равных начальных условиях. Здесь $I' < I'' < I''' < I''''$. Как видно, чем больше ток, протекающий по обмотке, тем выше установившееся значение температуры обмотки.

Однако температура обмотки не должна превышать предельно допустимое значение, которое определяется классом нагревостойкости изоляции и условно обозначено на рисунке прямой линией $T_{доп}$. Следовательно, ток I' может протекать по обмотке не вызывая ее пере-

грева сколько угодно долго, ток I'' - не более $i''_д$, ток I''' - не более $i'''_д$ и ток I'''' - не более $i''''_д$.

Причем, чем больше ток - тем меньше время нагрева обмотки до предельно допустимой температуры.

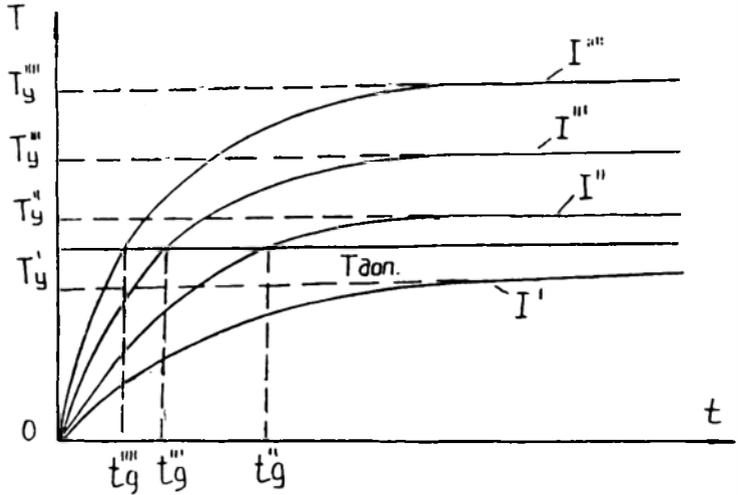


Рис.1.11

В нормальных условиях должно выполняться неравенство:

$$T_{\text{доп}} \geq T_y - (T_y - T_{\text{нач}}) e^{-t/\tau} + T_0,$$

где T_0 - температура окружающей среды.

Аварии, связанные с повреждением изоляции, часто возникают вследствие развития локальных дефектов. Так, при нарушении изоляции двух соседних проводников обмотки, происходит межвитковое замыкание. В обмотке образуется контур, содержащий один или несколько витков, по которому циркулирует большой ток короткого замыкания. Этот ток вызывает разогрев проводников контура до высокой температуры, при которой разрушаются не только изоляционные материалы, но часто и металлические проводники обмотки.

Особенно часто межвитковые замыкания происходят в машинах небольшой мощности, имеющих вспяные обмотки, выполненные из круглого провода с эмалевой изоляцией. Здесь витковой изоляцией служат лишь два слоя эмали, а напряжение между отдельными соседними проводниками может достигать значения фазного. В этих условиях даже незначительный дефект или локальный перегрев эмалевой изоляции приводит к межвитковому замыканию.

При нарушении изоляции между проводниками разных фаз возникает короткое междуфазное замыкание. Такие замыкания обычно происходят в лобовых частях, но возможны и в пазовой части двухслойной обмотки, если сдвинуты или повреждены междуслойные прокладки.

Нарушение изоляции, отделяющей обмотку от корпуса, приводит к однофазному замыканию на корпус. При этом на корпус может попасть полное фазное напряжение. Чтобы обеспечить безопасность персонала, корпус машины должен быть заземлен.

В сетях с глухозаземленной нейтралью (стандартные номинальные напряжения 0,4 и 0,66 кВ) замыкание на корпус приводит к однофазному короткому замыканию с большим током замыкания, а в сетях с изолированной нейтралью (6, 10 кВ) - к однофазному замыканию на землю с небольшим током замыкания (обычно не более 50 А).

Ток однофазного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью не вызывает глобальных быстроразвивающихся разрушений изоляции. Однако в месте повреждения, где протекает сравнительно небольшой ток замыкания на землю, возможно выгорание стали статора. Для восстановления статора после таких аварий требуется очень трудоемкий ремонт с полной разборкой машины.

Кроме того, повышается вероятность второго замыкания на землю в других фазах, т.к. напряжение этих фаз относительно земли возрастает до линейного (т.е. увеличивается в 1,73 раза), и это может привести к более опасному междуфазному замыканию на землю.

Следует отметить, что три перечисленных выше вида замыканий в обмотках статора редко происходят отдельно. Появление одного из них, как правило, вызывает появление других, и все элементы изоляции (витковая, корпусная и междуфазная) выходят из строя.

Причины возникновения дефектов изоляции, развитие которых может привести к авариям, нередко связаны с механическими повреждениями. Это могут быть последствия единичных ударов по изоляции посторонними предметами, случайно попавшими в машину. Но наиболее трудновывяляемые дефекты возникают при длительной вибрации машины, когда трение изоляции проводников обмотки о крепежные детали вызывает механический износ изоляционного материала. Под действием вибрации часто выкрашиваются отдельные листы активной стали и перерезают изоляцию проводников.

Вибрация асинхронных машин обычно возникает из-за неисправностей подшипников, нарушения центровки валов двигателя и приводимого им механизма и неравномерности воздушного зазора. Повышенная вибрация машины вызывает быстрый износ подшипников и их посадочных гнезд. В результате, если износ остается незамеченным, положение ротора изменяется так, что происходит касание ротора и зубцов статора. Зубцы деформируются и разрушается изоляция обмоток статора.

1.5. Особенности ненормальных режимов работы асинхронных электродвигателей

Ненормальные режимы работы асинхронных двигателей возникают в результате чрезмерного увеличения механической нагрузки на валу или снижения качества питающего напряжения.

Особенно опасны ненормальные режимы, которые вызывают повышение тока статора. Так, если в каком-то режиме ток увеличился в 4 раза, то выделяющееся при этом количество тепла возрастает в 16 раз (см. п. 1.4). Но так как условия охлаждения машины остаются неизменными, температура катастрофически повышается, и если этот про-

цесс своевременно не остановить, то произойдет тепловое разрушение изоляции.

Вращающий момент двигателя в нормальном режиме работы уравнивает момент сопротивления механизма при скольжении не больше номинального. Увеличение нагрузки (момента сопротивления механизма) приводит к повышению скольжения и тока статора. При этом частота вращения ротора снижается, но одновременно, в соответствии с механической характеристикой двигателя, увеличивается вращающий момент. Пока скольжение меньше критического, двигатель работает устойчиво, но ток статора может значительно превышать номинальный.

Если нагрузка возрастет так, что скольжение превысит критическое, то дальнейшее увеличение скольжения будет вызывать снижение вращающего момента. Нарушается устойчивая работа двигателя, происходит его "опрокидывание", т.е. затормаживание до полной остановки.

Ток статора при неподвижном роторе равен пусковому току, который превышает номинальный ток в 3 - 7 раз. В этих условиях, очевидно, температура обмотки быстро возрастает и возникает опасность разрушения изоляции.

Отклонение напряжения питания от номинального в сети, питающей электродвигатели, отражается на механических и электрических характеристиках двигателя и опасно тем, что может привести к перегреву изоляции.

Вращающий момент, пусковой момент и максимальный вращающий момент двигателя пропорциональны квадрату питающего напряжения (см. п. 1.1). Поэтому снижение напряжения в питающей сети приводит к существенному снижению вращающего момента. Если механическая нагрузка двигателя остается постоянной (M_c), то увеличивается скольжение, а вместе с ним - ток статора и потери в меди (рис. 1.12). В результате этого повышается температура обмотки и возникает опасность перегрева изоляции. При значительном снижении напряжения вращающий момент может стать меньше момента сопротивления, тогда двигатель затор-

маживается и ток статора будет определяться параметрами машины при неподвижном роторе.

Повышение напряжения питания вызывает увеличение тока намагничивания. Поскольку характеристика намагничивания стали нелинейна, то незначительное повышение напряжения вызывает существенное увеличение тока намагничивания и нагрев активной стали статора.

При работе двигателя с номинальной нагрузкой, незначительные отклонения напряжения питания в пределах от +10 % до - 5 % номинального допускаются. В этом диапазоне температура обмотки остается в пределах допустимой поскольку повышение потерь в стали компенсируется некоторым снижением потерь в меди при повышении напряжения и увеличение потерь в меди компенсируется снижением потерь в стали при понижении напряжения.

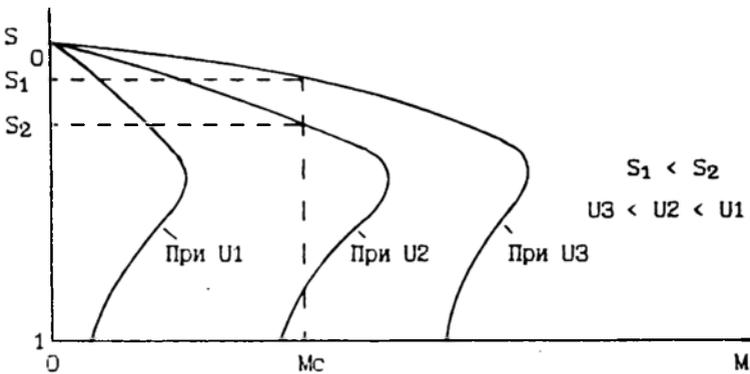


Рис. 1.12

Колебания частоты тока в энергосистемах - это достаточно редкое явление, которое возникает в ситуациях, когда нарушается баланс активной мощности генераторов и потребителей. Изменение частоты в питающей сети приводит к изменению максимального вращающего момента, критического скольжения, а также частоты вращения ротора (рис. 1.13).

Магнитный поток и э.д.с. двигателя изменяются обратно пропорционально частоте, поэтому при снижении частоты ток ротора умень-

шается, а ток намагничивания возрастает (см. п. 1.1). Ток статора нагруженного двигателя возрастает как при понижении, так и при повышении частоты. При повышении частоты это происходит за счет увеличения тока ротора, а при понижении - за счет увеличения тока намагничивания. У некоторых двигателей с пониженным значением тока холостого хода связь между током статора и частотой более сложная. Так, при понижении частоты в пределах 5% номинальной, ток статора этих двигателей уменьшается за счет снижения тока ротора. Но при снижении частоты более чем на 5% и у этих двигателей ток статора возрастает.

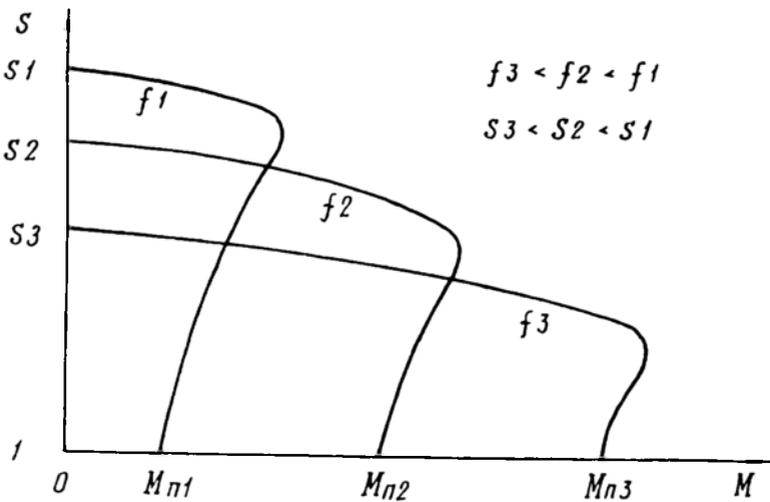


Рис. 1.13

Несимметричные режимы работы асинхронных двигателей возникают достаточно часто. Они могут быть вызваны перегоранием предохранителя, неисправностью контактов коммутационного аппарата и т.п.

Для описания несимметричных режимов работы двигателей пользуются методом симметричных составляющих и соответствующей схемой замещения [4].

Наиболее характерный несимметричный режим - это обрыв одной фазы питающей цепи. Схема замещения двигателя для этого режима показана на рис. 1.14. Токи статора при обрыве фазы А равны: $I_A = 0$; $I_B = -I_C$.

Приведенный ток ротора определяется суммой токов ротора прямой $I_{2(1)}$ и обратной $I_{2(2)}$ последовательностей. При неподвижном роторе эти токи равны по абсолютной величине, т.к. $Z_{2(1)} = Z_{2(2)}$ и создают противоположно направленные вращающие моменты. Поэтому пусковой момент двигателя равен нулю, и двигатель не может развернуться без посторонней помощи.

Ток статора при неподвижном роторе ($S = 1$) в соответствии со схемой замещения равен:

$$\dot{I}_B = -i_c = i_k = \frac{\sqrt{3}\dot{U}_1}{2Z_1 + 2\frac{Z_0 Z'_{2(1)}}{Z_0 + Z'_{2(1)}}} = \frac{\sqrt{3}\dot{U}_1}{2Z_k},$$

где \dot{U}_1 - фазное напряжение источника питания; Z_0 - сопротивление ветви намагничивания; Z_1 - сопротивление обмотки статора; $Z'_{2(1)}$ и $Z'_{2(2)}$ - приведенные к статору сопротивления обмотки ротора прямой и обратной последовательностей; $Z_k = Z_1 + \frac{Z_0 Z'_{2(1)}}{Z_0 + Z'_{2(1)}}$ - эквивалентное сопротивление двигателя при неподвижном роторе в симметричном режиме.

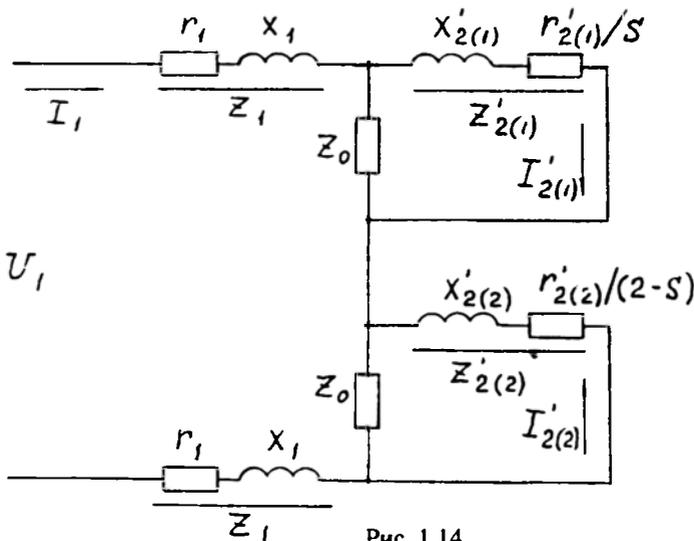


Рис. 1.14

Как видно, ток статора при неподвижном роторе и обрыве одной фазы составляет $\sqrt{3}/2 = 0,87$ пускового тока двигателя, соответствующего нормальным условиям питания. Длительное протекание такого тока представляет опасность для электродвигателя.

При холостом ходе, если принять $S = 0$, ток статора равен:

$$i_x \approx \frac{\sqrt{3} \dot{U}_{(1)}}{Z_1 + Z_0 + Z_k}.$$

Сравнивая этот ток с током холостого хода в нормальных условиях, который равен:

$$j_{\text{хн}} = \frac{\dot{U}_{(1)}}{Z_1 + Z_0},$$

можно отметить, что ток холостого хода двигателя при обрыве фазы питающей сети примерно в $\sqrt{3}$ раз больше.

1.6. Дефекты в механической части асинхронных двигателей

Немало аварий можно предотвратить, если своевременно выявить развивающиеся дефекты в деталях и узлах электродвигателей, которые выполняют механические функции. Например, когда дефект в подшипнике остается незамеченным, под действием усиливающейся вибрации этот подшипник, как правило, разрушается. Вследствие этого нарушается осевая симметрия машины, вращающийся ротор, соприкасаясь с зубцами статора, деформирует активную сталь, что неизбежно приводит к аварии.

При повреждении подшипника или нарушении центровки валов электродвигателя и приводимого им механизма момент сопротивления, действующий на вал электродвигателя, периодически изменяется с частотой, пропорциональной частоте вращения вала. Периодическое изменение момента сопротивления вызывает появление в токе статора электродвигателя составляющих с частотой, пропорциональной частоте вращения вала. Отделение этих составляющих тока от составляющих тока основной частоты и контроль их уровня позволяют выявить механические дефекты на ранней стадии развития.

Связь отдельных составляющих тока статора с характером перегрузки при возникновении механических дефектов можно установить, пользуясь общепринятой эквивалентной схемой замещения асинхронного электродвигателя, приведенной на рис. 1.1,б.

Ток фазы статора асинхронного двигателя в соответствии со схемой замещения при синусоидальном напряжении питания определяется следующим образом:

$$i_1 = i_0 + i_2 = \frac{U_{1m} \sin(\omega_1 t - \varphi)}{\sqrt{(x_1 + x_2')^2 + (R_1 + R_2' / S)^2}};$$

$$\varphi = \arctg[(x_1 + x_2')(R_1 + R_2' / S)^{-1}],$$

где i_0 и i_2' - ток намагничивания и ток ротора электродвигателя; U_{1m} - амплитуда напряжения питания; x_1 и x_2' - индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора; R_1 и R_2' - активные сопротивления обмоток статора и ротора; S - скольжение; ω_1 - частота питающего напряжения.

Как видно, ток статора определяется не только напряжением питания и параметрами электродвигателя, но и скольжением.

Скольжение асинхронного электродвигателя, в свою очередь, зависит от вращающего момента, а следовательно, от момента сопротивления вращению. Для анализа удобно использовать представление момента сопротивления M_C суммой статической M_0 и периодической синусоидальной составляющих (рис. 1.15):

$$M_C = M_0 + M_A \sin \alpha t.$$

Здесь M_A и α - амплитуда и угловая скорость изменения периодической составляющей момента сопротивления.

Решение уравнения движения ротора электродвигателя [5]

$$J \frac{d\alpha}{dt} + M_C = M$$

в этих условиях имеет следующий вид:

$$M = M_0 + \frac{M_A}{\sqrt{1 + (\alpha T_{II})^2}} \sin(\alpha t - \theta) + \frac{M_A \sin \theta}{\sqrt{1 + (\alpha T_{II})^2}} e^{-t/T_{II}},$$

где $T_{II} = J\omega_0 s_H / M_H$; $\theta = \text{arctg } \alpha T_{II}$; M - вращающий момент электродвигателя; J - момент инерции агрегата двигатель-механизм; ω_0 синхронная угловая скорость вращения ротора; s_H и M_H - номинальные скольжение и вращающий момент электродвигателя.

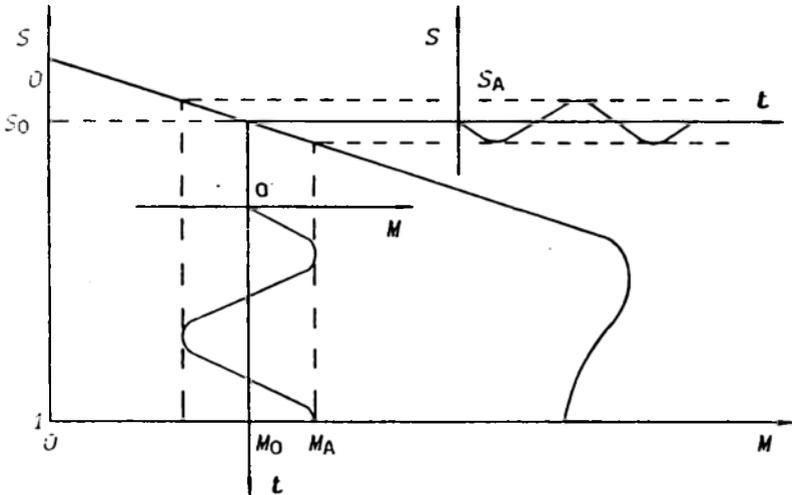


Рис. 1.15

На линейном участке механической характеристики связь скольжения s и вращающего момента можно выразить так:

$$s = M s_H / M_H.$$

Тогда для установившегося режима работы будем иметь:

$$s = s_0 + s_A \sin \alpha t,$$

$$\text{где } s_0 = M_0 \frac{s_H}{M_H}; s_A = \frac{M_A s_H}{M_H \sqrt{1 + (\alpha T_{II})^2}}.$$

Периодическое изменение скольжения вызывает периодическое изменение эквивалентного сопротивления электродвигателя. Изменение этого сопротивления, в свою очередь, вызывает изменение тока статора с частотой, равной α . Однако источник питания имеет частоту ω_1 , отличную от α , и, следовательно, в токе статора появляются составляющие не

только с частотой сети, но и с частотами, определяемыми механическими возмущениями.

Учитывая реальные соотношения параметров электродвигателей, когда скольжение не превышает 0,1 [2]:

$$x_1 + x'_2 \ll R'_2 / s; R_1 \ll R'_2 / s,$$

с целью получения наглядных зависимостей можно принять $x_1 + x'_2 = R_1 = 0$, и представить ток статора следующим уравнением:

$$i_1 = i_0 + \frac{U_{1m} s_0}{R'_2} \sin(\omega_1 t - \varphi) + \frac{U_{1m} s_A}{R'_2} \sin \alpha t \sin(\omega_1 t - \varphi).$$

Подставив в это выражение значение тока намагничивания и разложив произведение синусоидальных функций на две составляющие, получим:

$$i_1 = I_{0m} \sin(\omega_1 t - \Psi) + \frac{U_{1m} s_0}{R'_2} \sin(\omega_1 t - \varphi) + \frac{U_{1m} s_A}{2 R'_2} [\cos(\beta t - \varphi) - \cos(\gamma t - \varphi)],$$

где I_{0m} и Ψ - амплитуда и фаза тока намагничивания; $\beta = \omega_1 - \alpha$, $\gamma = \omega_1 + \alpha$.

Как видно, ток статора при механических повреждениях асинхронного электродвигателя содержит составляющие с частотами, равными частоте источника питания, разности частот источника питания и вращения ротора и сумме этих частот.

Если машина имеет p пар полюсов, то частоты составляющих соответственно равны:

$$\beta' = \frac{\beta}{2\pi} = \frac{\omega_1}{2\pi} \left(1 + \frac{s-1}{p}\right);$$

$$\gamma' = \frac{\gamma}{2\pi} = \frac{\omega_1}{2\pi} \left(1 + \frac{1-s}{p}\right).$$

Приняв $s = s_0$ и считая частоту питающей сети равной 50 Гц, можно оценить диапазон изменения β' и γ' . Ограничившись режимами работы электродвигателя, при которых скольжение s_0 может изменяться от 0,01 до 0,1, будем иметь для двухполюсной машины (синхронная скорость 3000 об/мин) следующие диапазоны возможных изменений частоты: β' - от 0,5 до 5 Гц, и γ' - от 99,5 до 95 Гц.

Следует отметить, что чем больше полюсов имеет машина, тем меньше изменяются частоты β' и γ' при изменении скольжения, и тем ближе они к частоте источника питания. Так, для электродвигателя с $p = 6$ (синхронная скорость 500 об/мин) имеем частоты соответственно: от 41,75 до 42,5 Гц и от 58,25 до 57,6 Гц.

Амплитуда составляющих тока с частотами β и γ зависят не только от напряжения питания и собственных электрических параметров электродвигателя, но и от амплитуды переменной составляющей скольжения, которая, в свою очередь, определяется амплитудой колебаний момента сопротивления вращению вала и инерционностью вращающихся элементов агрегата.

$$\text{Из отношения } \frac{s_A}{s_0} = \frac{M_A}{M_0 \sqrt{1 + (\alpha T_{\Pi})^2}}$$

следует, что чем больше величина αT_{Π} , тем меньше изменяется скольжение при изменении момента сопротивления и меньше амплитуда анализируемых составляющих тока.

Приняв во внимание равенство

$$\alpha T_{\Pi} = J \frac{s_H}{P_H} \omega_0^3 (1 - s_H)^2,$$

где P_H - номинальная мощность двигателя, можно отметить, что инерционные свойства проявляются больше у высокоскоростных двигателей, чем у тихоходных. Кроме того, собственный момент инерции двигателя связан с его номинальной мощностью степенной зависимостью с показателем больше 1, поэтому увеличение номинальной мощности двигателя влечет за собой усиление его инерционности.

Для электродвигателей общего применения с номинальными мощностями от 2,2 кВт до 22 кВт, работающих в режиме, близком к номинальному, отношение s_A/s_0 может составлять от 0,98 M_A/M_0 до 0,3 M_A/M_0 . Большее значение соответствует тихоходному (синхронная скорость 500 об/мин) двигателю с меньшей номинальной мощностью, а меньшее значение - быстроходному (синхронная скорость 3000 об/мин) двигателю с большей номинальной мощностью.

В нормальных эксплуатационных режимах момент сопротивления, а следовательно, и вращающий момент электродвигателя с круговой симметрией ротора не зависит от угла поворота вала и не содержит переменной составляющей момента. Поэтому скольжение не изменяется периодически, и в токе статора отсутствуют составляющие с частотами β и γ , отличными от частоты источника питания.

1.7. Принцип действия, основные параметры и особенности синхронных двигателей

Важнейшая особенность синхронного двигателя отражена в его названии и состоит в том, что скорость вращения ротора равна скорости вращения магнитного поля статора, т.е. ротор вращается синхронно с магнитным полем.

Для создания вращающегося магнитного поля используется трехфазная обмотка переменного тока, уложенная в пазах сердечника статора. На роторе синхронной машины размещена обмотка постоянного тока, которая служит для возбуждения машины, т.е. для создания основного магнитного потока.

Если ротор синхронной машины довести до синхронной скорости вращения и, отключив первичный двигатель, питать обмотку статора трехфазным переменным током, а обмотку ротора - постоянным током, то ротор будет продолжать вращаться с синхронной скоростью и машина перейдет в двигательный режим работы.

Принцип действия синхронного двигателя основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора с полем (полюсами) ротора. На рис. 1.16 условно показан синхронный двигатель в виде двух магнитных систем, разделенных воздушным зазором с тремя парами явновыраженных полюсов. Обе системы могут вращаться вокруг общей оси. Полярность совмещенных полюсов статора и ротора в синхронном

режиме противоположна, что обеспечивает возникновение сил взаимного притяжения полюсов. Поскольку магнитное поле статора вращается, то и ротор, увлекаемый силой притяжения полюсов, также вращается синхронно с полем статора [1].

Если пренебречь трением в машине, то можно допустить, что при холостом ходе момент, противодействующий вращению ротора, равен нулю. В этих условиях оси полюсов магнитных систем статора и ротора совпадают (рис. 1.16,а). Если же к валу ротора приложен тормозной момент (двигатель нагружен), то ось полюса ротора оказывается смещенной относительно оси полюса статора на угол δ в сторону отставания (рис. 1.16,б). Увеличение нагрузки на валу двигателя приводит к увеличению угла отставания δ , что сопровождается увеличением тока статора и, как следствие, вращающего момента двигателя. В связи с этим угол δ часто называют углом нагрузки.

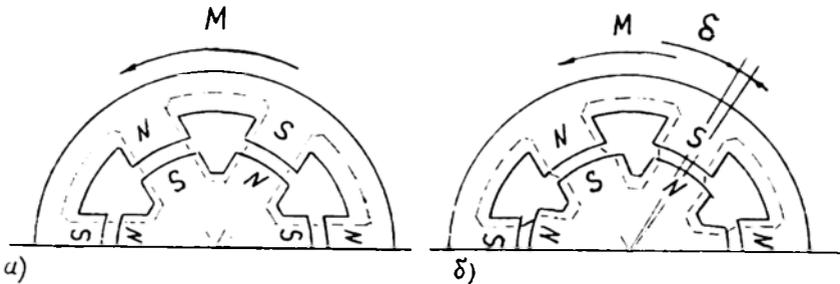


Рис. 1.16

Величина и фаза тока, протекающего в обмотке статора, определяется разностью векторов напряжения сети U_C на зажимах электродвигателя и э.д.с. E_d , наводимой в обмотке статора магнитным потоком ротора.

При работе синхронного двигателя без нагрузки оси полюсов ротора и статора совпадают и, следовательно, совпадают направления векторов U_C и E_d . Величина э.д.с. E_d определяется током возбуждения. Ток возбуждения, при котором э.д.с. равна номинальному напряжению

сети, а ток статора равен нулю, принято называть током возбуждения холостого хода $I_{\text{БХХ}}$.

При увеличении тока возбуждения э.д.с. растет, а вместе с ней и разность $\Delta U = U_C - E_d$.

Вектор тока статора определяется вектором этой разности и отстает от него почти на 90 градусов, т.к. сопротивление обмотки статора в основном индуктивное. На рис. 1.17,а показана векторная диаграмма синхронного двигателя, соответствующая режиму холостого хода с перевозбуждением (ток возбуждения больше тока возбуждения холостого хода). Как видно, ток статора опережает напряжение сети и, следовательно, в этом режиме синхронный двигатель выдает в сеть реактивную мощность.

На рис. 1.17,б показана векторная диаграмма синхронного двигателя в режиме недовозбуждения (ток возбуждения меньше тока возбуждения холостого хода). Здесь ток статора отстает от напряжения сети, и двигатель потребляет из питающей сети реактивную мощность.

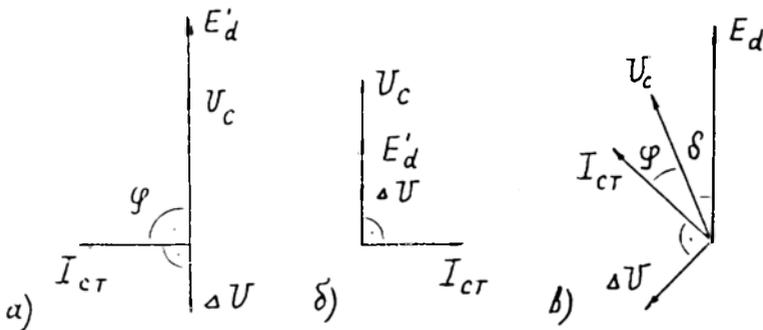


Рис. 1.17

При работе синхронного двигателя с нагрузкой, когда полюсы ротора отстают от полюсов статора на угол δ , вектор э.д.с. E_d отстает от вектора напряжения сети на тот же угол (рис. 1.17,б). Как видно, в этих условиях в зависимости от величины э.д.с. угол φ между током статора и

напряжением сети может изменяться в широких пределах. Соответственно двигатель может работать с различными коэффициентами мощности. В режиме перевозбуждения обеспечивается генерирование реактивной мощности, а в режиме недовозбуждения - ее потребление. Наиболее экономичный режим соответствует коэффициенту мощности 1, при котором электрические потери в двигателе минимальны.

Зависимость тока статора от тока возбуждения при различных нагрузках двигателя отражается семейством *V*-образных характеристик (рис. 1.18), которые дают достаточно полное представление о возможных нормальных режимах работы синхронного двигателя.

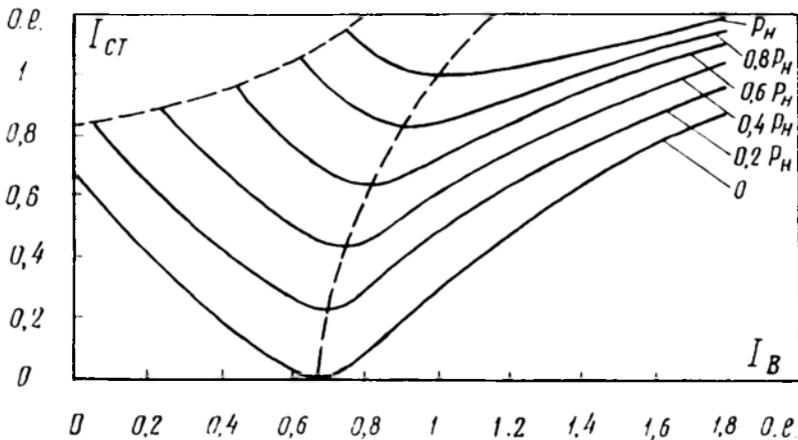


Рис. 1.18

Электромагнитный вращающий момент синхронного двигателя определяется многими параметрами, которые находятся в сложной взаимосвязи, что делает точное математическое описание механических характеристик чрезвычайно громоздким. Для оценки основных свойств синхронных двигателей в синхронном режиме работы вполне достаточно упрощенного описания электромагнитного вращающего момента, в котором учтены только индуктивные сопротивления машины [1]:

$$M_{\text{БР}} = K \frac{E_d U_C}{x_d} \sin \delta,$$

где x_d - синхронное сопротивление двигателя; K - постоянный коэффициент.

Поскольку вращающий момент связан с углом нагрузки синусоидальной зависимостью, устойчивая работа двигателя возможна только при значениях угла нагрузки от 0 до 90 градусов, когда увеличение этого угла приводит к увеличению вращающего момента. При $\delta > 90^\circ$ работа двигателя становится неустойчивой, т.к. увеличение угла нагрузки приводит к снижению вращающего момента. Если тормозной момент окажется больше максимального вращающего момента, то ротор проскальзывает относительно вращающего магнитного поля статора и двигатель выходит из синхронизма.

В синхронном режиме механическая характеристика синхронного двигателя абсолютно жесткая, т.е. скорость вращения ротора остается постоянной независимо от нагрузки на валу двигателя.

Перегрузочная способность синхронных двигателей достаточно высока и, как правило, выше, чем у асинхронных двигателей. Так, отношение максимального вращающего момента, которому соответствует граница устойчивости, к номинальному моменту обычно составляет 2 - 3 и может достигать 4 - 5 у двигателей специального назначения [3].

2. ПРИНЦИП ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАЩИТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

2.1. Требования к системам контроля и защиты электродвигателей

Средства релейной защиты традиционно используются, главным образом, для сохранения в работоспособном состоянии исправной части электрической сети путем быстрого отключения поврежденных элементов этой сети в аварийных ситуациях [6]. Это, безусловно, является важнейшей функцией любой системы релейной защиты.

Основные требования к релейной защите, выполнение которых обязательно при проектировании и эксплуатации, установлены Правилами устройства электроустановок [7] и другими конкретизирующими нормативными документами.

Применительно к электродвигателям необходимо выполнение следующих условий:

1. При внутренних коротких замыканиях (междуфазных, однофазных и витковых) должны действовать соответствующие основные защиты и обеспечивать отключение поврежденного электродвигателя от сети с минимально возможной задержкой.

2. Повреждения, не сопровождающиеся короткими замыканиями, но развитие которых может привести к повреждениям электрооборудования или коротким замыканиям (замыкания на землю в обмотках статора электродвигателей, работающих в сети с изолированной нейтралью, замыкания на землю в цепях возбуждения синхронных машин), должны выявляться специальными защитами, а поврежденный электродвигатель - отключаться от сети.

3. Ненормальные режимы работы электродвигателей (перегрузка, асинхронный ход синхронной машины, неполнофазное питание) должны автоматически ликвидироваться, если они недопустимы для электродвигателя или питающей сети. В случаях, когда не требуется экстренная ликвидация ненормального режима, допускается формирование только

сигнала оповещения, а решение о ликвидации этого режима должно приниматься персоналом.

4. Действия устройств релейной защиты должны быть согласованы с системами технологической защиты и технологической автоматики.

Сегодня, в условиях, когда надежность электроснабжения во многом определяет уязвимость жизнеобеспечения общества, необходимо иметь целостную систему управления электроснабжением. Наиболее предпочтительным следует признать решение, при котором функции управления электрооборудованием в нормальных и экстремальных условиях осуществляются единым многоуровневым управляющим комплексом, использующим наиболее рациональные алгоритмы действия в каждой ситуации.

Нижний уровень управляющего комплекса должны составлять устройства (терминалы) непосредственного управления работой электрооборудования.

Так, для электродвигателей необходим терминал, который обеспечивает: пуск и остановку электродвигателя в нормальных условиях; измерение токов фаз и напряжений в питающей сети; непрерывный контроль важнейших параметров и защиту электродвигателя; регистрацию сигналов для ретроспективного анализа; передачу информации о работе и состоянии электродвигателя на верхний уровень управления.

При комплексном подходе к выполнению средств управления электродвигателями требования к их защитным функциям должны быть повышены. В частности, необходимо, чтобы повреждения отключаемых в аварийных ситуациях машин были минимальными и имелась возможность их восстановления без применения трудоемких и дорогих технологий. Это позволяет снизить ремонтно-эксплуатационные расходы и, следовательно, реально повысить эффективность действия защит.

2.2. Алгоритмы действия средств контроля и защиты электродвигателей

Алгоритм - это предписание, устанавливающее процедуру определения искомой величины по известным исходным данным.

Исходными данными (входными величинами) для средств контроля и защиты, как правило, служат токи и напряжения. Эти величины наиболее чувствительны к возмущающим воздействиям, обусловленным внутренними повреждениями и изменениями режимов работы, и удобны для обработки. Поэтому большинство методов защиты основано на контроле токов и напряжений.

Алгоритмы выявления повреждений и ненормальных режимов работы защищаемого объекта и имеющаяся элементная база для их реализации безусловно взаимосвязаны. Так, основу традиционных систем релейной защиты составляют электромеханические реле. Эти реле развивались исторически параллельно с электромеханическими измерительными механизмами измерительных приборов на базе общей теории применительно к стационарным входным сигналам. В связи с этим большинство алгоритмов действия электромеханических систем защиты основаны на контроле интегральных (действующих или средних) значений токов и напряжений, и требуют длительного наблюдения за процессами в аварийных ситуациях для принятия правильного решения о состоянии защищаемого объекта.

Для сравнительного анализа алгоритмов действия защит можно использовать общепринятые показатели технического совершенства средств релейной защиты: быстродействие, селективность (избирательность), чувствительность и надежность работы [6].

Быстрота действия имеет важное значение для защиты от коротких замыканий. Чем быстрее происходит обнаружение и отключение поврежденного объекта, тем меньше его разрушения, и тем легче сохранить нормальное питание других исправных потребителей. Мерой быстро-

действия служит время срабатывания защиты, т.е. промежуток времени от момента возникновения повреждения до момента срабатывания защиты.

Селективностью или избирательностью действия защиты принято называть способность отключать при коротких замыканиях только поврежденный объект и не срабатывать при повреждениях вне защищаемого объекта.

Под чувствительностью защиты понимается ее способность реагировать на самые малые изменения контролируемых параметров. В качестве показателя чувствительности защит используется коэффициент чувствительности. Для защит, реагирующих на токи короткого замыкания, он определяется как отношение минимального тока короткого замыкания при повреждении в защищаемом объекте к току срабатывания защиты.

Надежностью защиты принято называть свойство, включающее в себя оценку правильности и безотказности действия во всех предусмотренных ее назначением случаях.

2.2.1. Алгоритмы действия защит от внутренних коротких замыканий

Токи при междуфазных (трехфазных и двухфазных) коротких замыканиях в обмотках электродвигателей, как правило, очень велики. Даже незначительная задержка отключения может привести к неправомерному разрушению электродвигателя и создать недопустимое возмущение для питающей сети. Поэтому в защитах от коротких замыканий используются быстродействующие алгоритмы.

Первый, наиболее простой и распространенный алгоритм предполагает сравнение текущих или средних значений токов фаз статора с уставкой (расчетным значением тока срабатывания). Продолжительность интервала усреднения при определении интегральных значений токов должна составлять 1 - 2 периода контролируемого сигнала.

Условие срабатывания защиты:

$$I_x > I_y \text{ или } I_{\text{ксп}} > I_{\text{устр}},$$

где I_k и I_y - действующие значения токов короткого замыкания и уставки; $I_{к\text{ср}}$ и $I_{y\text{ср}}$ - средневыпрямленные значения этих токов .

При превышении контролируемыми токами допустимых уровней формируются сигналы управления коммутационными аппаратами и сигнализацией.

Такую защиту принято называть токовой отсечкой. Контроль токов фаз можно осуществлять путем предварительного выбора фазы с максимальным током и дальнейшего сравнения этого тока с уставкой или параллельным (последовательным) сравнением токов всех фаз с уставкой. Это дает возможность не только выявлять внутренние короткие замыкания, но и определять вид замыкания (однофазное, двухфазное, трехфазное) и поврежденные фазы.

Для обеспечения селективного действия отсечки ее ток срабатывания (ток уставки) должен быть больше максимального тока рабочего режима, т.е. режима пуска.

На крупных электродвигателях, мощность которых соизмерима с мощностью питающего трансформатора, токовая отсечка часто оказывается недостаточно чувствительной и, следовательно, не обеспечивает полноценной защиты. Так, при коротких замыканиях, удаленных от фазных выводов обмоток, отсечка срабатывает лишь после того, как в результате выгорания изоляции место повреждения приблизится к выводам обмоток и ток короткого замыкания превысит уставку.

Второй, более совершенный дифференциальный принцип используется для защиты от коротких замыканий в случаях, когда применение токовой отсечки недопустимо.

Алгоритм действия дифференциальной защиты основан на пофазном сравнении мгновенных значений токов в начале и в конце обмотки. С этой целью со стороны питания и со стороны нулевых выводов обмотки статора устанавливаются трансформаторы тока (ТТ). Вторичные обмотки ТТ одной фазы соединяются последовательно разноименными выводами. Параллельно вторичным обмоткам ТТ подключается нагрузка, представ-

ляющая собой измерительное реле или промежуточный преобразователь тока. На рис. 2.1 показана схема соединений ТТ одной фазы продольной дифференциальной защиты.

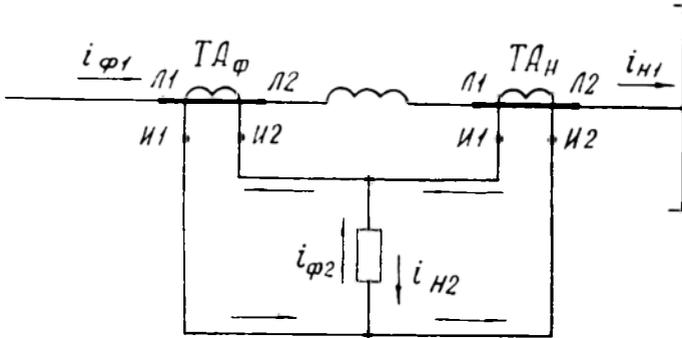


Рис. 2.1

В нормальном режиме через первичные обмотки ТТ, установленные у фазных и нулевых выводов (соответственно ТА_Ф и ТА_Н), протекают одинаковые токи ($i_{\phi 1}$ и $i_{н 1}$). Поэтому мгновенные значения вторичных токов трансформаторов равны между собой: $i_{\phi 2} = i_{н 2}$. Их направления в нагрузке $Z_{н}$ противоположны и они взаимно компенсируются. Практически вторичные токи обеих ТТ циркулируют лишь по соединительным проводам, а по нагрузке протекает только ток небаланса, обусловленный погрешностями ТТ.

При коротком замыкании в обмотке статора ток короткого замыкания не проходит через ТТ ТА_Н. Следовательно, баланс токов в нагрузке нарушается и защита срабатывает.

Ток срабатывания дифференциальной защиты выбирается из условия отстройки от максимального тока небаланса, который может протекать по нагрузке трансформаторов тока $Z_{н}$ в нормальном режиме.

На дифференциальном принципе основан алгоритм защиты от наиболее трудновыделяемого вида короткого замыкания - виткового замыкания в обмотке статора. Он может быть реализован только для машин, обмотки статора которых состоят из двух параллельных ветвей с отдельными выводами со стороны нейтрали.

Защита, которую принято называть поперечной дифференциальной, контролирует интегральное значение тока, представляющего собой разность суммарных токов трех фаз в параллельных ветвях обмотки. Для этого обмотки каждой ветви соединяются в звезду отдельно, а сформированные таким образом две нейтрали объединяются в общую нейтраль специальной перемычкой для прохождения контролируемого тока (рис. 2.2). Измерение этого тока производится с помощью трансформатора тока ТАп.

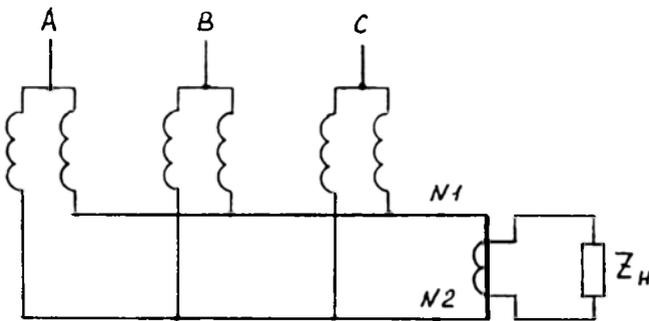


Рис. 2.2

В нормальных условиях мгновенные значения токов в параллельных ветвях каждой фазы равны. При равных сопротивлениях ветвей нейтральные точки N1 и N2 имеют равные потенциалы, и, следовательно, ток в соединяющей их перемычке равен нулю.

В случае замыкания накоротко части витков одной из параллельных ветвей сопротивления этой ветви уменьшается. Вследствие этого баланс токов параллельных ветвей нарушается, и в перемычке N1 - N2 возникает уравнительный ток. Этот ток измеряется, определяется его интегральное значение, которое сравнивается с установкой, и, если оно превышает допустимый уровень, то формируется сигнал на отключение электродвигателя от питающей сети.

2.2.2. Алгоритмы действия защит от однофазных замыканий на землю в обмотках статора

Однофазные замыкания на землю в обмотках статора электродвигателей, работающих в сети с глухозаземленной нейтралью (0,4 кВ), характеризуются большим током и представляют собой внутренние однофазные короткие замыкания. Они выявляются токовыми защитами от коротких замыканий, чувствительность которых должна быть достаточной для срабатывания при этих коротких замыканиях.

Наиболее распространенный алгоритм действия защит от однофазных замыканий на землю в обмотках статора электродвигателя, работающего в сети с изолированной нейтралью, основан на контроле интегральных значений тока нулевой последовательности [8].

Основой этих защит является фильтр токов нулевой последовательности. Он может быть выполнен в виде трансформатора тока с замкнутым ферромагнитным сердечником, на котором размещена вторичная обмотка, а первичной обмоткой служит трехфазный кабель, который охватывается сердечником трансформатора (рис. 2.3,а). Эти трансформаторы принято называть трансформаторами тока нулевой последовательности (ТНП).

Магнитный поток в сердечнике ТНП создается токами, протекающими по проводникам кабеля, а следовательно, по обмотке статора электродвигателя. В нормальных режимах и при повреждениях, не связанных с замыканиями на землю, сумма токов, протекающих по проводникам кабеля, равна нулю. Поэтому магнитный поток, э.д.с. вторичной обмотки ТНП и ток в нагрузке ТНП также равны нулю.

При появлении цепи утечки на землю в замещаемой зоне баланс токов, протекающих по проводникам кабеля, нарушается, т.е. часть тока поврежденной фазы протекает по земле, минуя ТНП. В результате появляется ток нулевой последовательности i_{10} (рис. 2.3,б), в сердечнике ТНП возникает магнитный поток, во вторичной обмотке ТНП создается э.д.с. , под действием которой по нагрузке Z_{11} протекает ток i_{20} .

Вторичный ток ТНП обрабатывается, определяется его действующее (среднее) значение, которое сравнивается с уставкой. Если это интегральное значение тока превышает уставку, то формируется сигнал на отключение электродвигателя от сети.

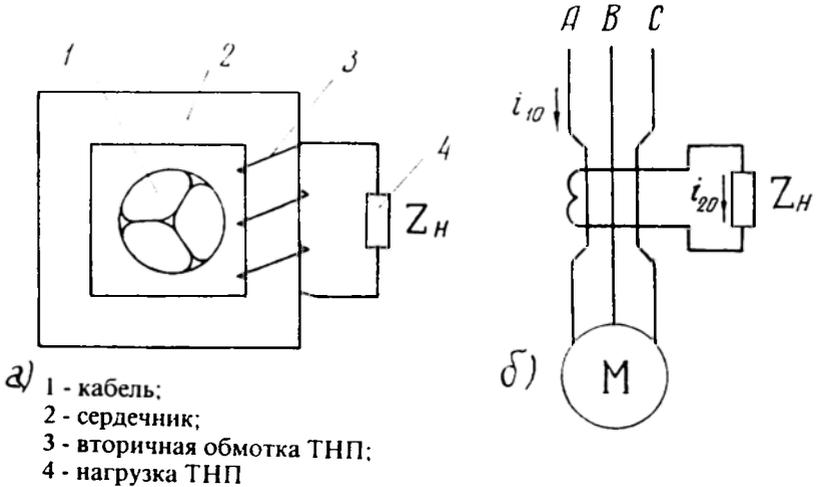


Рис. 2.3

Следует отметить, что если электродвигатель питается по нескольким параллельно соединенным кабелям, то на каждом из них необходимо установить ТНП, а вторичные токи всех ТНП суммировать.

Для двигателей, работающих в блоке с трансформатором, может быть рекомендован новый высокоэффективный способ контроля изоляции цепей статора и защиты от замыканий на землю без зоны нечувствительности.

Суть метода состоит в следующем. В цепи статора электродвигателя выбирают фазу с наибольшим по абсолютному значению напряжением относительно земли и в ней измеряют ток утечки. Таким образом, на текущем интервале времени, соответствующем периоду промышленной частоты, измеряются токи утечки отдельно во всех фазах и сравниваются между собой. По их соотношениям определяется поврежденная фаза или фаза с дефектом изоляции. Кроме того, определяются фазные напряжения и

вычисляются их отношения к соответствующим токам утечки. По этим отношениям определяется общее эквивалентное сопротивление сети относительно земли.

На рис. 2.4 показана структурная схема устройства, реализующего данный метод контроля. Коммутатор, три входа которого подключены к трем фазам защищаемой сети, обеспечивающий выбор контролируемой фазы и блок измерения тока утечки входят в состав модуля высокого напряжения. Датчиком фазных напряжений служит трансформатор напряжения (ТН) с обмотками, соединенными по схеме "звезда-звезда". Входы блока определения сопротивления изоляции соединены со вторичными обмотками ТН и выходом блока измерения тока утечки. Взаимосвязанные блоки определения места повреждения и сравнения сигналов с уставкой подключены входами к соответствующим выходам модуля высокого напряжения и блока определения сопротивления изоляции. Их назначение - формирование информационных и управляющих входных сигналов устройства.

На входы коммутатора подается трехфазное напряжение сети относительно земли. Коммутатор выбирает и подключает фазу с наибольшим напряжением относительно земли ко входу блока измерения тока утечки, где этот ток измеряется и информация о нем передается в блок определения сопротивления изоляции, а также - в блок определения места повреждения.

Следует отметить, что для работы устройства необходимо, чтобы контролируемая сеть не имела других искусственно созданных путей утечки тока на землю, кроме цепей, образуемых коммутатором.

В блоке определения места повреждения токи утечки разных фаз сравниваются между собой на текущем интервале времени, соответствующем периоду э.д.с. сети, и выявляется поврежденная фаза. В соответствующем вычислительном блоке определяется общее эквивалентное сопротивление защищаемой сети относительно земли и вычисляется сопротивление изоляции. Это сопротивление сравнивается с допустимым

значением, и если оно оказывается меньше допустимого, то исполнительным блоком формируются информационные сигналы о месте повреждения и управляющий сигнал для принятия решения о допустимости дальнейшей работы защищаемого электродвигателя.

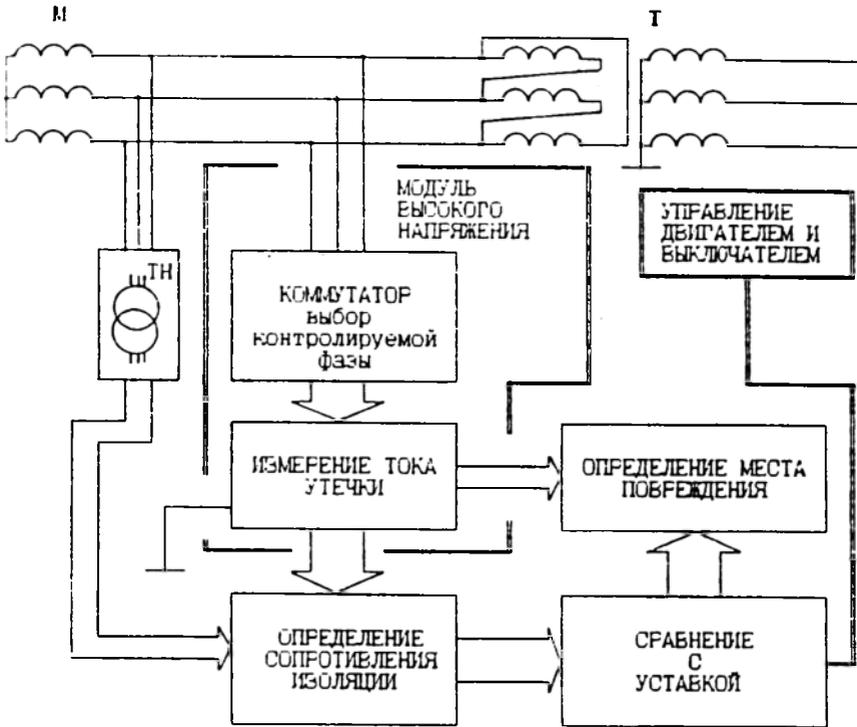


Рис. 2.4

Для оценки эффективности метода можно провести анализ его основных метрологических свойств и эксплуатационных характеристик.

Во-первых, метод обеспечивает равную чувствительность к повреждениям изоляции в любой точке контролируемой сети.

Так, при замыкании на землю в нейтрали электродвигателя и симметричном синусоидальном напряжении на его выводах, среднее за период значение тока утечки, протекающего через коммутатор, можно определить следующим образом:

$$I_{\text{УТН}} = \frac{U_{\text{СРН}}}{R_{\text{Э}}} = \frac{3}{2\pi R_{\text{Э}}} \int_{-\pi/3}^{+\pi/3} U_m \cos \omega t dt = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi R_{\text{Э}}} U_m.$$

Здесь $R_{\text{Э}}$ - эквивалентное сопротивление контура утечки тока на землю; $U_{\text{СРН}}$ - среднее значение падения напряжения на эквивалентном сопротивлении $R_{\text{Э}}$; U_m и ω - амплитуда фазного напряжения и угловая частота напряжения сети.

При замыкании фазы на землю это среднее значение тока равно:

$$I_{\text{УТВ}} = \frac{1}{\pi R_{\text{Э}}} \int_0^{+2\pi/3} U_m \sin \omega t dt = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi R_{\text{Э}}} U_m.$$

Как видно, среднее за период значение тока утечки не зависит от места повреждения и определяется э.д.с. сети и эквивалентным сопротивлением контролируемой цепи относительно земли.

Во-вторых, метод позволяет контролировать с приемлемой для целей релейной защиты точностью большие, по сравнению с другими известными методами, сопротивления изоляции сети относительно земли [8, 9]. В сети 10 кВ при современной широкодоступной элементной базе для реализации можно контролировать сопротивление изоляции до 45-50 МОм. Предельные возможности ограничиваются здесь минимально допустимым током переключения полупроводниковых вентилях в коммутаторе.

Высокие метрологические показатели метода обусловлены использованием рабочего напряжения сети для определения сопротивления изоляции, которое в реальных условиях определено выше напряжения специальных источников, применяемых в известных методах [8, 9].

Применение рассмотренного метода требует изменения общепринятой схемы включения ТН. Так, необходимо отсоединение нейтрали первичных обмоток ТН от земли, чтобы исключить утечки на землю. Это влечет за собой вывод из работы традиционной защиты от однофазных замыканий на землю по напряжению нулевой последовательности, необходимость в которой с внедрением в работу нового устройства исчезает.

Вместе с тем, изменение схемы включения ТН существенно улучшает условия работы этого ТН. Действительно, при однофазном замыкании на землю и традиционной схеме включения ТН к двум фазным первичным

обмоткам трансформатора прикладываются линейные напряжения, что, как правило, вызывает повышение тока намагничивания и насыщение магнитопровода.

В этом случае неизбежно создаются благоприятные условия для возникновения субгармонических феррорезонансных колебаний в контурах, образованных нелинейными индуктивностями ТН и емкостями фаз относительно земли, которые часто являются причинами повреждения ТН [10].

Таким образом, использование ТН без заземления нейтрали первичной обмотки снижает вероятность выхода из строя ТН при однофазных замыканиях.

2.2.3. Алгоритмы действия защит от перегрузки

Защиты от перегрузки электродвигателя используются с целью предотвращения недопустимого нагрева элементов электродвигателя (прежде всего изоляции обмоток).

Контроль теплового состояния защищаемого электродвигателя можно осуществлять прямыми и косвенными методами.

Первые из них предполагают установку датчиков температуры в обмотках статора, которые преобразуют температуру в электрическую величину. Эта величина сравнивается с уставкой, и, в случае повышения ее до недопустимого уровня, формируется соответствующий сигнал.

Методы прямого контроля температуры используются в защитах электродвигателей с номинальным напряжением до 1000 В. Для электродвигателей с более высоким номинальным напряжением эти методы, как правило, не применяются из-за недостаточной точности и высокой инерционности контроля, обусловленных необходимостью обеспечения надежной электрической изоляции датчиков от обмоток.

Традиционно в устройствах защиты от перегрузки используются косвенные методы контроля температуры, основанные на физическом и математическом моделировании процессов нагрева электрических машин.

Хорошо известен алгоритм действия теплового реле. Основа этого реле - тепловой аналог защищаемого объекта, на вход которого подается сигнал, пропорциональный току статора. Путем физического моделирования процессов нагрева и охлаждения с помощью теплового аналога определяется температура электродвигателя. Полученное таким образом значение температуры сравнивается с установленным допустимым значением, и, в случае превышения им допустимого уровня, формируется сигнал на отключение или разгрузку машины.

Точность моделирования процессов нагрева и охлаждения двигателя этим тепловым аналогом очень низка, т.к. многие критерии подобия электромеханической модели нагрева и защищаемого объекта реализовать очень трудно, а некоторые - невозможно. Поэтому тепловые реле пригодны для выявления только грубых отклонений состояния защищаемого объекта от нормального, причем тех, которые сопровождаются значительным повышением тока.

Более совершенный алгоритм защиты от перегрузки на основе уравнения теплового баланса (см. п. 1.4) позволяет определять допустимое время работы защищаемого электродвигателя при различных перегрузках с приемлемой точностью.

Для этого находится решение уравнения теплового баланса относительно допустимого времени перегрузки ($t_{\text{доп}}$).

При условии, что до возникновения перегрузки двигатель работал в установившемся режиме, и приняв этот режим как предельно допустимый, предельная продолжительность работы двигателя с перегрузкой определяется так:

$$t_{\text{доп}} = \frac{A}{K_i^2 - 1},$$

где A - постоянная величина, которая зависит от конструкции и условий охлаждения машины; $K_i = I / I_{\text{ном}}$ - кратность тока статора при перегрузке по отношению к номинальному значению.

Применительно к электродвигателям с косвенным воздушным охлаждением обмоток, для которых ГОСТ 183-74 регламентирует одну

точку перегрузочной характеристики (при $K_f = 1,5$; $t_{\text{доп}} = 120$ с), постоянная $A = 150$.

Алгоритм действия защиты, использующий приведенную формулу, предполагает выполнение следующих операций.

Во-первых, определяется факт возникновения перегрузки. Для этого действующее значение тока статора I сравнивается с действующим значением номинального тока $I_{\text{ном}}$. Если оно меньше номинального, то время работы защищаемого электродвигателя не ограничено ($t_{\text{доп}} \rightarrow \infty$). Если контролируемый ток превышает номинальный, то в соответствии с приведенной выше формулой, определяется допустимая продолжительность работы электродвигателя.

Во-вторых, производится отсчет допустимого времени работы электродвигателя, начиная с момента возникновения перегрузки и контролируется факт существования перегрузки.

В-третьих, при исчезновении перегрузки отсчет допустимого времени работы прекращается, и защита возвращается в исходное состояние. Если лимит времени исчерпан при наличии перегрузки, то формируются соответствующие сигналы оповещения и управления защищаемым электродвигателем.

Другой алгоритм, в котором в качестве модели используется уравнение теплового баланса, позволяет выполнить защиту от перегрузки наиболее эффективно [11].

Записав это уравнение (см. п. 1.4) относительно производной превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды, будем иметь:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{I^2 r}{cG} - \frac{\alpha F}{cG} T.$$

Для решения можно воспользоваться методом понижения порядка дифференциального уравнения. Согласно этому методу, превышение температуры T для текущего режима будем иметь в результате интегрирования слагаемых правой части уравнения, с учетом соответствующих масштабных коэффициентов.

Входными величинами для модели служат ток статора и температура окружающей среды. Кроме того, в модель необходимо ввести два значения постоянной времени нагрева защищаемого электродвигателя, соответствующих режимам с вращающимся и неподвижным ротором.

Решение о допустимости текущего режима работы принимается по результатам сравнения текущего значения превышения температуры обмотки (или абсолютного значения) с предельно допустимым значением. Если превышение температуры, вычисленное с помощью модели, ниже допустимого, то режим может продолжаться, а если оно превысит уставку, то формируются соответствующие сигналы и этот режим прекращается.

Согласно правилам технической эксплуатации, защита от перегрузки не должна допускать повторные пуски двигателя после напряженного режима до тех пор, пока температура обмотки не снизится до определенного уровня. Поэтому при реализации рассматриваемого алгоритма целесообразно осуществлять непрерывное интегрирование исходного уравнения с изменением постоянной времени после отключения электродвигателя.

2.2.4. Алгоритмы действия защит от асинхронного хода

Асинхронный режим возбужденного синхронного двигателя должен ликвидироваться с минимальной задержкой, т.к. он сопровождается опасными значительными пульсирующими токами в обмотках и недопустимыми колебаниями вращающего момента.

Наиболее просто защита от асинхронного хода выполняется с помощью максимальной токовой защиты (МТЗ), контролирующей действующее значение тока статора. Поскольку эта МТЗ должна надежно срабатывать при пульсациях тока с частотой, не превышающей несколько единиц Гц, то она должна быть достаточно инерционной и реагировать на усредненное значение тока статора.

Менее инерционная и более чувствительная защита может быть построена с использованием контроля фазы тока относительно напряжения на зажимах. При поворотах ротора относительно вращающегося магнитного поля меняется фаза тока, а следовательно, - направление мощности и полное сопротивление электродвигателя. Контроль любого из этих параметров с помощью соответствующего реле позволяет выявить недопустимый асинхронный режим.

Кроме того, асинхронный режим может быть выявлен по наличию переменной составляющей в токе ротора. С этой целью в цепь возбуждения двигателя включается специальный трансформатор тока, обеспечивающий фильтрацию переменной составляющей тока возбуждения. Защита контролирует интегральное значение этой составляющей, и в случае превышения допустимого уровня вырабатывает соответствующие сигналы.

Следует иметь в виду, что переменная составляющая в токе ротора может появляться при ударной нагрузке электродвигателя. Поэтому защита должна иметь выдержку времени срабатывания, обеспечивающую отстройку от этих нормальных синхронных режимов.

2.2.5. Выявление дефектов в механической части асинхронных электродвигателей

Изложенные в п.1.6 результаты анализа тока статора асинхронного электродвигателя при механических возмущающих воздействиях дают основание полагать, что дефекты в механической части электродвигателя (в подшипниковых узлах, узлах стыковки валов двигателя и приводимого им механизма) можно выявить по току статора [12].

Для этого путем частотной фильтрации из тока статора выделяются составляющие, частота которых не равна и не кратна частоте источника питания. Определяется интегральное (среднее) значение этих составляющих, которое сравнивается с уставкой.

В нормальных режимах работы при исправной механической части электродвигателя ток статора представляет собой функцию, близкую к синусоидальной, с частотой, равной частоте источника питания. Поэтому среднее значение составляющих тока с частотами, отличными от частоты источника питания, близко к нулю.

При повреждении подшипника или нарушении центровки валов двигателя и приводимого им механизма круговая симметрия ротора двигателя нарушается, и в токе статора появляются составляющие с частотами, не равными и не кратными частоте источника питания. Если среднее значение этих составляющих превысит уставку, то формируется сигнал, информирующий о возникновении механического дефекта в защищаемом объекте.

3. ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАЩИТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

3.1. Основные защиты, реализуемые на электромеханической элементной базе

3.1.1. Защита от междуфазных коротких замыканий

Токи при междуфазных (трехфазных и двухфазных) коротких замыканиях в обмотках электродвигателей, как правило, очень велики, поэтому даже незначительная задержка отключения может привести к непоправимому разрушению электродвигателя и создать недопустимое возмущение для питающей сети.

Защита электродвигателей мощностью до 5000 кВт от междуфазных коротких замыканий осуществляется токовой отсечкой без выдержки времени. Она отстраивается от максимального пускового тока защищаемого электродвигателя I_n . Первичный ток срабатывания отсечки определяется так:

$$I_{ca} = k_n I_n,$$

где k_n - коэффициент надежности, обеспечивающий некоторое заглубление защиты с целью предотвращения ложных срабатываний от бросков тока намагничивания при включении электродвигателя.

При реализации отсечки на электромеханических реле этот коэффициент принимают равным 1,8 (для реле РТ-40) или равным 2 (для реле серий РТ-80, РТ-90 и реле прямого действия).

Для электродвигателей мощностью от 2000 кВт до 5000 кВт отсечка выполняется по двухфазной двухрелейной схеме (рис. 3.1) с соединением вторичных обмоток трансформаторов тока ТА1, ТА2 и обмоток реле КА1, КА2 в "неполную звезду".

Ток срабатывания реле вычисляется следующим образом:

$$I_{cp} = \frac{k_n k_{cx}}{n_T} I_p, \text{ или } I_{cp} = \frac{k_{cx}}{n_T} I_{ca},$$

где k_{cx} - коэффициент схемы, с помощью которого учитывается во сколько раз ток в реле превышает вторичный ток трансформатора тока при трех-

фазном симметричном режиме; n_T - коэффициент трансформации трансформаторов тока.

Для данной схемы $k_{cx} = 1$, так как ток реле равен вторичному току ТТ.

Чувствительность защиты оценивается с помощью коэффициента чувствительности, который здесь принимается равным отношению тока двухфазного короткого замыкания на выводах обмотки статора в минимальном режиме работы сети $I_{к\ мин}^{(2)}$ к току срабатывания защиты:

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{к\ мин}^{(2)}}{I_{\text{сз}}}$$

Отсечку принято считать достаточно эффективной, если $k_{\text{ч}} > 2$.

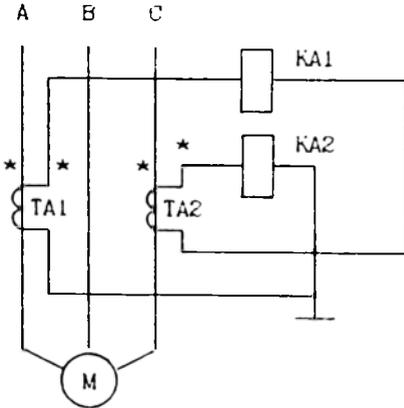


Рис. 3.1

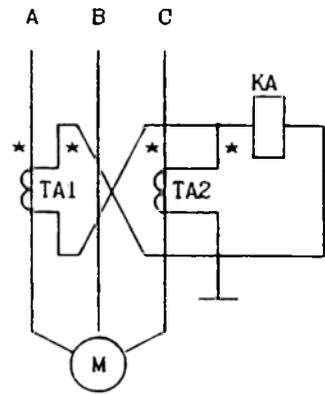


Рис 3.2

Для электродвигателей мощностью до 2000 кВт используется наиболее дешевый и простой вариант токовой отсечки - с включением одного реле на разность токов двух фаз (рис. 3.2). Здесь $k_{cx} = \sqrt{3}$, поэтому при всех прочих равных условиях расчетный ток срабатывания выше, чем в предыдущем варианте. Однако при коротких замыканиях между фазами А и В или В и С по катушке реле протекает вторичный ток только одного ТТ. Следовательно, чувствительность этой отсечки, оцениваемая по максимальному току двухфазного короткого замыкания, ниже предыдущей и

зависит от того, какие фазы повреждены. Эти недостатки иногда вынуждают отдавать предпочтение двухфазному двухрелейному варианту для двигателей мощностью меньше 2000 кВт.

Более совершенный метод защиты - дифференциальный, необходимо использовать для крупных электродвигателей, мощностью более 5000 кВт, и электродвигателей меньшей мощности, когда чувствительность токовой отсечки недостаточна [7].

Для двигателей, работающих в сети с изолированной нейтралью, обычно применяется двухфазная дифференциальная защита (рис. 3.3).

В нормальных эксплуатационных режимах должно выполняться условие:

$$I_{нб} < I_{ср},$$

где $I_{нб}$ - ток небаланса, протекающий по катушке реле в нормальном режиме, обусловленный погрешностями ТТ; $I_{ср}$ - ток срабатывания реле в дифференциальной защите.

Ток срабатывания реле дифференциальной защиты определяется так:

$$I_{ср} = k_{н} I_{нбм},$$

где $k_{н}$ - коэффициент надежности, который принимается равным 1,5 - 2; $I_{нбм}$ - ток небаланса при максимальном токе статора неповрежденного электродвигателя, которым обычно является пусковой ток.

Поскольку при правильном выборе ТТ и соединительных проводов дифференциальной защиты погрешность ТТ не превышает 10 % [6], то максимальный ток небаланса можно определить так:

$$I_{нбм} = \frac{0,1 k_p k_{ном}}{n_T}$$

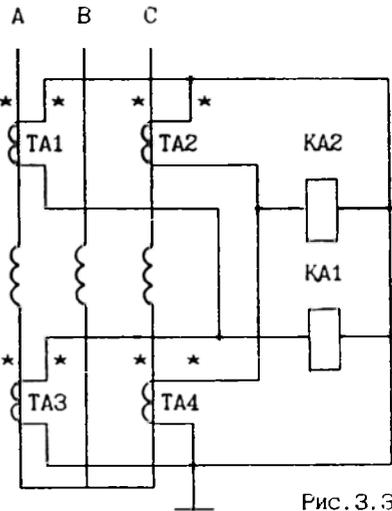


Рис. 3.3

где $k_{п}$ - кратность пускового тока двигателя; $I_{ном}$ - номинальный ток двигателя.

Первичный ток в переходных режимах при пуске и при восстановлении напряжения после отключения внешних коротких замыканий может содержать аperiodические (затухающие) составляющие. Эти составляющие преобразуются ТТ со значительными различающимися искажениями, что вызывает кратковременное увеличение тока небаланса. Увеличение тока небаланса от аperiodической составляющей учитывается специальным коэффициентом k_a , который принимается равным 2, если в дифференциальной защите используются обычные токовые реле, и равным 1, если специальные реле серий РНТ или ДЗТ с промежуточными насыщающимися трансформаторами тока, не срабатывающие от аperiodической составляющей тока.

Учитывая это, для максимального тока небаланса можно записать:

$$I_{нбм} = \frac{0,1 k_{одн} k_{п} k_a I_{ном}}{n_T},$$

где $k_{одн}$ - коэффициент однотипности ТТ (принимается равным 0,5, если в обоих плечах дифференциальной защиты используются ТТ одного типа с равными коэффициентами трансформации; в других случаях - принимается равным 1).

Тогда ток срабатывания реле дифференциальной защиты можно определить так:

$$I_{ср} = \frac{0,1 k_{п} k_a k_{одн} k_{п} I_{ном}}{n_T}.$$

Соответственно первичный ток срабатывания дифференциальной защиты равен:

$$I_{са} = 0,1 k_{п} k_a k_{одн} k_{п} I_{ном}.$$

Например, дифференциальная защита электродвигателя с кратностью пускового тока $k_{п} = 5$, выполненная на обычных токовых реле и однотипных ТТ при $k_{п} = 1,5$, можно иметь первичный ток срабатывания:

$$I_{са} = 0,1 \times 1,5 \times 2 \times 0,5 \times 5 \times I_{ном} = 0,75 I_{ном}.$$

Как правило, это значение удовлетворяет требованиям чувствительности.

Применение специализированных реле серий РНТ и ДЗТ для дорогих и ответственных электродвигателей позволяет снизить ток срабатывания защиты до $0,4 I_{ном}$ за счет снижения коэффициента k_a до 1.

3.1.2. Защита от однофазных замыканий на землю в обмотках статора

Защиты электродвигателей от однофазных замыканий на землю в обмотках статора, реагирующие на действующее значение тока нулевой последовательности, получили наибольшее распространение.

Нормативные документы рекомендуют выполнять их на базе ТНП и реле тока повышенной чувствительности [7].

На рис. 3.4 показана схема измерительной части защиты с кабельным ТНП.

При внешних однофазных замыканиях на землю через ТНП протекает небольшой собственный емкостный ток защищаемого электродвигателя. Этот ток может вызвать ложное действие защиты, поэтому его необходимо учитывать при выборе уставки. Действующее значение собственного тока однофазного замыкания на землю I_c или емкость обмоток статора приводятся в паспорте электродвигателя.

Следует учесть еще и то, что переходные режимы и перемежающиеся замыкания в сети сопровождаются бросками собственного емкостного тока защищаемого присоединения, уровень которых может превышать паспортное значение в 3 - 4 раза.

Тогда первичный ток срабатывания защиты будет определяться по следующему условию:

$$I_{са} = k_n k_b I_c.$$

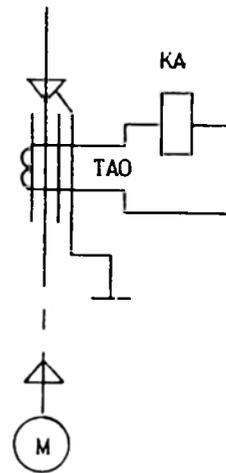


Рис. 3.4

где k_n - коэффициент надежности (принимается равным 1,2 - 1,3); k_6 - коэффициент, учитывающий возможность возникновения броска емкостного тока.

Для быстродействующих защит k_6 принимается равным 3 - 4, а для защит с выдержкой времени при срабатывании - 1,5 - 2.

Емкостный ток защищаемого присоединения определяется как сумма собственного емкостного тока электродвигателя $I_{сд}$ и емкостного тока кабельной линии, по которой питается электродвигатель (если она входит в зону действия защиты):

$$I_c = I_{сд} + I_{ск}$$

Собственный емкостный ток электродвигателя можно определить так:

$$I_{сд} = 6 \pi f C_d U_{ном} / \sqrt{3},$$

где f и $U_{ном}$ - номинальные частота (Гц) и напряжение (В) сети; C_d - емкость одной фазы статора электродвигателя относительно земли (Ф).

Собственный емкостный ток кабельной линии определяется по его удельному значению $I_{ско}$ на 1 км длины:

$$I_{ск} = I_{ско} l n,$$

где l - длина линии, входящей в зону действия защиты; n - число параллельных кабелей в линии.

Значения емкостей обмоток некоторых электродвигателей приведены в таблице 3.1, а удельные значения емкостных токов кабелей - в таблице 3.2 [9, 13].

Таблица 3.1

Тип электродвигателя	Номинальная мощность, кВт	Емкость обмотки статора относительно земли, мкФ	
		Для сети 6 кВ	Для сети 10 кВ
СТД-5000-2	5000	0,11	0,085
СТД-6300-2	6300	0,11	0,11
СТД-8000-2	8000	0,17	0,11
СДТ-10000-2	10000	0,17	0,15
СТД-12500-2	12500	0,22	0,15

В таблице 3.3 приведены основные параметры токовых защит с однофазных замыканий на землю на базе ТНП с неразъемными (ТЗЛ ТЗЛМ) и разъемными (ТЗРЛ) сердечниками, предназначенными для установки на один кабель диаметром до 75 мм [8, 9].

Токовую защиту от однофазных замыканий на землю в обмотка статора принято считать достаточно эффективной (чувствительной), если выполняется условие:

$$I_{cc} - I_c \geq 1,5 I_{ca}.$$

Здесь I_{cc} - суммарный емкостный ток замыкания на землю в сети, которой подключен защищаемый электродвигатель.

В соответствии с требованиями ПУЭ для электродвигателей мощностью до 2000 кВт ток срабатывания должен быть не более 10 А, а для электродвигателей мощностью 2000 кВт и выше - не более 5 А.

Таблица 3.3.

Сечение жил кабеля, м ²	Среднее значение емкостного тока, А/км	
	Для сети 6 кВ	Для сети 10 кВ
16	0,31 / 0,26	0,43
25	0,43 / 0,34	0,56
35	0,49 / 0,38	0,63
50	0,58 / 0,44	0,73
70	0,73 / 0,52	0,87
95	0,89 / 0,61	1,02
120	1 / 0,7	1,16
150	1,19 / 0,78	1,3
185	1,28 / 0,91	1,51
240	1,33 / 1,01	1,8

Примечание. В числителе указаны значения емкостного тока для кабелей с номинальным напряжением 6 кВ, а в знаменателе - с номинальным напряжением 10 кВ.

Если вычисленные значения тока срабатывания окажутся больше 10 А и 5 А в соответствующих случаях, то принимается $k = 1,5 - 2$, определяется новое значение тока срабатывания, и защита выполняется с выдержкой времени 1 - 2 с.

На практике, из соображений повышения эффективности защит, используются единые условия применения защит и на всех двигателях (независимо от мощности) устанавливаются защиты, если ток замыкания превышает 5 А.

Таблица 3.3

Тип ТНП	Тип реле	Уставка реле, мА	Минимальное значение первичного тока срабатывания защиты, А		
			Один ТНП	Два ТНП	
				Соединение вторичных обмоток	
				Последовательное	Параллельное
ТЗЛМ	РТ-40/02	100	8,6	11,6	12,5
	РТЗ-50	30	2,6	3,9	5,2
ТЗРЛ	РТЗ-51	20	0,69	1,25	0,97
	РТ-40/0,2	100	20	25	34
ТЗЛ	РТ-40/0,2	100	7,0	9,0	11,0
	РТЗ-51	20	0,68	1,25	0,97
ТЗЛМ-1	РТЗ-51	20	0,6	1,08	0,69

3.1.3. Защита от перегрузки

Защита от перегрузки устанавливается только на электродвигателях, подверженных технологическим перегрузкам [7]. Поскольку перегрузка - это, как правило, симметричный режим, то защита выполняется однофазной. Преимущественно применяются реле с зависимой от тока выдержкой времени срабатывания.

Защита двигателей небольшой мощности с номинальным напряжением до 1000 В наиболее часто выполняется с помощью тепловых реле или тепловых расцепителей автоматических выключателей.

Согласование характеристики реле (расцепителя) с перегрузочной характеристикой защищаемого электродвигателя производится путем подбора нагревательного элемента по номинальному току:

$$I_{\text{рном}} \geq I_{\text{ном дв.}}$$

где $I_{\text{рном}}$ - номинальный ток нагревательного элемента реле (это наибольшее значение тока, длительное протекание которого не вызывает срабатывания реле); $I_{\text{ном дв.}}$ - номинальный ток защищаемого электродвигателя.

Значение номинального тока указывается на каждом нагревательном элементе. В тепловых реле типа ТРП, ТРН, ТРТ и др. предусмотрена возможность регулировать номинальный ток в диапазоне (0,75 - 1,25) $I_{\text{рном}}$. Реле не срабатывает при токе меньшем и равном номинальному току и должно срабатывать с выдержкой 10 - 20 минут при перегрузке 20 %.

Крупные ответственные электродвигатели с номинальным напряжением выше 1000 В, как правило, оснащаются защитой от перегрузки на индукционном реле серии РТ-80 или РТ-90.

Ток срабатывания защиты от перегрузки выбирается по условию надежного возврата реле при номинальном токе защищаемого электродвигателя:

$$I_{\text{са}} = \frac{k_H I_{\text{ном дв.}}}{k_B},$$

где k_H - коэффициент надежности ($k_H = 1,1 - 1,2$); k_B - коэффициент возврата индукционного элемента реле ($k_B = 0,8 - 0,85$).

Ток срабатывания реле определяется так:

$$I_{\text{ср}} = \frac{k_H k_{\text{сх}} I_{\text{ном дв.}}}{k_B n_T},$$

где $k_{\text{сх}}$ и n_T - коэффициент схемы и коэффициент трансформации ТТ ($k_{\text{сх}} = 1$ при соединении обмоток ТТ в звезду и $k_{\text{сх}} = \sqrt{3}$ - на разность токов двух фаз).

Поскольку уставки реле серий РТ-80 и РТ-90 изменяются дискретно, то установить вычисленное значение тока срабатывания реле удастся не всегда. В этих случаях действительное значение первичного тока срабатывания защиты (I'_{ca}) определяется по значению тока срабатывания реле, которое может быть установлено (I'_{cp}) на реле:

$$I'_{ca} = I'_{cp} n_T / k_{ca}.$$

Минимальное время срабатывания защиты обычно выбирается 12 - 16 секунд с целью предотвращения ложных действий при пуске электродвигателя.

3.1.4. Защита электродвигателей с номинальным напряжением 6 - 10 кВ

Защиты электродвигателей в промышленности и в системах собственных нужд электростанций, как правило, выполняются на основании типовых схем [9], применительно к конкретным машинам с учетом особенностей питания, вида оперативного тока, параметров коммутационных аппаратов и других условий эксплуатации.

На рис. 3.5 в качестве примера приведена схема (с некоторыми упрощениями) защиты, которая часто используется для асинхронных и синхронных машин мощностью менее 2000 кВт.

Защита от междуфазных коротких замыканий осуществляется токовой отсечкой, выполненной по однорелейной схеме на электромагнитном элементе реле РТ-84.

Для защиты от перегрузки и асинхронного режима (для синхронных двигателей) используется МТЗ с зависимой от тока выдержкой времени срабатывания, реализуемая на индукционном элементе реле РТ-84, с действием на отключение.

Защита от однофазных замыканий на землю в обмотках статора выполнена по принципу контроля тока нулевой последовательности с помощью ТНП ТАО и реле максимального тока КАО повышенной чувствительности РТЗ-51.

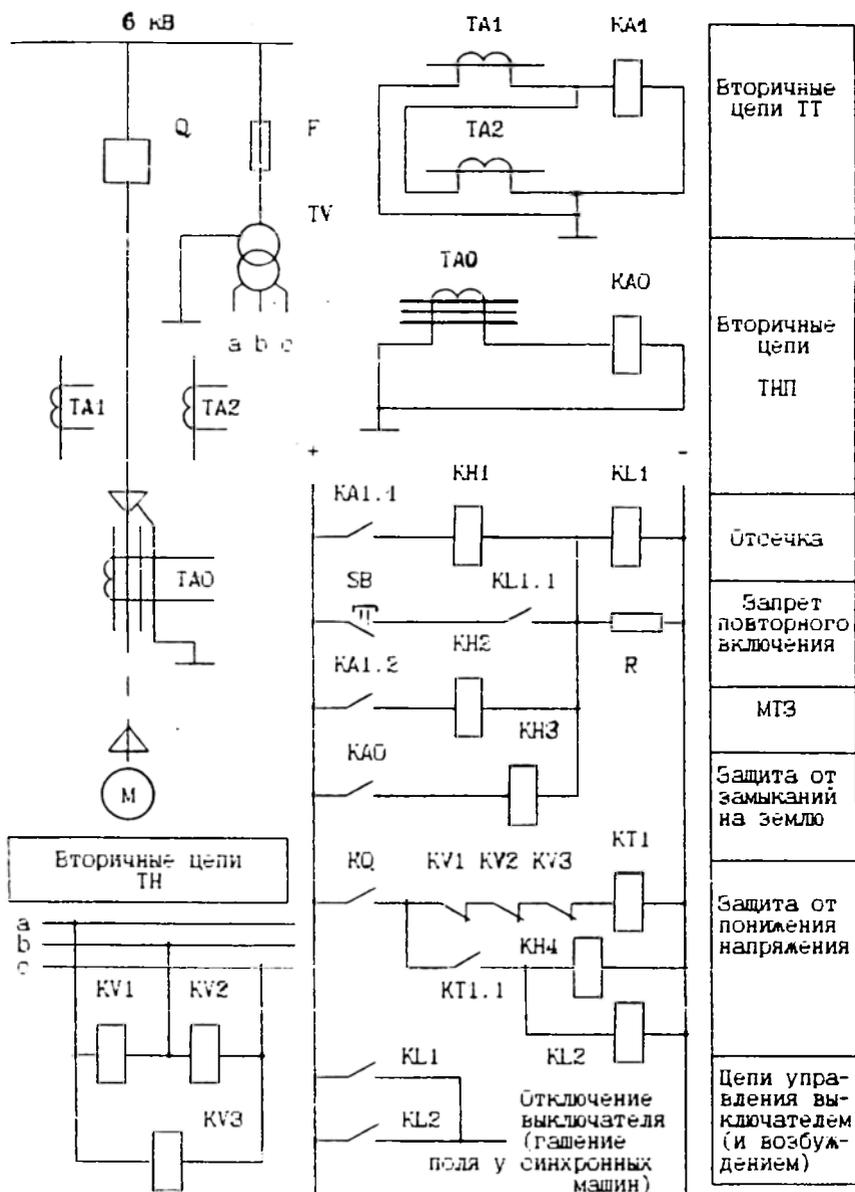


Рис. 3.5

Трансформатор тока нулевой последовательности, как правило, устанавливается в распределительном устройстве, поэтому кабель, по которому питается двигатель, входит в зону действия защиты, и при выборе уставки необходимо учитывать его емкость.

Защита от понижения напряжения выполнена общей на группу двигателей, питающихся от одной секции шин (групповая защита) и действует на отключение неотвечественных двигателей при понижении напряжения до 0,5 - 0,7 номинального с выдержкой времени. Защита контролирует линейные напряжения на секции шин с помощью реле минимального напряжения РН-54.

Срабатывание отдельных защит фиксируется соответствующими указательными реле КН.

В таблице 3.4. приведены основные параметры защит асинхронного электродвигателя с $U_{ном} = 6$ кВ; $P_{ном} = 400$ кВт; $I_{ном} = 48,4$ А; $k_n = 5,1$. Ток однофазного замыкания на землю в питающей сети 11 А; длина кабеля сечением 25 мм² от распределительного устройства до двигателя - 100 м; ток трехфазного короткого замыкания $I^{(3)}_к$ на зажимах электродвигателя - 7000 А; коэффициент трансформации трансформатора тока $n_T = 150/5$.

На рис. 3.6 показана схема, включающая в себя основные элементы защиты синхронного двигателя мощностью менее 5000 кВт, который получает питание по двум кабелям от сети с малыми емкостными токами (сеть с компенсацией емкостного тока).

Токовая отсечка выполнена по двухфазной двухрелейной схеме на реле КА1 и КА2 серии РТ-40.

Защита от перегрузки и от асинхронного режима совмещены и выполнены по принципу МТЗ с независимой от тока выдержкой времени срабатывания (реле КА3 типа РТ-40).

Замыкания на землю в элементах сети, гальванически связанных с шинами 6 - 10 кВ (в том числе и в обмотках статора электродвигателя), выявляются общим устройством сигнализации о замыкании на землю. Решение о возможности работы двигателя при наличии в сети замыкания

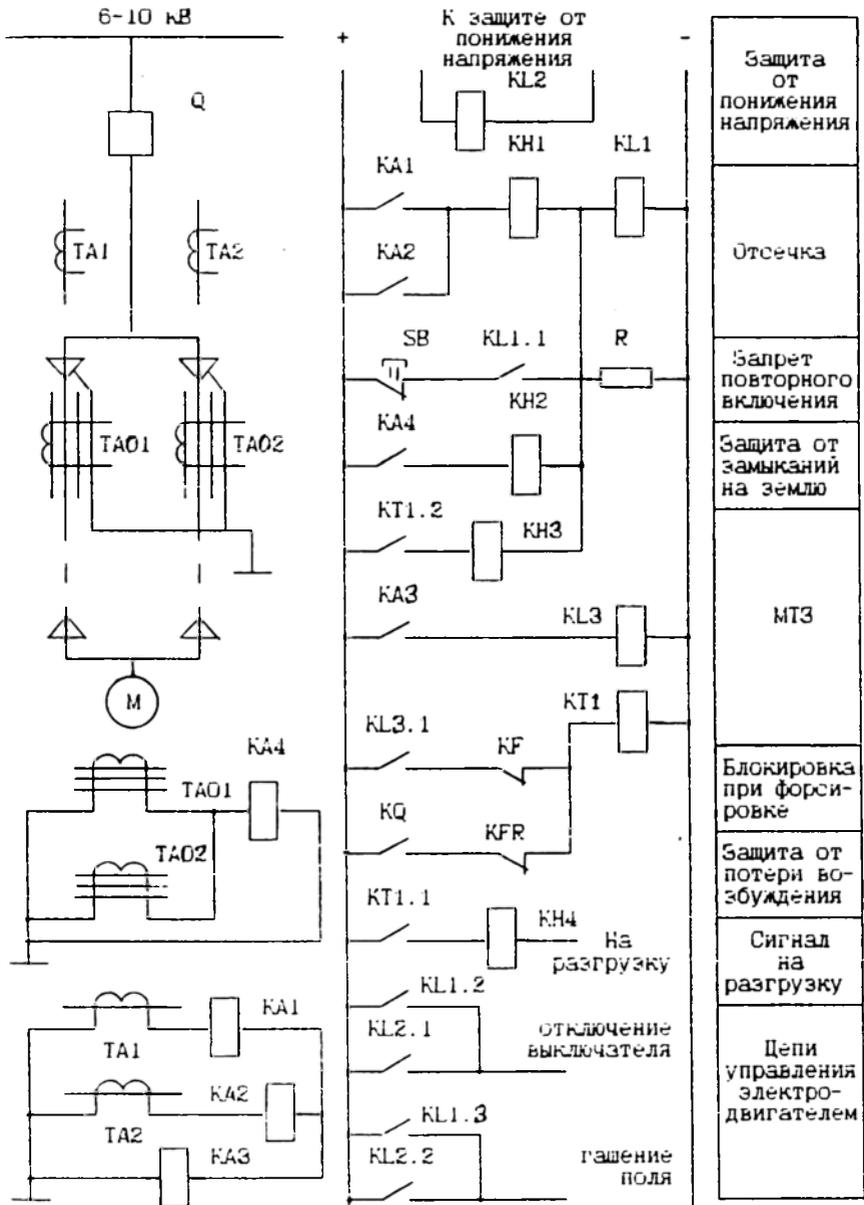


Рис. 3.6

на землю принимает обслуживающий персонал. В этих условиях реле КА4 обеспечивает отключение электродвигателя от сети без выдержки времени при двойном замыкании на землю (одно - в сети, другое - в обмотке).

Таблица 3.4

Тип защиты	Реле	Уставки	
		Ток (напряжение)	Время
1. Отсечка	Электромагнитный элемент РТ-84	$I_{сво} = k_n k_{II} I_{ном};$ $k_n = 1,8; k_{II} = 5,1;$ $I_{срo} = I_{сво} k_{сх}/n_T;$ $I_{сво} = 445 \text{ A};$ $I_{срo} = 25,6 \text{ A}$ $k_{II} = 0,87 I^{(3)}_{к} / I_{срo} n_T$ $k_{II} = 7,9.$	Собственное время срабатывания реле
2. МТЗ от перегрузки и асинхронного режима	Индукционный элемент РТ-84	$I_{срм} = I_{ном} k_n k_{сх}/(n_T k_B);$ $k_n = 1,2; k_{сх} = 1,73$ $k_B = 0,85; n_T = 150/5;$ $I_{срм} = 4 \text{ A}$ $I_{сам} = I_{срм} n_T/k_{сх};$ $I_{сам} = 69,4.$	$t_{сам} \geq t_{п}$ $t_{сам} = 16 \text{ с}$
3. Токовая защита нулевой последовательности	РТЗ-51	$I_{сва} \geq k_n k_6 I_c;$ $k_n = 1,2; k_6 = 3;$ $I_{сва} = 0,6 \text{ A}.$	Собственное время срабатывания реле
4. Защита минимального напряжения	РН-54	$U_{сан} = 0,7 U_{ном};$ $U_{сан} = 4,2 \text{ кВ};$ $U_{срн} = U_{сан}/n_n;$ $U_{срн} = 70 \text{ В}$	$t_{са} = 0,5 \text{ с}$

Отключение двигателя (с действием на гашение поля и на отключение выключателя) при снижении напряжения питания производится по

сигналу соответствующей групповой защиты. Для этого предусмотрена установка промежуточного реле КЛ1.

3.1.5. Особенности защиты электродвигателей напряжением до 1000 В

Асинхронные двигатели с номинальным напряжением до 1000 В - это наиболее многочисленные массовые электрические машины. Большинство из них имеют относительно небольшую мощность и невысокую стоимость. Поэтому для их защиты, как правило, используется минимальный набор аппаратных средств, в которых отдельные элементы выполняют несколько функций.

На рис. 3.7 показана принципиальная схема цепей управления асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором напряжением 380 В.

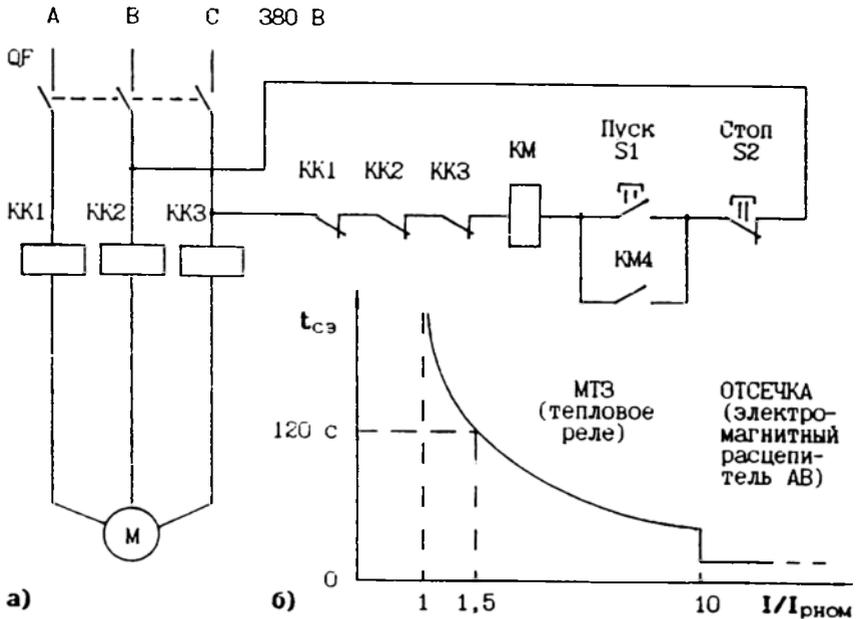


Рис. 3.7

Защита от внутренних междуфазных и однофазных коротких замыканий осуществляется электромагнитными расцепителями автоматического выключателя (АВ) QF (выполняющими роль токовой отсечки).

Защита от перегрузки и от несимметричных режимов работы выполнена на тепловом реле КК с зависимой от тока выдержкой времени срабатывания. Нагревательные элементы реле включены в цепи обмотки статора, а контакты - в цепь катушки контактора КМ.

Для защиты от понижения напряжения используется контактор КМ. При снижении напряжения до 0,7 - 0,8 номинального в процессе работы двигателя контактор возвращается в отключенное состояние, его нормально-разомкнутые контакты размыкаются, и двигатель отключается от сети. Повторный пуск может произвести оператор, нажав кнопку "Пуск". Таким образом, исключается режим самозапуска двигателя.

Основные параметры, характеризующие защиту электродвигателя с $U_{ном} = 380$ В; $P_{ном} = 75$ кВт; $I_{ном} = 135$ А; $k_n = 6,4$, приведены в таблице 3.5. Управление электродвигателем осуществляется автоматическим выключателем А3716 и магнитным пускателем ПМА-6202 с тепловым реле ТРП-150.

Таблица 3.5

Вид защиты	Аппарат	Уставки	
		Ток (напряжение)	Время
1. Отсечка от КЗ	Электромагнитный расцепитель АВ QF	$I_{\infty} \geq k_n k_p I_{ном};$ $I_{\infty} = 1600$ А; для А3716; $k^{(1)}_q = I^{(1)}_к / I_{\infty};$ $k^{(1)}_q = 1,37.$	Собственное время срабатывания АВ (< 0,1 с)
2. МТЗ с зависимой от тока выдержкой времени срабатывания от перегрузки и несимметричных режимов	Тепловое реле ТРП	$I_{рном} \geq I_{ном};$ $I_{рном} = 150$ А	В соответствии с характеристикой ТРП
3. Защита минимального напряжения	Контактор	$U_{свн} = 0,8 U_{ном}$ $U_{свн} = 304$ В	Собственное время возврата контактора

3.2. Защиты, реализуемые с использованием элементной базы вычислительной техники

Комплексный подход к разработке средств контроля параметров и защиты электродвигателей может быть осуществлен наиболее полно в среде современных средств микроэлектроники. Здесь открываются широчайшие возможности точной обработки сложных сигналов, целенаправленного моделирования защищаемых объектов, использования дополнительной информации о наблюдаемом объекте и окружающей его среде, а также обеспечивается приток новых идей, методов и результатов исследований из смежных областей научных знаний.

3.2.1. Автоматизированный комплекс защит асинхронных электродвигателей

Автоматизированный комплекс защит асинхронных электродвигателей (АКЗ) разработан в Вологодском политехническом институте и изготавливается небольшими партиями при участии предприятий - заказчиков.

В нем использованы наиболее совершенные алгоритмы действия в различных аварийных ситуациях.

При повреждении в защищаемом электродвигателе АКЗ обеспечивает нормальную работу исправных элементов питающей сети и не допускает существенных повреждений электродвигателя, что позволяет снизить ремонтно-эксплуатационные расходы и сократить ущерб от простоев оборудования.

Использованные в АКЗ алгоритмы защит предупредительного действия дают возможность максимально использовать перегрузочные способности электродвигателя и не допускают его повреждения вследствие ненормальных режимов работы.

Комплекс защит выполнен в виде единого устройства, содержащего ряд параллельных каналов, каждый из которых выявляет отдельный вид

повреждения или опасного режима работы защищаемого объекта и общих функциональных узлов. Он содержит каналы защиты от междуфазных и однофазных коротких замыканий в обмотках статора, от перегрузки токами, от однофазных замыканий на землю в обмотках статора (в сети с изолированной нейтралью), от несимметрии питающего напряжения, от повреждений, вызванных механическими дефектами в подшипниках и нарушением центровки валов электродвигателей и механизмов.

Уставки основных каналов АКЗ определяются автоматически по параметрам пробного пускового режима защищаемого электродвигателя и запоминаются в специальном блоке.

Структурная схема АКЗ показана на рис. 3.8.

Входными сигналами АКЗ служат вторичные токи трех фаз защищаемого электродвигателя, вторичный ток трансформатора тока нулевой последовательности и вторичное напряжение ТН.

Эти токи входными преобразователями сигналов преобразуются в напряжения, выпрямляются прецизионными выпрямителями и определяются их средние значения. Далее три сигнала, пропорциональные токам трех фаз защищаемого электродвигателя, подаются на вход амплитудного селектора, который сравнивает их по величине и выбирает наибольший и наименьший из них.

Максимальный (наибольший) сигнал подается на вход каналов токовой отсечки, защиты от перегрузки, защиты от несимметрии и на вход блока вычисления и хранения уставки отсечки (вычислитель-1). Минимальный (наименьший) сигнал подается на вход канала защиты от несимметрии.

Выход вычислителя-1 соединен с каналом отсечки и входом блока вычисления и хранения уставки защиты от перегрузки (вычислитель-2). Выход вычислителя-2 соединен с каналом защиты от перегрузки.

Сигнал, пропорциональный току нулевой последовательности, подается на вход канала защиты от замыканий на землю.

Выходы всех каналов защиты соединены со входами выходного блока.

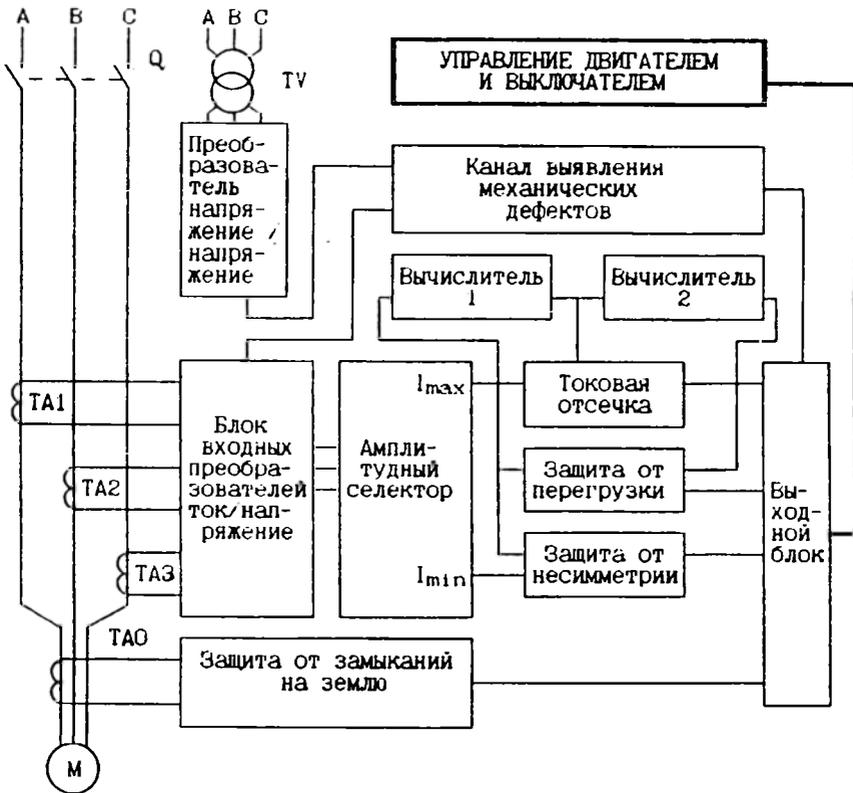


Рис. 3.8

Питание всех узлов устройства осуществляется от общего стабилизированного блока питания.

Принципиальные схемы узлов АКЗ построены следующим образом.

Все преобразователи ток-напряжение идентичны и выполнены на основе малогабаритных промежуточных трансформаторов [14] (рис. 3.9). На этом рисунке: I_2 - вторичный ток трансформатора тока, установленного в фазе защищаемого двигателя, ТА - промежуточный трансформатор тока; R1, R2, R3 - резисторы в цепях обратной связи операционного

усилителя; $U_{\text{вых}}$ - выходное напряжение входного преобразователя; VD1 и VD2 - ограничители выходного напряжения.

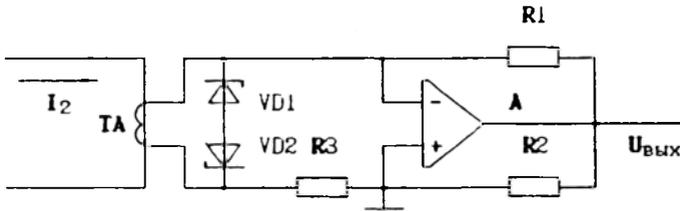


Рис. 3.9

Первичными обмотками промежуточных трансформаторов служат монтажные провода, которыми выполнены вторичные цепи первичных трансформаторов тока. Первичные обмотки могут содержать один или несколько витков.

Параметры входных преобразователей выбраны так, что коэффициент передачи преобразователя для токов фаз при одном витке в первичной обмотке равен 0,1 В/А. Например, при действующем значении первичного тока 5 А на выходе входного преобразователя будем иметь действующее значение напряжения 0,5 В.

Модули сигналов, пропорциональных токам фаз защищаемого электродвигателя, формируются специальными прецизионными выпрямителями на операционных усилителях (ОУ).

На рис. 3.10 показана схема прецизионного выпрямителя, в котором диоды включены в цепи обратных связей ОУ и тем самым значительно понижено эквивалентное прямое падение напряжения на них. Все резисторы в этом выпрямителе имеют одинаковое сопротивление, кроме резистора, соединяющего точку "а" со входом ОУ А2.

Для выделения сигналов, пропорциональных наибольшему и наименьшему средним значениям токов фаз, использован диодный амплитудный селектор. На рис. 3.11 показана схема амплитудного селектора.

Пусть $U_a > U_b > U_c$. При этом диод V_{a1} пропускает ток, а диоды V_{b1} и V_{c1} находятся в закрытом состоянии. Поэтому разность потенциалов между незаземленными точками источников э.д.с. U_a и U_c наибольшая, и по цепи, состоящей из U_a , V_{a1} , R_H , V_{c2} и U_c протекает ток I_{ac} . Диоды V_{a2} и V_{b2} закрыты. Наибольшее сопротивление в цепи прохождения тока имеет резистор R_H , поэтому потенциал зажима U_{max} равен U_a , а зажима U_{min} - U_c (с погрешностью, вызванной прямым падением напряжений на диодах).

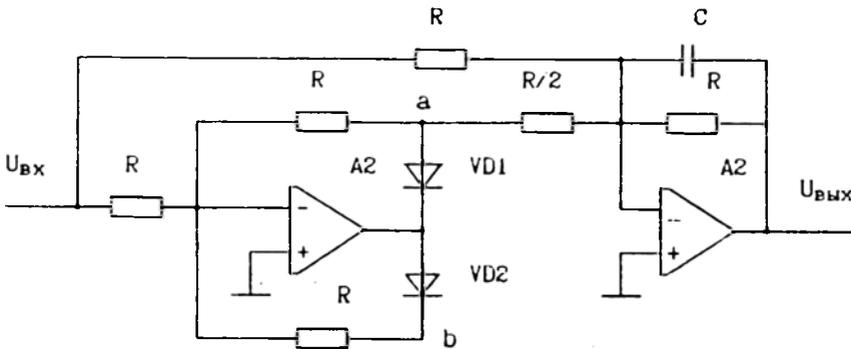


Рис. 3.10

При других соотношениях входных сигналов амплитудный селектор аналогичным образом выделяет наибольший и наименьший из них.

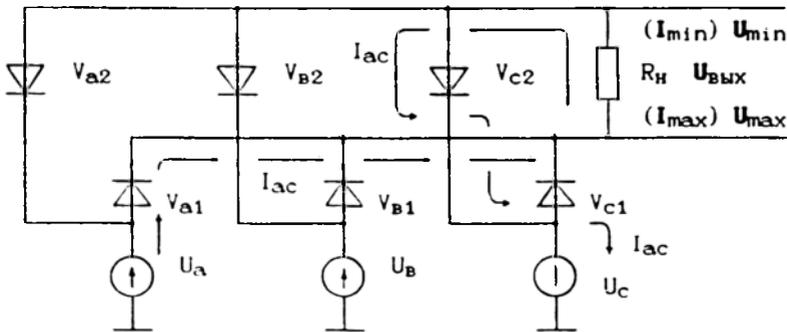


Рис. 3.11

Канал токовой отсечки представляет собой максимальное электронное реле без выдержки времени (рис. 3.12). На вход этого реле подается

сигнал, пропорциональный максимальному среднему значению тока из трех токов фаз.

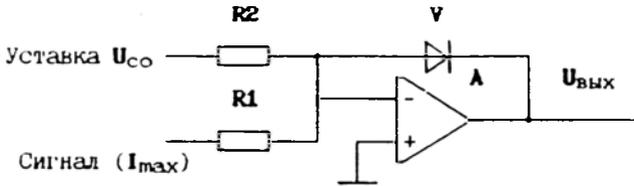


Рис. 3.12

Уставка, $I_{со}$ в виде соответствующего напряжения $U_{со}$ формируется Вычислителем-1.

В основу защиты от перегрузки токами положено уравнение нагрева обмотки электродвигателя (см. п. 1.4 и п. 2.2.3).

Согласно этому уравнению производная температуры обмотки представляет собой сумму двух слагаемых:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{r}{cG} I^2 - \frac{aF}{cG} T.$$

Следовательно, температуру T можно получить на выходе интегратора, если на его вход подать слагаемые правой части этого уравнения (рис. 3.13,а). На схеме для наглядности изображения сигналы в различных точках обозначены как реальные физические величины без соответствующих постоянных коэффициентов.

Входной сигнал, пропорциональный среднему значению максимального из токов фаз, подается на вход усилителя, нормирующего его относительно номинального значения. Коэффициент нормирования $K_{норм}$ задается Вычислителем-2. Нормированный сигнал $I_{норм}$ подается на вход квадратора. Сигнал, пропорциональный квадрату тока, интегрируется, и определяется превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды T . Путем суммирования T и значения температуры окружающей среды $T_{окр}$ определяется абсолютное значение температуры обмотки, которое сравнивается с уставкой $T_{уст}$ компаратором.

С целью получения больших постоянных времени интегрирования, необходимых для решения уравнения, использован аналого-цифровой интегратор.

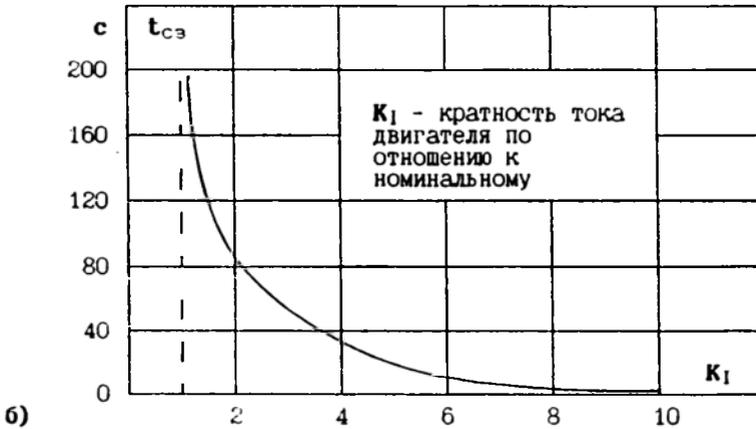
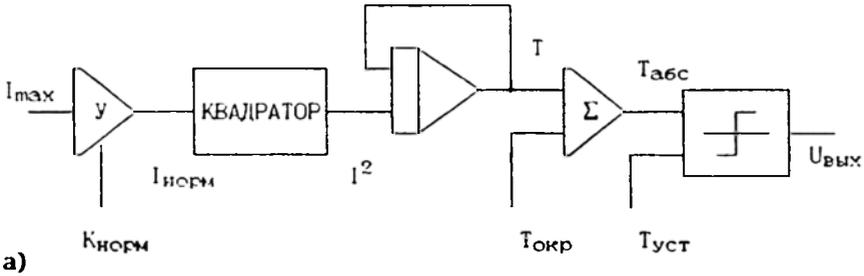


Рис. 3.13

Время-токовые характеристики канала защиты от перегрузки при различных постоянных времени нагрева обмотки представлены на рис. 3.13,б.

Канал защиты от несимметрии сравнивает между собой сигналы, пропорциональные наибольшему и наименьшему средним значениям токов фаз защищаемого двигателя. Защита срабатывает, если разность этих двух сигналов превысит допустимый уровень (уставку). Уставки можно изменять в диапазоне от 30 до 50% номинального сигнала путем

изменения сопротивления резистора, определяющего уровень срабатывания компаратора.

Канал защиты от замыканий на землю выполнен в виде максимального электронного реле. На вход этого канала подается сигнал, пропорциональный току нулевой последовательности от ТНП. Этот сигнал выпрямляется, и определяется его среднее значение, которое сравнивается с уставкой. Уставка изменяется путем изменения сопротивления резистора, определяющего уровень срабатывания компаратора. Защита отстраивается от бросков собственного емкостного тока защищаемого присоединения.

На рис. 3.14,а показана структурная схема канала выявления механических дефектов. Он содержит режекторный (заграждающий) фильтр РФ; формирователь модуля ФМ; фильтр нижних частот ФНЧ; пороговый элемент ПЭ (компаратор) и входной преобразователь напряжения ВНП, формирующий сигналы, пропорциональные напряжению питания электродвигателя для режекторного фильтра.

Входным сигналом для устройства служит ток одной фазы статора. Этот ток с помощью трансформатора тока и входного преобразователя ток-напряжение преобразуется в напряжение, удобное для обработки микроэлектронными элементами.

При повреждении подшипников или нарушении центровки валов двигателя и механизма в токе статора появляются составляющие с частотой, отличной от частоты источника питания. С помощью режекторного фильтра подавляются составляющие сигнала с частотой, равной частоте источника питания. Таким образом, через фильтр проходят только те составляющие сигнала, частота которых отличается от частоты источника питания. Выходной сигнал фильтра выпрямляется формированием модуля, сглаживается и подается на вход порогового элемента, который сравнивает выходной сигнал фильтра с предельно допустимым значением (уставкой). При превышении входным сигналом допустимого уровня

пороговый элемент формирует сигнал, информирующий о возникновении механического дефекта в защищаемом объекте.

Реализация режекторного фильтра связана с определенными особенностями. Важнейшая особенность состоит в том, что этот фильтр должен иметь очень узкую полосу заграждения не более 1 Гц (при номинальной частоте 50 Гц). Использование активного фильтра высокого порядка здесь невозможно из-за колебаний частоты в питающей сети. Поэтому для предлагаемого устройства разработан специальный фильтр, частота максимального ослабления сигнала в котором равна частоте в питающей сети.

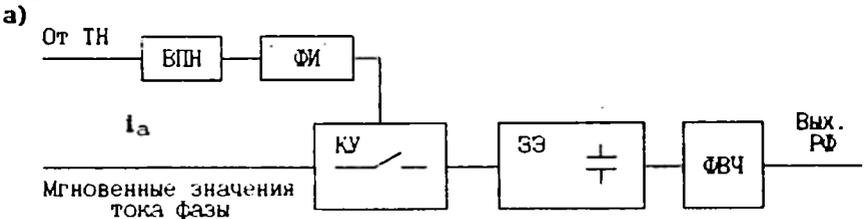
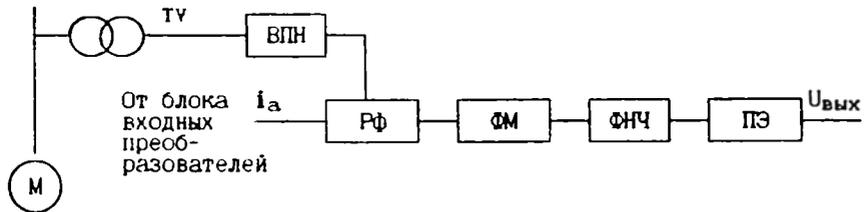
Структурная схема фильтра приведена на рис. 3.14,б. Принцип действия фильтра основан на теории синхронного детектирования [15], используя которую удалось создать режекторный фильтр с необходимой полосой заграждения.

Фильтр работает следующим образом. Сигнал, пропорциональный напряжению питающей сети, подается через входной преобразователь ВПН на вход формирователя импульсов ФИ. Здесь из синусоидального входного сигнала формируются прямоугольные импульсы, длительностью много меньше периода входного сигнала. Причем частота следования этих импульсов равна частоте напряжения питающей сети.

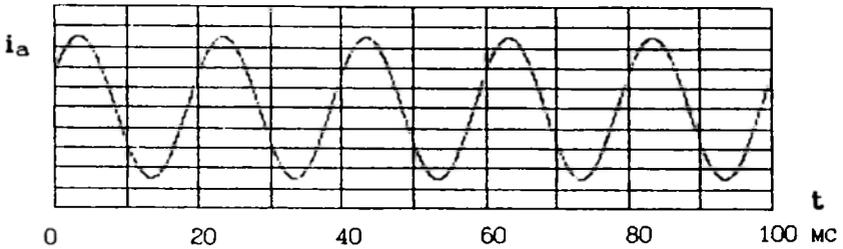
Выходные импульсы ФИ подаются на управляющий вход электронного ключа в коммутаторе КУ. Ключ находится в разомкнутом состоянии и периодически кратковременно замыкается под действием управляющих импульсов, соединяя информационный вход коммутатора с выходом. Таким образом, на вход запоминающего элемента ЗЭ подаются выборки значений тока статора защищаемого электродвигателя с частотой, равной частоте питающего напряжения.

В нормальных условиях, при исправных подшипниках, ток статора асинхронного двигателя имеет, практически, синусоидальную форму. Поэтому выборки значений тока, соответствующие определенной фазе сигнала, в установившемся режиме (когда амплитуда и фаза тока не меняются) имеют одинаковые значения (рис. 3.14,в). В результате на выходе

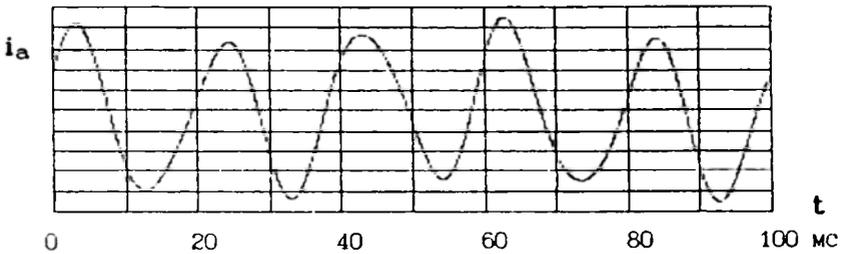
аналогового запоминающего элемента ЗЭ устанавливается сигнал постоянного уровня. Этот выходной сигнал запоминающего элемента подается на вход фильтра верхних частот ФВЧ. Поскольку входной сигнал ФВЧ имеет постоянное значение, то сигнал на его выходе равен нулю.



В нормальном режиме



При повреждении



в)

Рис. 3.14

При возникновении механического дефекта в подшипнике или нарушении центровки валов двигателя и приводимого им механизма, момент сопротивления вращению становится зависимым от угла поворота вала. В этих условиях при вращении вала момент сопротивления периодически изменяется, вызывая изменение тока статора с частотой вращения вала. В этих условиях выборки тока статора, подаваемые на вход запоминающего элемента ЗЭ, отличаются одна от другой, и уровень сигнала на выходе запоминающего элемента изменяется. Этот переменный сигнал проходит через ФВЧ без ослабления и обрабатывается далее как полезный сигнал, информирующий о появлении дефекта в механической части электродвигателя.

Вычислители 1 и 2 предназначены для автоматического определения и хранения уставок срабатывания токовой отсечки и защиты от перегрузки (рис. 3.15).

Вычислитель-1 содержит пиковый детектор, который запоминает и хранит определенное время сигнал, пропорциональный пусковому току, потенциометр для длительного хранения сигнала, пропорционального уставке, нуль-индикатор на основе компаратора и двух светодиодов, "Регулировку-1" для установки на выходе Вычислителя-1 напряжения, равного выходному напряжению пикового детектора.

На вход Вычислителя-1 подается сигнал, пропорциональный максимальному из трех токов фаз с выхода амплитудного селектора.

Для получения уставки срабатывания отсечки, сигнал, пропорциональный пусковому току, получаемый на выходе пикового детектора после пуска двигателя, умножается на постоянный коэффициент, равный коэффициенту надежности ($k_n = 1,2$). Пиковый детектор не предназначен для длительного хранения сигналов, поэтому сигнал, соответствующий уставке, устанавливается на выходе потенциометра с помощью светодиодного нуль-индикатора и одновременно подается на один из входов канала токовой отсечки.

Вычислитель-2 содержит резистивный делитель и переключатель, с помощью которых сигнал, пропорциональный пусковому току, делится на кратность пускового тока и, таким образом, определяется сигнал, пропорциональный номинальному току двигателя. В режиме настройки Вычислитель-2 по этому сигналу определяет коэффициент нормирования сигнала U_{\max} для канала защиты от перегрузки и уставку защиты от перегрузки.

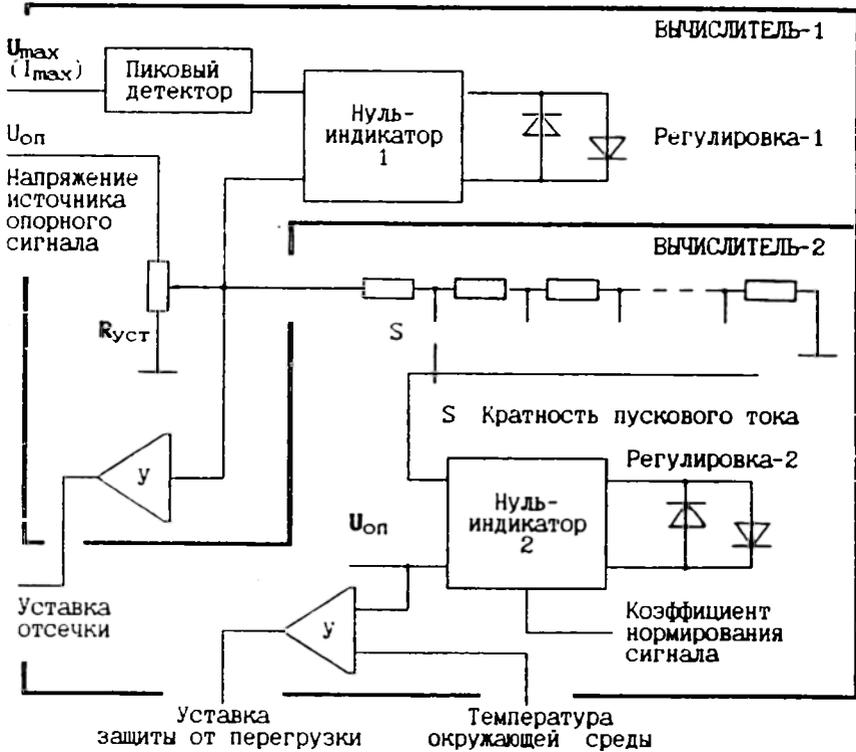


Рис. 3.15

Выходной блок предназначен для индикации срабатывания каналов защиты и для управления исполнительными элементами защиты.

В выходном блоке имеются два выходных реле. Каждый из каналов может воздействовать на одно из этих реле и, следовательно, работать с

действием как на сигнал, так и на отключение защищаемого электродвигателя.

При срабатывании какого-либо канала защиты по управляющему сигналу включается одно из выходных реле и соответствующий каналу светодиодный индикатор. Реле и светодиодный индикатор остаются во включенном состоянии до тех пор, пока не будет нажата кнопка "Сброс".

Конструктивно АКЗ выполнен в виде набора устройств соединенных между собой гибкими кабелями. Каждый из четырех промежуточных трансформаторов тока входных преобразователей размещен в отдельном корпусе. Соединение выводов обмоток этих трансформаторов выполнено в специальной соединительной коробке. Все основные функциональные узлы АКЗ размещены в главном корпусе.

3.2.2. Устройство контроля изоляции и защиты от замыканий на землю в цепях статора электродвигателя, работающего в блоке с трансформатором

В этом устройстве реализован алгоритм, рассмотренный в п. 2.2.2. Функциональная схема устройства, на которой показаны примеры выполнения основных функциональных узлов (в соответствии с рис. 2.4), представлена на рис. 3.16.

Коммутатор выполнен на основе трех диодов, аноды которых подключены к фазам сети, а катоды соединены между собой. Последовательная цепь, содержащая добавочное сопротивление $R_{доб}$ и сопротивление шунта $R_{ш}$, соединяет катоды диодов с землей и обеспечивает ограничение максимального тока утечки на землю через диоды коммутатора. Падение напряжения на сопротивление $R_{ш}$ пропорционально току утечки. Оно используется как полезный сигнал при определении сопротивления изоляции сети относительно земли и места повреждения при замыкании на землю.

При повреждении изоляции в нейтрали обмотки статора электродвигателя симметрия сети относительно земли не нарушается. Диоды

коммутатора поочередно открываются и по ним протекают равные по величине токи утечки отдельных фаз. Определяются отношения соответствующих средних значений фазных напряжений и токов утечки, т.е. активные сопротивления утечки. Эти сопротивления сравниваются с уставкой и принимается решение о возможности дальнейшей работы защищаемого электродвигателя.

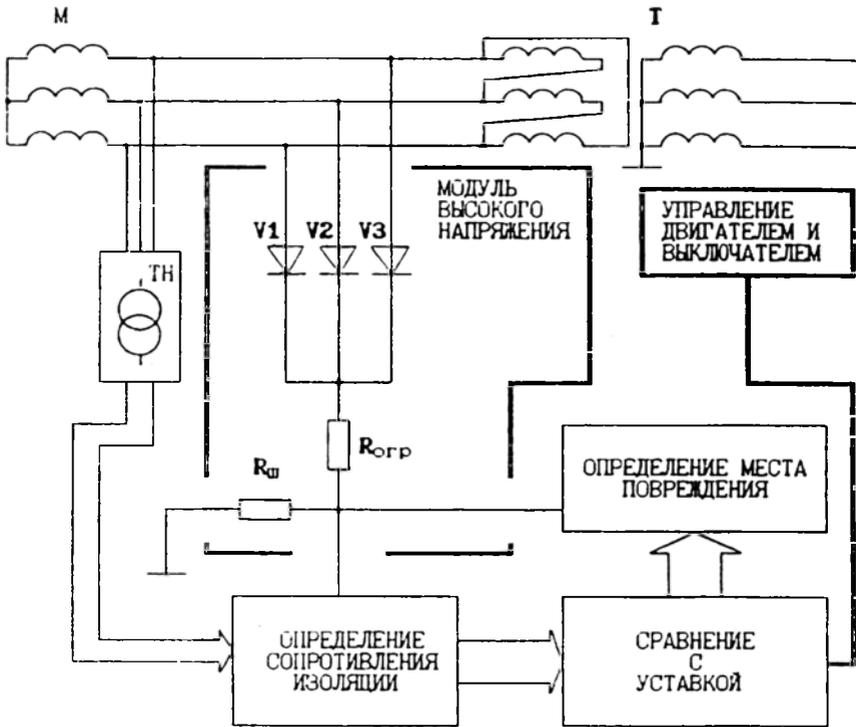


Рис. 3.16

Кроме того, в блоке определения места повреждения токи утечки отдельных фаз сравниваются между собой по уровню и по фазе относительно напряжения фазы А. Если максимальные значения отдельных

токов утечки не отличаются друг от друга, то формируется сигнал, указывающий место повреждения - нейтраль (рис. 3.17,а).

При повреждении изоляции вблизи фазного вывода, например при замыкании на землю фазы С, симметрия сети относительно земли нарушается. Диод V3 коммутатора шунтируется переходным сопротивлением места повреждения, а к анодам диодов V1 и V2 прикладываются соответственно линейные напряжения U_{AC} и U_{BC} . Под действием этих линейных напряжений диоды V1 и V2 поочередно открываются и по цепи $R_{доб} - R_{ш}$ протекают токи утечки фаз, форма которых показана на рис. 3.17,б.

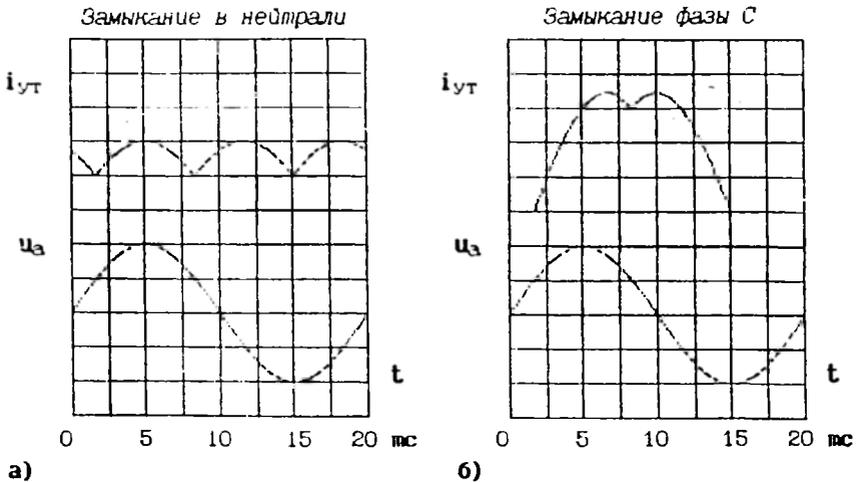


Рис. 3.17

В блоке определения места повреждения измеряются фазы токов утечки, выявляется поврежденная фаза, оценивается удаленность места повреждения от нейтрали обмотки и формируется сигнал, информирующий, что место повреждения - фазный вывод С обмотки статора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ва ж н о в А.И. Электрические машины. - Л.: Энергия. 1969. 768 с.
2. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э.К р а в ч и к, М.М.Ш л а ф, В.И.А ф о н и н, Е.А.С о б о л е в с к а я, - М.: Энергоатомиздат. 1982. 504 с.
3. Справочник по электрическим машинам. В 2 т. / Под общ.ред. И.П.К о п ы л о в а и Б.К.К л о к о в а, Т.1. - М.: Энергоатомиздат. 1988. 456 с.
4. С ы р о м я т н и к о в И.А. Режимы работы асинхронных электродвигателей. - М.Л.: Госэнергоиздат. 1963. 528 с.
5. Г е й л е р Л.Б. Основы электропривода. - Минск: Высшая школа. 608 с.
6. Ф е д о с е е в А.М. Релейная защита электрических систем. - М.: Энергия. 1976. 560 с.
7. Правила устройства электроустановок. - М.: Энергоатомиздат. 1985. 640 с.
8. С и р о т а И.М. Трансформаторы и фильтры напряжения и тока нулевой последовательности. - Киев: Наукова думка, 1983. 268 с.
9. К о р о г о д с к и й В.И., К у ж е к о в С.Л., П а п е р н о Л.Б. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. - М.: Энергоатомиздат. 1987. 248 с.
10. В а в и н В.Н. Трансформаторы напряжения и их вторичные цепи. - М.: Энергия. 1977. 104 с.
11. В а н и н В.К., П а в л о в Г.М. Релейная защита на элементах вычислительной техники. - Л.: Энергоатомиздат, 1991. 336 с.
12. Авторское свидетельство СССР N 1642548. А.В.Б у л ы ч е в, Е.В.К у л а к о в, В.Л.Т р е т ь я к о в. Оpubл. в Б.И. N 14, 1991 г.
13. Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. Ю.Г.Б а р ы б и н а и др. - М.: Энергоатомиздат. 1990. 576 с.
14. Б у л ы ч е в А.В., В а н и н В.К. Анализ входных преобразователей сигналов для устройств релейной защиты на интегральных микросхемах // Электричество. - 1985. N 9. С. 13 - 18.
15. Ж.М а к с. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. - М.: Мир. 1983. Т. 2. 256 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ И В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	5
1.1. Асинхронные электродвигатели и их основные характеристики	5
1.2. Конструкции асинхронных электродвигателей	14
1.3. Нормальные режимы работы асинхронных двигателей	21
1.4. Повреждения электродвигателей	21
1.5. Особенности ненормальных режимов работы асинхронных электродвигателей	30
1.6. Дефекты в механической части асинхронных двигателей	35
1.7. Принцип действия, основные параметры и особенности синхронных двигателей	40
2. ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАЩИТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ	45
2.1. Требования к системам контроля и защиты электродвигателей	45
2.2. Алгоритмы действия средств контроля и защиты электродвигателей	47
2.2.1. Алгоритмы действия защит от внутренних коротких замыканий	48
2.2.2. Алгоритмы действия защит от однофазных замыканий на землю в обмотках статора	52
2.2.3. Алгоритмы действия защит от перегрузки	57
2.2.4. Алгоритмы действия защит от асинхронного хода	60
2.2.5. Выявление дефектов в механической части асинхронных электродвигателей	61
3. ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАЩИТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ	63
3.1. Основные защиты, реализуемые на электромеханической элементной базе	63

3.1.1. Защита от междуфазных коротких замыканий	63
3.1.2. Защита от однофазных замыканий на землю в обмотках статора	67
3.1.3. Защита от перегрузки	70
3.1.4. Защита электродвигателей с номинальным напряжением 6 - 10 кВ	72
3.1.5. Особенности защиты электродвигателей напряжением до 1000 В	77
3.2. Защиты, реализуемые с использованием элементной базы вычислительной техники	79
3.2.1. Автоматизированный комплекс защит асинхронных электродвигателей	79
3.2.2. Устройство контроля изоляции и защиты от замыканий на землю в цепях статора электродвигателя, работающего в блоке с трансформатором	91
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	94

Формат издания 60×90 1/16. Гарнитура "Таймс". Печать офсетная. Печ.л. 6,0. Тираж 1000 экз. Отпечатано с оригинал-макета в центре оперативной полиграфии СПбГУ.