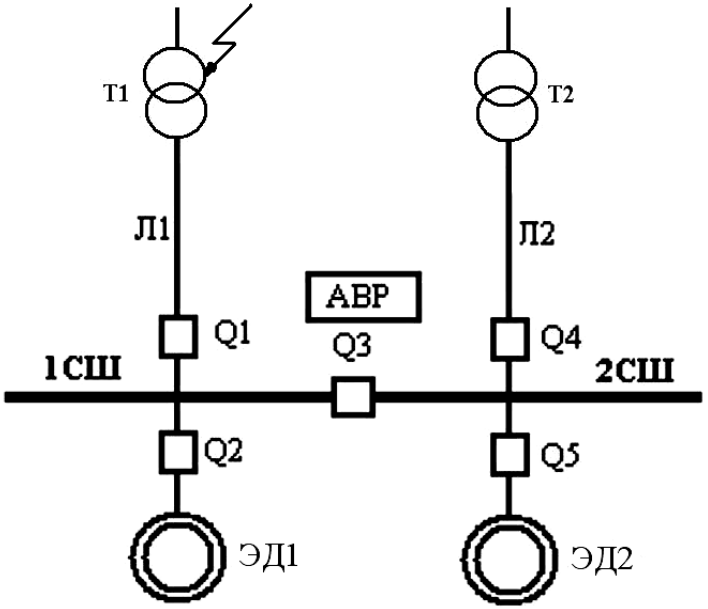
Ю.М. Голоднов

САМОЗАПУСК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ



Ю. М. Голоднов

САМОЗАПУСК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Издание второе, переработанное
и дополненное

МОСКВА

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1985

ББК 31.261.2
Г61
УДК 621.316117:621.311.182

рецензент А.Д. Шаин

Голоднов Ю. М.
Г 61 Самозапуек электродвигателей. — 2-е изд., перераб. и доп.—М.: Энергоатомиздат, 1985.—13б с. ил.

40 к. 13 000 экз.

Рассматриваются процессы при самозапуске асинхронных и синхронных двигателей от момента нарушения электроснабжения до восстановления нормальной работы механизмов. Первое издание вышло в 1974 г. Во втором издании рассмотрены самозапуск синхронных двигателей с различными системами возбуждения, схемы электроснабжения, релейной защиты и. автоматики (АВР в сетях выше 1000 В и устройства для самозапуска двигателей до 1000 В).

Для инженеров, работающих в области электроснабжения пром-предприятий и собственных нужд электростанций.

ББК(31.261.2)

$Г \frac{2302050000-049}{051(01)-85}$ 119-85

6П2.1.081

Издательство «Энергия», 1974
© Энергоатомиздат, 1985, с изменениями

ПРЕДИСЛОВИЕ

Широкое использование устройств автоматизации позволяет значительно повысить надежность систем электроснабжения. Однако для ответственных потребителей средства автоматизации обеспечивают должный эффект только в сочетании с самозапуском электродвигателей. Высокая эффективность самозапуска, теоретические и практические основы к®торого были разработаны в 60-х годах, вызвала необходимость выпуска книги, специально посвященной этому вопросу. Первое издание такой книги [1], написанной автором совместно с А. Х. Хореняном, вышло в 1974 г. и основывалось на разработках и опыте работы И. А. Сыромятникова, предприятий треста «Энергочермет» и ВНИИЭ.

За период, прошедший после выхода первого издания, были достигнуты новые успехи в теории и в практическом внедрении самозапуска. Особенно широкое распространение получил самозапуск на предприятиях химической, нефтеперерабатывающей промышленности и промышленности минеральных удобрений, а также в собственных нуждах электростанций. Много оригинальных и эффективных средств обеспечения самозапуска разработано и освоено производственным объединением «Союзхимпромэнерго» и другими предприятиями и организациями.

При подготовке настоящего издания большая часть материала был а существенно переработана, При переработке были учтены рецензия, опубликованная в журнале «Электрические станции» (1976, ЗЪ 9), письма читателей, новейшие достижения в области самозапуска. Отражены вопросы самозапуска синхронных двигателей с различными системами возбуждения. Значительное внимание уделено практическим вопросам обеспечения самозапуска электродвигателей. Полностью переработаны и по существу представляют собой новый материал гл. 4, § 16 и 17 (т. е. материал, который в первом издании был написан А. Х. Хореняном). Кроме того, добавлены § 19—21 и 23, существенно расширены § 6, 22 и приложение 1. Остальной материал подвергся небольшим изменениям.

Книга предназначена для широкого круга читателей, которым приходится заниматься вопросами самозапуск электродвигателей. Предполагается, что читатель достаточно знаком с вопросами теории электрических машин, основ электроснабжения, релейной защиты и автоматики.

Автор выражает глубокую благодарность В. П. Кораблеву и всем читателям, приславшим свои отзывы на первое издание книги, Л.Г. Мамиконянцу, А.Д. Шаину и
В. Б. Куинджи, просмотревшим рукопись книги и сделавшим ряд ценных замечаний.

С благодарностью будут приняты замечания и пожелания читателей, которые следует направлять по адресу:
113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

Автор

Глава первая
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА САМОЗАПУСКА

1. ПРИМЕНЕНИЕ САМОЗАПУСКА

Самозапуском называется восстановление нормальной работы электропривода без вмешательства персонала после кратковременного перерыва электроснабжения или глубокого снижения напряжения. Самозапуск считается обеспеченным, если после восстановления напряжения агрегат разогнался до нормальной угловой скорости и продолжает длительно работать с нормальной производительностью приводимого механизма и нагрузкой электродвигателя.

Самозапуск электродвигателей позволяет наиболее полно использовать средства автоматизации систем электроснабжения. Если повреждение, вызвавшее прекращение питания или глубокое снижение напряжения, быстро ликвидировано действием релейной защиты и устройств автоматики, то при обеспеченном самозапуске это не является аварией или браком в работе системы электроснабжения. Ущерба практически не возникает. Если же самозапуск не обеспечен, двигатели останавливаются, и хотя устройства автоматики сработали, ущерб может быть значительным, особенно при расстройстве сложного технологического цикла (например, в химической промышленности). Самозапуск может происходить после кратковременного глубокого снижения напряжения, вследствие близкого короткого замыкания (КЗ), отключаемого релейной защитой. При этом в самозапуске будут одновременно участвовать те двигатели, у которых напряжение снизилось до значения, вызвавшего снижение угловой скорости. Двигатели все время остаются подключенными к источникам питания.

Другим случаем является самозапуск после кратковременного перерыва электроснабжения при срабатывании устройств автоматического ввода резерва (АВР) или автоматического повторного включения (АПВ). Здесь в самозапуске участвуют одновременно все двигатели, которые при исчезновении напряжения отключались от источников, питания и были вновь подключены к ним после действия автоматики.

Выключатели электродвигателей напряжением выше 1000 В, подлежащих самозапуску, в большинстве случаев во время перерыва электроснабжения остаются включенными. двигатели, самозапуск которых не может быть обеспечен или не требуется по условиям производства, должны до восстановления напряжения отключиться от сети своими выключателями с помощью минимального реле напряжения, частотных реле и т. д.

двигатели напряжением до 1000 В, включенные через магнитные пускатели либо контакторы, в самозапуске не участвуют. Если самозапуск таких двигателей необходим, применяются устройства АПВ контактора (магнитного пускателя), действующие при восстановлении напряжения, либо различного рода задержки, сохраняющие включенное положение контактора.

Самозапуск асинхронных и синхронных электродвигателей начал применяться на тепловых электростанциях и в настоящее время используется для всех основных механизмов собственных нужд электростанций различного типа. В последние годы он получил широкое распространение во многих отраслях промышленности, особенно со сложными непрерывными технологическими процесса ми (производства аммиака, азотных удобрений, органического синтеза, основной химии, нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности и др.). Обоснованное применение самозапуска в сочетании со средствами автоматики всегда приводит к повышению надежности электроснабжения и уменьшению простоев механизмов. В некоторых случаях, кроме того, обеспечивается снижение эксплуатационных расходов (за счет уменьшения персонала, снижения потерь электроэнергии и др.) и капитальных затрат. Например, применение самозапуска электродвигателей насосных агрегатов, питающих водой доменные и сталеплавильные печи, позволяет отказаться от сооружения резервного привода (паротурбинного, газотурбинного и пр.) и много- объемных резервных напорных баков (конечно, при наличии системы электроснабжения с требуемой надежностью).

Самозапуск двигателей постоянного тока в настоящее время не получил широкого распространения, применяется лишь в некоторых частных случаях и в настоящей книге не рассматривается. Привод постоянного тока, как правило, выполняется регулируемым. При восстановлении напряжения после кратковременного нарушения электроснабжения система регулирования без каких-либо трудностей обеспечивает разгон двигателя до рабочей угловой скорости при значении тока, не превышающем допустимого.

Обеспечение самозапуска требует комплексного решения вопросов, связанных с работой электродвигателя и его системы управления, электрической сети, а также самого приводимого механизма. В некоторых случаях самозапуск может быть запрещен по условиям техники безопасности или технологии производства. Например, самозапуск может оказаться недопустимым для компрессорных установок, работающих с взрывоопасными агентами. Нецелесообразен самозапуск крановых механизмов и т. д. В тех случаях, когда самозапуск не только бесполезен, но и опасен для персонала, могут применяться специальные устройства для его запрета.

Во всех случаях осуществление самозапуска должно быть обоснованным. Его следует применять только для тех механизмов, для которых он действительно необходим. Главная задача самозапуска — сохранить работоспособность технологической линии или агрегата при кратковременном нарушении электроснабжения. Нужно учитывать, что

нередко восстановление питания после его аварийного прекращения происходит в условиях сниженной суммарной мощности источника питания (например, при аварийном отключении одного из двух вводов цеховой подстанции и автоматическом переводе всей ее нагрузки на другой ввод). Неоправданное увеличение суммарной мощности электродвигателей, участвующих в самозапуске, может в этих условиях привести к отрицательным результатам. В большинстве химических производств на время нарушения электроснабжения бывает достаточно сохранить циркуляцию раствора, необходимую температуру и давление компонентов, чтобы предотвратить кристаллизацию или другие необратимые изменения. Доменная печь может быть переведена на «тихий ход» с сохранением работы систем охлаждения и дутья во избежание образования козла>. Это особенно целесообразно при полном прекращении питания со стороны энергосистемы, когда остаются в работе лишь отделившиеся от нее генераторы собственной ТЭЦ с ограниченной суммарной мощностью.

Если мощность системы электроснабжения достаточна, в одновременном самозапуске могут участвовать все электродвигатели, для которых он необходим. Если же ограниченная мощность системы электроснабжения этого не допускает, то предусматривается несколько ступеней самозапуска, т. е. поочередный самозапуск нескольких групп двигателей. Вопросы взаимного влияния системы электроснабжения и двигателей, участвующих в самозапуске, рассмотрены в гл. 6.

В зависимости от длительности перерыва электроснабжения возможны два основных случая самозапуска: либо двигатель имеет какую-то остаточную угловую скорость к моменту восстановления напряжения, либо он успевает остановиться. Во втором случае, если время перерыва питания велико, персонал может, не зная причин остановки двигателя, начать какие-либо работы на механизме, что в свою очередь может привести к несчастному случаю. Поэтому необходимо обеспечить после нарушения электроснабжения автоматическое отключение выключателя с выдержкой времени при полной остановке двигателя или невозможность приближения персонала к механизму (с помощью ограждений и блокировок), если двигатель не отключен от сети. Указанная выдержка времени должна быть больше, чем время действия всех устройств автоматики.

2. ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ ПРИ САМОЗАПУСКЕ

Самозапуск электродвигателей имеет следующие основные отличия от пуска:

1) в момент восстановления напряжения все двигатели или их значительная часть вращаются. Наличие угловой скорости, как правило, обеспечивает повышенный момент вращения двигателя в начале самозапуска по сравнению с пуском (при том же напряжении);

2) при отключении от сети один или группа двигателей развивают на шинах подстанции остаточную ЭДС Е, н в момент подключения к источникам питания вектор периодической слагающей тока равен

$$\dot{I}'' = \frac{\dot{U}_c - \dot{E}_д}{Z_\Sigma}, \qquad (1)$$

где $\dot{U}_c$ — напряжение сети; Z_Σ — суммарное эквивалентное сопротивление (см. § 9).

Ток включения двигателя может превышать пусковой ток более чем в 2 раза;

3) самозапуск происходит, как правило, при нагруженных механизмах, что может приводить к увеличению длительности разгона и повышению температуры обмоток двигателей, обусловленному увеличением тока по сравнению с его номинальными значениями;

4) в самозапуске, как правило, участвует одновременно группа двигателей, в Результате чего в элементах сети растут токи, снижается напряжение на зажимах двигателей п соответственно уменьшается вращающий момент.

Весь процесс самозапуска можно разделить на два этапа.

Первый этап — *выбег электродвигателей* (одиночный или групповой). Одиночным называется выбег, при котором один электродвигатель оказывается отсоединенным от сети и от других двигателей, либо такой, когда другие двигатели, электрически связанные с ним, не оказывают заметного влияния на процесс выбега. Обычно это происходит, если между рассматриваемыми и другими двигателями включен реактор или трансформатор. Выбег одного двигателя, отключенного от сети, называется свободным. Если заимное влияние отсоединенных от источников питания двигателей велико, такой выбег называется групповым. В основном процесс выбега определяется механическими характеристиками агрегатов. При подпитке двигателями близкого КЗ выбег происходит по более крутой характеристике за счет возникновения дополнительного тормозного момента.

Всякий двигатель, отключенный от источника питания, развивает при выбеге ЭДС в обмотке статора. У асинхронных двигателей ЭДС невелика, у синхронных значительна, чем больше ЭДС, тем больше ток включения при восстановлении напряжения (при неблагоприятной фазе включения). С этой точки зрения желательно иметь достаточно большой промежуток времени до восстановления напряжения, т. е. увеличить время действия АВР или АПВ, с тем чтобы обеспечить достаточное снижение $E_Д$ и получить допустимое значение I" (1).

Второй этап — *разгон и восстановление рабочего режима.* Разгон происходит при сниженном напряжении, значение которого зависит от параметров сети, разгоняющихся двигателей и прочей присоединенной нагрузки.

Асинхронный момент, развиваемый двигателями в процессе разгона, пропорционален квадрату напряжения. Самозапуск можно считать обеспеченным, если при пониженном напряжении избыточный момент двигателя достаточен для доведения механизма до номинальной угловой скорости и если за время разгона температура нагрев обмоток не превысит допустимого значения. С этой точки зрения время перерыва электроснабжения должно был как можно меньшим.

Синхронный двигатель в конце второго этапа должен войти в синхронизм. Процесс вхождения в синхронизм зависит в первую очередь от системы возбуждения и значения напряжения, так как синхронизирующий момент пропорционален ЭДС двигателя и напряжению сети. В некоторых случаях (см. § 15) синхронный двигатель переходит в асинхронный режим после перерыва питания и тогда не требуется специальных средств для ресинхронизации. В зависимости от конкретных условий различают два основных способа самозапуска: с нагруженным механизмом и с временной разгрузкой механизма.

Самозапуск асинхронного двигателя с фазным ротором может осуществляться с введением пускового активного сопротивления в цепь ротора или с замкнутым кольцами. Поскольку такие двигатели обычно имеют ослабленное крепление лобовых частей обмоток ротора статора, самозапуск с замкнутыми кольцами может быт применен очень редко и, как правило, требует дополна тельного усиления этих креплений.

для синхронного двигателя различают следующие разновидности самозапуска с нагруженным механизмом:

а) с глухим подключением возбудителя с форсировкой или без форсировки возбуждения;

б) с глухим подключением коллекторного электромашинного возбудителя с введением в начале выбега в цеп возбуждения возбудителя сопротивления для гашения поля и снижения тока включения, с последующим шунтированием этого сопротивления в начале разгона;

в) с введением на время разгона разрядного сопротивления, шунтируемого после достижения подсинхронной частоты вращения;

г) с реверсированием тиристорного возбудителя в начале выбега с целью ускорения гашения поля и снижения тока включения с последующей форсировкой возбуждения,

Самозапуск с временной разгрузкой механизма применяется лишь в крайнем случае и только по схеме с введением разрядного сопротивления.

Глава вторая

ВЫБЕГ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

3. СВОБОДНЫЙ ВЫБЕГ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ

При расчетах самозапуска необходимо в первую очередь определить угловую скорость или скольжение двигателя к моменту восстановления питания. Зависимость остаточной угловой скорости (скольжения) от времени нарушения электроснабжения определяется в первую очередь моментом инерции и загрузкой агрегата, а также видом механической характеристики приводимого механизма.

Зависимость угловой скорости от времени с момента отключения наиболее просто определяется при свободном выбеге. Уравнение движения при этом имеет вид

$$-M_{\text{с}} = J_{\text{пр}} \frac{d\omega}{dt}, \qquad (2)$$

где M_c — момент сопротивления механизма, Н·м; ω — угловая скорость, c^{-1} (рад/с); $J_{пр}$ — приведенный момент инерции агрегата[1], кг·м², равный сумме момента инерции двигателя и приведенного к валу двигателя момента инерции механизма:

$$J_{пр} = J_д + J_{мех,\,пр} = J_д + J_{мех}\left(\frac{\omega_{ном,\,мех}}{\omega_{ном,\,д}}\right)^2,$$

где $\omega_{ном,мех}$, $\omega_{ном,д}$ — номинальные угловые скорости механизма и двигателя.

Если момент и угловую скорость выразить в относительных единицах, приняв за базовые номинальный момент и синхронную угловую скорость двигателя, то (2) примет вид

$$-m_c = -\tau_{j,\,ном}\frac{ds}{dt}, \qquad (3)$$

где $\tau_{j,ном}$ — время ускорения (замедления) агрегата при постоянной нагрузке, равной номинальной, с. Это время называется также «механической постоянной времени при

[1] В старых и некоторых современных зарубежных каталогах приведены значения махового момента GD^2, кгс·м². Для перехода к значению момента инерции J, выраженного в международных единицах, кг·м², каталожное значение махового момента необходимо разделить на 4: $J = GD^2/4$.

номинальной нагрузке двигателя». Оно может быть определено по формуле

$$\tau_{j,\,\text{ном}} = J_{\text{пр}} \frac{\omega_{\text{синх}}}{M_{\text{ном}}} = J_{\text{пр}} \frac{\omega_{\text{синх}}\omega_{\text{ном}}}{P_{\text{ном}}} \approx J_{\text{пр}} \frac{\omega^2_{\text{синх}}}{P_{\text{ном}}}, \qquad (4)$$

где $\omega_{\text{синх}}$ и $\omega_{\text{ном}}$ — соответственно синхронная и номинальная угловые скорости, $с^{-1}$; $M_{\text{ном}}$ — номинальный вращающий момент двигателя, Н·м; $P_{\text{ном}}$ — номинальная мощность, Вт; $J_{\text{пр}}$ — приведенный момент инерции, кг·м^2.

Угловая скорость ω может быть выражена через частоту вращения n, об/мин: $\omega = 2\pi n/60$.

В дальнейшем, если это не оговорено особо, все величины, кроме времени, выражены в относительных единицах. Время выражается в секундах или радианах [1 рад $= 1/(2\pi f)$ с]. В качестве базовых величин принимаются:

номинальный вращающий момент двигателя;

синхронная угловая скорость (для отдельно стоящего возбудительного агрегата — угловая скорость в рабочем режиме);

номинальный ток и напряжение статора двигателя или возбудителя;

ток возбуждения синхронного двигателя или возбудителя, обеспечивающий при номинальной угловой скорости значение ЭДС в обмотке статора или якоря, равное номинальному напряжению при холостом ходе;

сопротивление обмоток возбуждения синхронных двигателей и вращающихся возбудителей.

Момент сопротивления различных механизмов в общем виде выражается формулой

$$M_c = M_{\text{тр}} + (k_з M_{\text{ном}} - M_{\text{тр}})\,(\omega/\omega_{\text{синх}})^{\gamma},$$

или, если перейти к относительным единицам,

$$m_c = m_{\text{тр}} + (k_з - m_{\text{тр}})\,\omega^{\gamma}. \qquad (5)$$

где $m_{\text{тр}}$ — начальный момент при $s=1$ или $\omega=0$, обычно определяемый силами трения; $k_з$ — коэффициент загрузки двигателя при синхронной угловой скорости (момент сопротивления механизма при $\omega=1$, выраженный в долях номинального момента двигателя); γ — показатель степени, характеризующий данный механизм.

Из (3) и (5) получаем

$$-m_{\text{тр}} - (k_з - m_{\text{тр}})\,\omega^{\gamma} = \tau_{j,\,\text{ном}} \frac{d\omega}{dt}. \qquad (6)$$

Для механизмов с практически постоянным моментом сопротивления (транспортеров, дробилок, шаровых мельниц, поршневых компрессоров и т. д.) показатель степени $\gamma=0$. Тогда из (6) получаем зависимость угловой скорости от времени свободного выбега

$$\omega = \omega_н - \frac{k_з}{\tau_{j,\,\text{ном}}}\,t \approx 1 - \frac{t}{\tau_j}, \qquad (7)$$

где $\omega_н$ — начальная (при $t=0$) угловая скорость, $\omega_н \approx 1$; τ_j — время замедления (механическая постоянная времени) агрегата с постоянной нагрузкой, равной $k_з$:

$$\tau_j = \tau_{j,\text{ном}}/k_з. \qquad (8)$$

Для механизмов с моментом сопротивления, пропорциональным угловой скорости (генератора постоянного тока, работающего на постоянное сопротивление, и др.), $\gamma=1$, и из (6) получаем

$$\omega = \left(1 + \frac{m'_{\text{тр}}}{1 - m'_{\text{тр}}}\right) e^{-\frac{t}{\tau'_j}} - \frac{m'_{\text{тр}}}{1 - m'_{\text{тр}}}, \qquad (9)$$

где $m'_{\text{тр}} = m_{\text{тр}}/k_з$; $\tau'_j = \tau_j/(1 - m'_{\text{тр}})$.

Если момент трения $m_{\text{тр}} \ll k_з$ и им можно пренебречь, то формула (9) приобретает вид

$$\omega = e^{-\frac{t}{\tau_j}}. \qquad (9а)$$

Для механизмов с «вентиляторной» механической характеристикой, у которых момент сопротивления пропорционален квадрату угловой скорости (вентиляторов, дымососов, газодувок, некоторых центробежных насосов, гребных винтов и т. д.), $\gamma=2$, и из (6) получаем

$$\omega = \frac{\sqrt{\dfrac{m'_{\text{тр}}}{1 - m'_{\text{тр}}}}\left(1 + \dfrac{m'_{\text{тр}}}{1 - m'_{\text{тр}}}\right)}{\sqrt{\dfrac{m'_{\text{тр}}}{1 - m'_{\text{тр}}}} + \operatorname{tg}\dfrac{t}{\tau''_j}} - \frac{m'_{\text{тр}}}{1 - m'_{\text{тр}}}, \qquad (10)$$

где

$$\tau''_j = \frac{\tau'_j}{\sqrt{\dfrac{m'_{\text{тр}}}{1 - m'_{\text{тр}}}}} = \frac{\tau_j}{\sqrt{m'_{\text{тр}}(1 - m'_{\text{тр}})}}.$$

Если момент сил трения невелик и им можно пренебречь, то формула (10) приобретает вид

$$\omega = \frac{1}{1 + t/\tau_j}. \qquad (10а)$$

В общем случае при $\gamma \neq 1$ и $m_c = 0$ получим

$$\omega = \sqrt[\gamma-1]{\frac{1}{1 + (\gamma - 1)\frac{t}{\tau_j}}}. \qquad (10б)$$

На рис. 1 приведены зависимости угловой скорости от времени свободного выбега агрегатов, имеющих различные механические характеристики, но одинаковую постоянную времени выбега, равную τ_j. Из рисунка видно, что их выбег в начальной стадии происходит одинаково. Следовательно, если время перерыва электроснабжения мало по сравнению с τ_j, то изменение угловой скорости при выбеге можно выразить любой из формул (7), (9) и (10). В дальнейшем угловая скорость снижается тем медленнее, чем больше показатель γ и чем меньше силы трения.

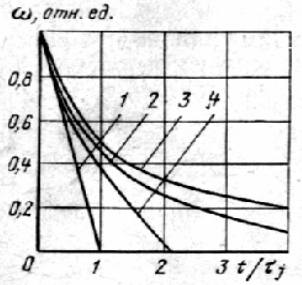


Рис. 1. Изменение угловой скорости при выбеге различных агрегатов:
1 — $\gamma=0$; 2 — $\gamma=1$, $m_{тр}=0$; 3 — $\gamma=2$, $m_{тр}=0$; 4 — $\gamma=2$, $m_{тр}=0{,}3$

Коэффициент загрузки двигателя существенно влияет на выбег агрегата. На рис. 2,*а* приведены кривые изменения угловой скорости при выбеге для механизма с посто-

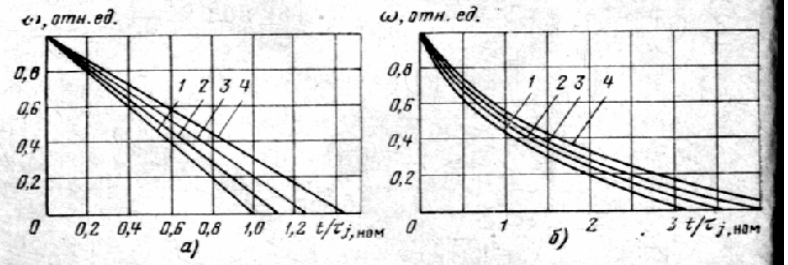


Рис. 2. Изменение угловой скорости при выбеге агрегатов с различными коэффициентами загрузки:
а — $\gamma=0$; *б* — $\gamma=2$, $m_{тр}=0{,}15$; 1 — $k_з=1{,}0$; 2 — $k_з=0{,}9$; 3 — $k_з=0{,}8$; 4 — $k_з=0{,}7$

янным моментом сопротивления при различной загрузке двигателя до отключения, построенные согласно (7). Этими кривыми можно пользоваться для определения остаточной угловой скорости агрегата графическим способом.

Аналогичные кривые для механизмов с вентиляторными механическими характеристиками, построенные согласно (10), при наиболее часто встречающемся значении начального момента $m_{тр}=0{,}15$ приведены на рис. 2,*б*.

Таким образом, снижение угловой скорости агрегата при свободном выбеге происходит тем медленнее, чем больше момент инерции, начальная угловая скорость и показатель степени γ и чем меньше загрузка двигателя в рабочем режиме.

4. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ СВОБОДНОМ ВЫБЕГЕ

Как следует из формулы (1), значение ЭДС, развиваемой свободно выбегающим двигателем, оказывает решающее влияния на ток включения при восстановлении электроснабжения.

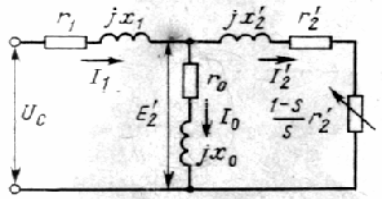


Рис. 3. Схема замещения асинхронного двигателя

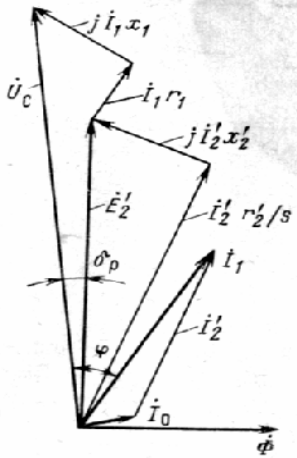


Рис. 4. Векторная диаграмма асинхронного двигателя

Схема замещения и векторная диаграмма асинхронного двигателя при установившемся режиме представлены на рис. 3 и 4 [2], откуда следует, что ЭДС асинхронного двигателя меньше напряжения сети. Следовательно, при внезапном отключении от сети, когда ток в статоре исчезает практически мгновенно, напряжение на выводах статора двигателя уменьшается от $U_c = U_1$ до $E_д = E'_2$.

Величина E'_2 зависит от скольжения (рис. 3), а е действующее значение может быть определено по фор муле [2]

$$\frac{E_2'}{U_1}=\sqrt{\frac{\left(\frac{r_2'}{s}\right)^2+(x_2')^2}{\left(r_1+c_1\frac{r_2'}{s}\right)^2+(x_1+c_1x_2')^2}}. \quad (11)$$

Значение ЭДС асинхронного двигателя после отклю чения с достаточной для практики точностью можно опре делить по формуле (11) лишь в том случае, если отклю чение произошло при скольжении 0,15—0,01 в зависимо сти от типа и нагрузки, т. е. при достаточно большо угловой скорости. Тогда согласно (11) в момент отключе

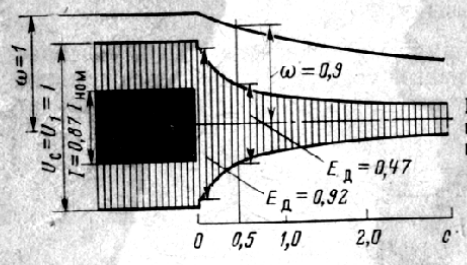


Рис. 5. Выбег асинхрон ного двигателя с водя ным насосом

ния от сети напряжение на выводах двигателя снижаетс от 1,0 (номинальное напряжение) до 0,86—0,95. Указан ное положение подтверждается многочисленными опыта ми. В дальнейшем ЭДС, развиваемая свободно выбегаю щим двигателем, затухает с постоянной времени

$$\tau_{ас.\ д}=\frac{x_0+x_2'}{2\pi f r_2'}.$$

При малых угловых скоростях эта формула может дат значительные погрешности. Точные формулы для расчет ЭДС при выбеге асинхронного двигателя сложны (см например, [3]) и для практических целей не использу ются.

На рис. 5 приведена осциллограмма ЭДС асинхронно го двигателя с номинальными параметрами 650 кВт, 6 кВ 77 А, 985 об/мин, $\cos\varphi=0,87$, $\eta=0,93$, выбегающего со вместно с водяным насосом при отключении от сети. И осциллограммы видно, что ЭДС в момент отключения со ставляет 0,9 напряжения сети и в дальнейшем затухае значительно быстрее, чем происходит снижение углово скорости. Так, через 0,5 с после отключения скорость со ставляет 0,9, а ЭДС — 0,47 номинального значения. В связи со сравнительно быстрым затуханием ЭДС свободно выбегающего асинхронного двигателя изменение ее фазы относительно напряжения сети большого значения не имеет.

Следует отметить, что некоторые авторы указывают на более высокие значения ЭДС при выбеге асинхронных двигателей. В частности, приводятся данные о том, что при первом попадании ЭДС в противофазу с напряжением сети, происходящем через 0,2—0,5 с, ЭДС двигателя еще достаточно велика и составляет 0,9—0,79 [3]. Однако такие данные нуждаются в дальнейшем теоретическом и экспериментальном обосновании.

Если асинхронный двигатель оборудован неотключаемой конденсаторной батареей для компенсации реактивной мощности, то при выбеге он будет самовозбуждаться и развивать ЭДС, близкую к номинальному напряжению, а иногда и больше. Однако такие двигатели используются очень редко и в самозапуске участвовать не должны. Обычно конденсаторные батареи подключаются к шинам подстанции через отдельные выключатели и на индивидуальный выбег двигателей влияния не оказывают.

В момент отключения от сети ЭДС на зажимах асинхронного двигателя с фазным ротором не отличается от ЭДС короткозамкнутого двигателя. В дальнейшем, если пусковое сопротивление вводится достаточно быстро, затухание ЭДС происходит еще более интенсивно. В каскадных схемах и двигателях двойного питания ЭДС при отключении зависит от схемы питания роторных цепей. В настоящее время самозапуск двигателей двойного питания осуществляется путем отключения ротора от схемы и включения его на разрядное сопротивление. При этом процесс самозапуска ничем не отличается от самозапуска двигателя с фазным ротором.

5. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ГЛУХОПОДКЛЮЧЕННЫМ ВОЗБУДИТЕЛЕМ ПРИ СВОБОДНОМ ВЫБЕГЕ

Синхронные двигатели работают, как правило, с перевозбуждением. При этом ЭДС превышает напряжение сети, и в случае отключения двигателя в первый момент напряжение на выводах статора возрастает. Если свободно выбегающий асинхронный двигатель не имеет источников намагничивающего тока, то в синхронном двигателе

возбуждение сохраняется. Поэтому ЭДС синхронного двигателя снижается значительно медленнее.

Сначала рассмотрим процессы, происходящие при свободном выбеге синхронного двигателя с отдельно стоящим вращающимся возбудителем, который отключается одновременно с отключением синхронного двигателя. При этом форсировка возбуждения отсутствует.

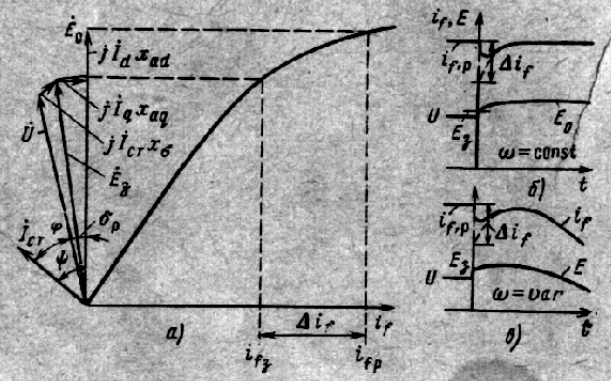


Рис. 6. Возникновение и изменение свободной составляющей тока в обмотке ротора при отключении перевозбужденной синхронной машины:

а — векторная диаграмма с учетом насыщения; *б* — отключение генератора; *в* — отключение двигателя

В рабочем режиме, предшествующем отключению, двигатель работает с током возбуждения $i_{f.р}$ (рис. 6). По характеристике холостого хода этому току возбуждения соответствует ЭДС E_0. Однако за счет реакции якоря ЭДС, созданная суммарным потоком в воздушном зазоре, $E_з$ отличается от E_0 по модулю и по фазе. При холостом ходе машины ЭДС $E_з$ была бы получена при токе возбуждения $i_{f,з}$. Электродвижущая сила воздушного зазора отличается от напряжения сети U на значение, равное падению напряжения в активном и индуктивном сопротивлениях рассеяния статора (рис. 6,*а*).

Можно считать, что в момент отключения при свободном выбеге ток статора и реакция якоря исчезают мгновенно. Но потокосцепление контуров ротора не может измениться сразу. Поэтому в первый момент на вынужденный ток возбуждения, определяемый возбудителем, накладывается свободная апериодическая составляющая. При отсутствии пусковой обмотки на роторе эта составляющая равна Δi_f (рис. 6,*б* и *в*). Если до отключения

двигателя вектор тока статора располагался в емкостном квадранте (рис. 6,*а*), то численно эта величина составит

$$\Delta i_f = -k_к i_{f,р} I_{ст} \sin \psi, \qquad (12)$$

где $I_{ст}$ — ток статора до отключения; $\psi = \varphi + \delta_р$ — угол между этим током и ЭДС E_0; $k_к$ — коэффициент, определяемый конструктивными параметрами машины:

$$k_к = \frac{m\sqrt{2}\, w_1 k_{об} k_{ad}}{\pi p w_f},$$

где m — число фаз статора; w_1, $k_{об}$ — число витков и обмоточный коэффициент статора; p — число пар полюсов; w_f — число витков обмотки возбуждения ротора на пару полюсов; $k_{ad} = \frac{\alpha\pi + \sin \alpha\pi}{4 \sin \alpha\pi/2}$ — коэффициент продольной реакции; α — коэффициент полюсного перекрытия машины.

В случае отключения от сети синхронного генератора, когда угловая скорость неизменна (рис. 6,*б*), ток возбуждения будет изменяться в соответствии с уравнением, полученным А. А. Горевым:

$$i_f = i_{f.р} + \Delta i_f e^{-\frac{t}{\tau_{d0}}},$$

где τ_{d0} — постоянная времени затухания потока ротора при разомкнутом статоре, с.

Одновременно с затуханием свободной составляющей тока возбуждения будет изменяться ЭДС двигателя от значения $E_з$ до значения E_0.

При наличии успокоительного контура свободная составляющая возникает как в обмотке возбуждения, так и в этом контуре (в пусковой обмотке). Однако на процесс затухания свободной составляющей в обмотке возбуждения пусковая обмотка практически не влияет, так как постоянные времени этих обмоток несоизмеримы (отличаются на один-два порядка). Различие тока возбуждения двигателей с шихтованными полюсами с пусковой обмоткой или без нее имеет место лишь в самом начале выбега — до 0,1—0,2 с. На рис. 6,*б* и *в* изменение тока возбуждения при отсутствии пусковой обмотки показано пунктирной линией, при наличии — сплошной. Характер изменения ЭДС статора в обоих случаях примерно одинаков, так как на изменение суммарного потокосцепления контуров ротора влияют токи обеих его обмоток. Последнее положение справедливо и для двигателей с массивными полюсами.

При отключении синхронного двигателя угловая скорость самого двигателя и возбудителя в общем случае уменьшается и ток возбуждения будет стремиться к значению $i_{f,в}$, определяемому возбудителем, т. е. к вынужденной составляющей (рис. 6,*в*):

$$i_f = i_{f,в} + \Delta i_f e^{-\frac{t}{\tau_{d0}}}. \qquad (13)$$

Вынужденную составляющую тока возбуждения можно найти из следующей системы уравнений:

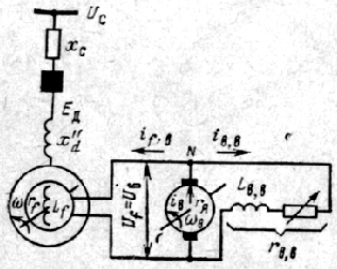


Рис. 7. Принципиальная схема синхронного двигателя с глухим подключением возбудителя

зависимости ЭДС возбудителя от тока возбуждения и угловой скорости возбудителя;

уравнения ЭДС в цепи якоря возбудителя;

уравнения напряжений в цепи обмотки возбуждения возбудителя;

уравнения напряжений в цепи обмотки возбуждения синхронного двигателя;

уравнение токов в точке *N* (рис. 7).

Точное решение этой системы уравнений очень сложно и возможно с применением вычислительной техники. Для получения практической методики расчета можно принять некоторые допущения.

Характеристика холостого хода при номинальной угловой скорости возбудителя синхронного двигателя наиболее точно описывается уравнением вида [1]

$$E = \frac{a + bi_{в,в} + ci^2_{в,в}}{1 + di_{в,в} + ei^2_{в,в}}. \qquad (14)$$

Если пренебречь влиянием остаточного магнетизма и учесть, что возбудитель работает в основном с напряжением ниже номинального, то усредненную характеристику холостого хода возбудителя можно выразить в виде [1]

$$E = \frac{1{,}4i_{в,в}}{1 + 0{,}4i_{в,в}}, \qquad (14а)$$

где $i_{в,в}$ — ток возбуждения возбудителя, отн. ед. (за единицу принимается такое его значение $i_{в,в\,1}$, при котором напряжение возбудителя на холостом ходу равно номинальному $U_{в,ном}$).

Практически без ущерба для точности можно пренебречь сопротивлением якоря возбудителя (тогда ЭДС возбудителя равна его напряжению), а также постоянной времени обмотки возбуждения возбудителя. С учетом изложенного исходная система уравнений для определения вынужденной составляющей тока ротора будет состоять из трех уравнений:

1) уравнения напряжений в цепи обмотки возбуждения двигателя

$$L_f \frac{di_{f,в}}{dt} + r_f i_{f,в} = U_f, \qquad (15)$$

или в относительных единицах (после деления обеих частей уравнения на $r_f I_{f1} = U_{f1}$ — напряжение на кольцах ротора, при котором напряжение статора при холостом ходе равно номинальному)

$$\tau_{d0} \frac{di_{f,в}}{dt} + i_{f,в} = U_в \left(\frac{U_{в,ном}}{U_{f1}}\right), \qquad (15а)$$

где $U_в = U_f / U_{в,ном}$ — относительное значение напряжения возбудителя;

2) уравнения напряжений в цепи обмотки возбуждения возбудителя (рис. 7), отн. ед.

$$i_{в,в} = U_в / r_{в,в}, \qquad (16)$$

где $r_{в,в}$ — сопротивление цепи возбуждения возбудителя, т. е. его обмотки возбуждения и резистора (за единицу принимается значение сопротивления $r_{в,в\,1} = U_{в,ном}/i_{в,в1}$).

3) зависимости напряжения возбудителя от тока возбуждения возбудителя и скорости

$$U_в = \frac{1{,}4i_{в,в}}{1 + 0{,}4i_{в,в}} \omega_в(t), \qquad (17)$$

где $\omega_в(t)$ — аналитическое выражение закона изменения угловой скорости возбудителя при его выбеге.

В рассматриваемом случае возбудителем является генератор, работающий на постоянное сопротивление. Такой агрегат представляет собой классический пример выбега по экспоненциальному закону, что соответствует $\gamma = 1$. Тогда согласно (9а)

$$\omega_в(t) = e^{-\frac{t}{\tau_{j,в}}},$$

где $\tau_{j,в}$ — постоянная времени выбега возбудительного агрегата.

Система уравнений (15) — (17) будет справедлива до тех пор, пока угловая скорость возбудителя не снизится

до критической, т. е. пока возбудитель не потеряет способность к самовозбуждению. Обозначим через t_1 момент времени, в который напряжение возбудителя станет равным нулю (точнее — снизится до значения, определяемого остаточным магнетизмом).

Из (16) и (17) с учетом (9а) получаем

$$U_{\text{в}} = 3{,}5e^{-\frac{t}{\tau_{j,\text{в}}}} - 2{,}5r_{\text{в. в}}.$$

В момент времени t_1 $U_{\text{в}}=0$, откуда

$$t_1 = -\tau_{j,\text{в}} \ln(0{,}71\, r_{\text{в,в}}). \qquad (18)$$

При $r_{\text{в,в}} > 1{,}4$ (больше критического значения) возбудитель не возбуждается и тогда $U_{\text{в}}=0$ уже при $t=0$.

Начальные условия к системе уравнений (15) — (17): $t=0$, $i_{f,\text{в}}=i_{f,\text{р}}$, где $i_{f,\text{р}}$ — ток возбуждения в рабочем режиме до отключения двигателя (рис. 6), отн. ед. (за единицу тока возбуждения принимается значение I_{f1}, при котором ЭДС по характеристике холостого хода синхронного двигателя равна номинальному напряжению статора).

Таким образом, для интервала времени от 0 до t_1 получаем

$$i_{f,\text{в}}\Big|_0^{t_1} = Fe^{-\frac{t}{\tau_{j,\text{в}}}} + Ge^{-\frac{t}{\tau_{d0}}} - H, \qquad (19)$$

где

$$F = \frac{3{,}5\tau_{j,\text{в}}}{\tau_{j,\text{в}} - \tau_{d0}}\left(\frac{U_{\text{в, ном}}}{U_{f1}}\right);$$

$$G = i_{f,\text{р}} - \left(\frac{3{,}5\tau_{j,\text{в}}}{\tau_{j,\text{в}} - \tau_{d0}} - 2{,}5r_{\text{в. в}}\right)\left(\frac{U_{\text{в, ном}}}{U_{f1}}\right);$$

$$H = 2{,}5r_{\text{в. в}}\left(\frac{U_{\text{в, ном}}}{U_{f1}}\right).$$

Если $\tau_{j,\text{в}} = \tau_{d0}$, то из (15) — (17) получаем

$$i_{f,\text{в}}\Big|_0^{t_1} = k_1 te^{-\frac{t}{\tau_{d0}}} + k_2 e^{-\frac{t}{\tau_{d0}}} - H, \qquad (19а)$$

где

$$k_1 = \frac{3{,}5}{\tau_{d0}}\left(\frac{U_{\text{в, ном}}}{U_{f1}}\right).$$

$$k_2 = i_{f,\text{р}} + 2{,}5r_{\text{в. в}}\left(\frac{U_{\text{в, ном}}}{U_{f1}}\right).$$

В момент времени t_1 вынужденная составляющая тока ротора по формуле (19) достигает значения $i_{f,\text{в}1}$ и в дальнейшем будет изменяться по закону

$$i_{f,\text{в}}\big|_{t_1} = i_{f,\text{в}1}e^{-\frac{t-t_1}{\tau_{d0}}}. \qquad (20)$$

Зная $i_{f,\text{в}}$, по (13) определяем ток ротора с учетом свободной составляющей. По характеристике холостого хода синхронной машины и характеристике выбега агрегата определяем ЭДС, развиваемую двигателем при свободном выбеге. Нормальную характеристику холостого хода синхронной машины можно выразить формулой (14) при коэффициентах $a=0{,}03$, $b=0{,}21$, $c=6{,}5$, $d=2{,}03$, $e=3{,}7$ [1]. Аналитическое выражение изменения угловой скорости при выбеге агрегата определяется в соответствии с § 3. Таким образом, ЭДС синхронного двигателя при свободном выбеге равна

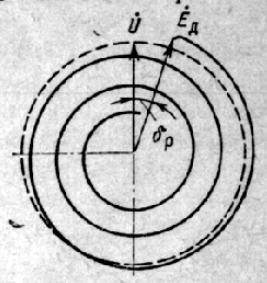


Рис. 8. Изменение ЭДС свободно выбегающего синхронного двигателя

$$E_q = \frac{0{,}03 + 0{,}21i_f + 6{,}5i_f^2}{1 + 2{,}03i_f + 3{,}7i_f^2}\,\omega(t). \qquad (21)$$

Электродвижущая сила свободно выбегающего двигателя непрерывно меняется не только по модулю, но и по фазе относительно напряжения сети. Если вектор напряжения сети принять неподвижным в пространстве, то вектор ЭДС двигателя будет вращаться относительно него, описывая своим концом затухающую спираль (рис. 8). Угол δ между указанными векторами можно определить, если имеется зависимость угловой скорости от времени выбега.

При графоаналитическом определении угла δ кривая разбивается на равные участки по времени Δt (десятые доли секунды), определяется средняя угловая скорость на каждом участке $\omega_{\text{ср},k}$, но не в относительных единицах, а в радианах в секунду (рад/с). Угол между векторами остаточной ЭДС двигателя и напряжения сети в конце каждого участка определяется по формуле

$$\delta_k = \delta_{k-1} + p\omega_{\text{ср},k}\Delta t,$$

где δ_{k-1} — угол в конце предыдущего участка, рад; p — число пар полюсов, причем для первого участка $\delta_{k-1}=\delta_{\text{р}}$ (см. рис. 6,*а*).

Можно определить угол δ и аналитически. Обозначим уравнение выбега двигателя в общем виде $\omega=\omega(t)$. Известно, что угловая скорость — это производная угла поворота ротора. Но так как нас интересует угол поворота относительно вектора напряжения сети, синхрон-

но вращающегося с угловой скоростью $\omega_{синх}$, то производная угла δ представляет собой

$$\frac{d\delta}{dt} = p\,[\omega_{синх} - \omega(t)].$$

Тогда для угла поворота, рад, в общем виде имеем

$$\delta = p\omega_{синх}t - p\int_0^t \omega(t)dt + \delta_р, \qquad (22)$$

где $p\omega_{синх} = 2\pi f = 314$ рад/с.

Для механизма с моментом сопротивления, не зависящим от скорости, уравнение (22) с учетом (7) примет вид

$$\frac{d\delta}{dt} = p\omega_{синх}\frac{t}{\tau_j}$$

и зависимость угла δ от времени будет следующей:

$$\delta = \frac{p\omega_{синх}}{2\tau_j}t^2 + \delta_р. \qquad (23)$$

Для механизмов с моментом сопротивления, пропорциональным скорости, из (22) с учетом (9) имеем

$$\delta = \frac{p\omega_{синх}}{1 - m'_{тр}}\left[t - \tau_j\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_j}}\right)\right] + \delta_р. \qquad (24)$$

Если же постоянная составляющая момента сопротивления мала, то $m'_{тр} = 0$;

$$\delta = p\omega_{синх}\left[t - \tau_j\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_j}}\right)\right] + \delta_р. \qquad (24а)$$

Для механизмов с вентиляторным моментом сопротивления из (22) с учетом (10) получаем

$$\delta = p\omega_{синх}\left[t - \sqrt{\frac{m'_{тр}}{1 - m'_{тр}}}\tau''_j \ln\left(\cos\frac{t}{\tau_j'} + \frac{1}{\sqrt{\frac{m'_{тр}}{1 - m'_{тр}}}}\sin\frac{t}{\tau_j}\right)\right] + \delta_р. \qquad (25)$$

Если $m_{тр} \ll k_а$ и им можно пренебречь, то из (22) с учетом (10а) получаем

$$\delta = p\omega_{синх}\left[t - \tau_j \ln\left(1 + \frac{t}{\tau_j}\right)\right] + \delta_р. \qquad (25а)$$

6. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С РАЗЛИЧНЫМИ СИСТЕМАМИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ СВОБОДНОМ ВЫБЕГЕ

В настоящее время синхронные двигатели используются с вращающимися и статическими возбудителями, а также с бесщеточным возбуждением.

В литературе можно встретить качественные оценки влияния различных схем возбуждения на ЭДС синхронного двигателя при выбеге. Однако они, как правило, субъективны и нередко приводят к ошибочным выводам. На основе методики, изложенной в § 5, можно выполнить количественное сравнение изменения ЭДС при выбеге для разных систем возбуждения. Рассмотрим сначала одиночный выбег синхронного двигателя.

В синхронном двигателе с малым числом полюсов вращающийся возбудитель в большинстве случаев находится с ним на одном валу. Тогда при отключении двигателя от сети угловые скорости возбудителя и двигателя изменяются по одному и тому же закону и равны между собой, т. е. $\omega_в(t) = \omega(t)$. Тем не менее методика, полученная в § 5 для случая, когда возбудитель выбегает по экспоненциальному закону, т. е. при $\gamma = 1$, справедлива и для других характеристик выбега возбудителя. Такое утверждение правомерно, так как формулы (17) и (19) действительны согласно (18) в сравнительно небольшом интервале времени — до t_1, которое не превышает $0{,}25\,\tau_{j,в}$ (при максимальной форсировке возбуждения — до $0{,}48\,\tau_{j,в}$), а угловая скорость различных механизмов в начале выбега изменяется практически одинаково (см. рис. 1). Иными словами, напряжение возбудителя снижается практически до нуля раньше, чем начинает проявляться разница в характеристике его выбега. В приводимом ниже примере расчета (см. приложение 1) время t_1 составляет 0,89 с, а формулы (9а) экспоненциального выбега при $\gamma = 1$ и (10)—(10а) фактического выбега при $\gamma = 2$ обеспечивают одинаковые результаты в интервале времени до 1,5 с, т. е. почти вдвое больше необходимого.

При срабатывании форсировки возбуждения в процессе выбега характер изменения ЭДС в принципе остается тем же. Форсировка, как правило, срабатывает при существенном (до 0,7—0,8) снижении напряжения на зажимах двигателя. Во многих случаях время восстановления электроснабжения меньше времени, необходимого для снижения ЭДС двигателя до указанного значения, и тогда форсировка возбуждения вообще не влияет на ток включения.

Если форсировка возбуждения срабатывает достаточно быстро, ее влияние можно учесть изменением сопротивления цепи возбуждения возбудителя. Новое значение $r_{в,в,ф}$ будет находиться в пределах $1 \leqslant r_{в,в,ф} < r_{в,в}$. Закон изменения вынужденной составляющей тока ротора будет

определяться теми же уравнениями (19) и (20), но после момента срабатывания форсировки t_2 в уравнении (19) изменяются коэффициенты G (или k_2) и H. При определении этих коэффициентов после момента времени t_2 следует принять $i_{f,\text{р,ф}}=i_{f,\text{р}}r_{\text{в,в}}/r_{\text{в,в,ф}}$. Уравнение (19) после срабатывания форсировки будет справедливо до момента времени $t_3=-\tau_{j,\text{в}}\ln(0{,}71\,r_{\text{в,в,ф}})$. В момент t_3 значение $i_{f,\text{в}}$ достигнет значения $i_{f,\text{в3}}$ и дальше будет изменяться в соответствии с (20). Если $t_2>t_3$, то форсировка возбуждения на процесс изменения ЭДС не влияет.

Хотя замыкание обмотки ротора накоротко при отключении синхронного двигателя практически не используется, тем не менее некоторые реальные случаи аналогичны такому режиму. Например, близкий к этому режим возникает при выбеге двигателя с простейшей бесщеточной системой возбуждения, когда при отключении от сети подача возбуждения прекращается, а разрядное сопротивление отсутствует. В идеальном случае, когда обмотка ротора закорачивается в момент отключения двигателя от сети, напряжение $U_f=0$ и уравнение (15) решается без правой части. Вынужденная составляющая тока ротора будет изменяться в соответствии с формулой (20) уже с первого момента времени:

$$i_{f,\text{в}}=i_{f,\text{р}}e^{-\frac{t}{\tau_{d0}}}. \qquad (26)$$

В остальном расчет не отличается от предыдущего, т. е. ведется по (12), (13) и (21). Из (23) следует, что

$$i_f=(i_{f,\text{р}}+\Delta i_f)\,e^{-\frac{t}{\tau_{d0}}}. \qquad (27)$$

Очень часто для более быстрого гашения поля и при вращающемся, и при статическом возбудителе в цепь ротора включается разрядный резистор. При кратности разрядного сопротивления $R_\text{р}$ по отношению к сопротивлению обмотки возбуждения r_f, равной $k_R=R_\text{р}/r_f$, постоянная времени τ_{d0} уменьшается до значения

$$\tau_{d0R}=\frac{\tau_{d0}}{1+k_R}. \qquad (28)$$

Схема с разрядным резистором служит не только для более интенсивного гашения поля при отключении двигателя, но главным образом для улучшения его пусковых характеристик и условий вхождения в синхронизм, что будет рассмотрено в § 13 и 14.

Если статический возбудитель выполнен по несимметричной мостовой схеме (одна группа вентилей управляемая, другая — неуправляемая, например СПВУ), гашение поля осуществляется отключением обмотки возбуждения от возбудителя и подключением ее к разрядному сопротивлению с помощью контактора *КМ* (рис. 9,*а*). Тогда вынужденная составляющая тока ротора приобретает вид, аналогичный (26), но с учетом (28)

$$i_{f,\text{в}}=i_{f,\text{р}}e^{-\frac{t}{\tau_{d0R}}}, \qquad (29)$$

ток обмотки возбуждения

$$i_f=(i_{f,\text{р}}+\Delta i_f)\,e^{-\frac{t}{\tau_{d0R}}} \qquad (30)$$

и расчет не отличается от предыдущего случая.

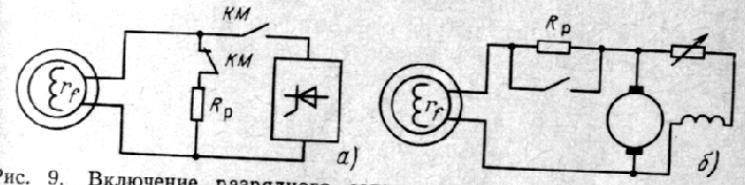


Рис. 9. Включение разрядного сопротивления в ротор синхронного двигателя:

а — с отключением возбудителя; *б* — последовательно с вращающимся возбудителем

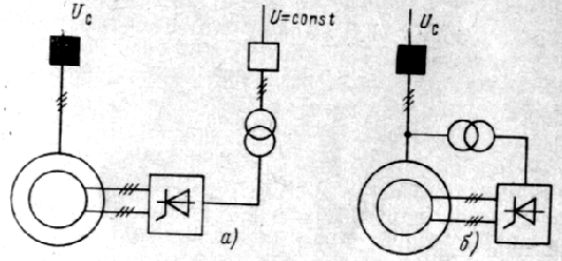


Рис. 10. Включение статического возбудителя синхронного двигателя:

а — к соседней секции; *б* — к общему выключателю с синхронным двигателем

При вращающемся возбудителе разрядный резистор включается либо по схеме рис. 9,*а*, либо последовательно с возбудителем (рис. 9,*б*). Во втором случае цепь ротор—возбудитель во всех режимах не разрывается (так называемая «схема с постоянным включением возбудителя»).

В синхронном режиме разрядный резистор зашунтирован; при пуске или потере синхронизма шунтирующий контакт размыкается. Тогда расчет ЭДС двигателя при выбеге выполняется, как описано в § 5, но вместо τ_{d0} везде подставляется τ_{d0R}.

Если возбудителем служит тиристорный преобразователь, выполненный по симметричной мостовой схеме с полным регулированием (например ТВУ), то при выбеге синхронного двигателя он подает напряжение обратного знака. В том случае, когда возбудитель включен на секцию шин, сохранившую питание (рис. 10,*а*), к ротору прикладывается напряжение, равное номинальному напряжению возбудителя $U_{в,ном}$ при полностью открытых тиристорах, которое может быть принято неизменным. Относительное значение напряжения возбудителя в (15а) принимается с обратным знаком и равно $U_в = -1{,}0$. Таким образом, в уравнениях (15) правая часть представляет собой отрицательную постоянную величину. Вынужденная составляющая тока ротора синхронного двигателя

$$i_{f,в} = i_{f,р} e^{-\frac{t}{\tau_{d0}}} - \left(\frac{U_{в,ном}}{U_{f1}}\right)\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{d0}}}\right) =$$

$$= \left(i_{f,р} + \frac{U_{в,ном}}{U_{f1}}\right) e^{-\frac{t}{\tau_{d0}}} - \frac{U_{в,ном}}{U_{f1}}, \qquad (31)$$

где $U_{в,ном}$ и U_{f1} — в вольтах.

С учетом (31) из (13) для тока обмотки ротора получаем

$$i_f = \left(i_{f,р} + \Delta i_f + \frac{U_{в,ном}}{U_{f1}}\right) e^{-\frac{t}{\tau_{d0}}} - \frac{U_{в,ном}}{U_{f1}}. \qquad (32)$$

Напряжение обратного знака, определенное по (21), подается на кольца ротора до тех пор, пока ток в обмотке возбуждения двигателя i_f не станет равным нулю, после чего реверсивное действие возбудителя прекращается и в дальнейшем $U_f = 0$, $i_{f,в} = 0$, $i_f = 0$.

Если возбудитель подключен к той же секции шин, что и синхронный двигатель (рис. 10,*б*), то в относительных единицах абсолютные значения ЭДС двигателя и напряжения возбудителя равны, т. е.

$$U_в = -E_q, \qquad (33)$$

и ток ротора определяется системой уравнений (13), (15а), (21) и (30). Эта система может быть решена

аналитическом виде, однако конечное выражение получается весьма громоздким, при необходимости решение может быть получено на ЭВМ. Зависимость ЭДС двигателя от времени с момента отключения лежит ниже кривой для КЗ обмотки возбуждения и выше, чем при питании тиристорного возбудителя от соседней секции.

Выбег синхронного двигателя с различными системами возбуждения лучше всего рассмотреть на каком-либо конкретном примере. В приложении 1 выполнен расчет ЭДС двигателя с номинальными параметрами 1350 кВт,

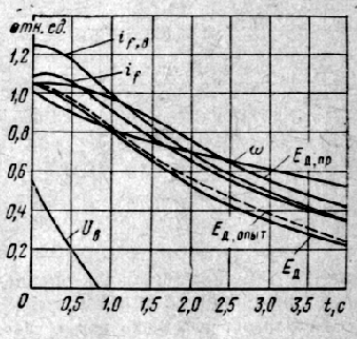


Рис. 11. Расчетные зависимости ЭДС двигателя $E_д$; ЭДС, приведенной к синхронной скорости $E_{д,пр}$; тока возбуждения i_f; вынужденной составляющей тока ротора, определяемой возбудителем, $i_{f,в}$; напряжения возбудителя $U_в$ и угловой скорости ω при выбеге синхронного двигателя

6 кВ, 1000 об/мин. Расчет выполнен для наиболее медленного затухания ЭДС, имеющего место при выбеге ненагруженного агрегата. Агрегат имеет «вентиляторную» механическую характеристику.

На рис. 11 по данным табл. П1 приведены расчетные зависимости всех промежуточных величин от времени с момента отключения двигателя для вращающегося возбудителя, находящегося на одном валу с двигателем и глухо подключенного к обмотке ротора. На этом же рисунке приведена зависимость ЭДС двигателя при выбеге, полученная опытным путем. Как видно из результатов, ошибка в расчетном определении ЭДС не превышает 0,04, т. е. находится в пределах точности эксперимента.

Из табл. П2 примера расчета следует, что учет момента трения практически не влияет на расчет угловой скорости, а следовательно, и на расчет ЭДС синхронного двигателя при выбеге.

Расчет, выполненный аналогичным образом для различных значений постоянной времени τ_j, показывает, что ошибка в ее определении в пределах ±10% также не приводит к существенной погрешности при расчете ЭДС двигателя (рис. 12).

На рис. 13 по результатам расчета приведены зависи мости ЭДС двигателя от времени с момента отключени при разных системах возбуждения. Как видно из рисунка наиболее длительно ЭДС поддерживается двигателем имеющим на своем валу глухоподключенный возбудител

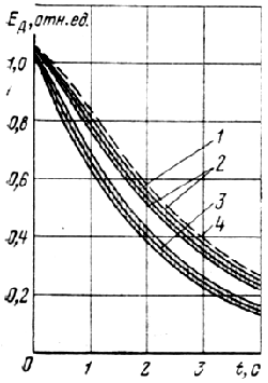


Рис. 12

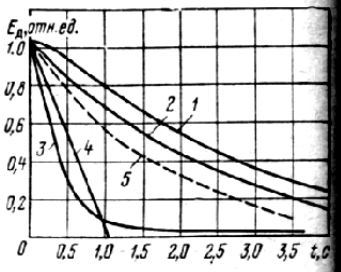


Рис. 13

Рис. 12. Влияние ошибки в определении τ_j агрегата на расчетную вел чину синхронного двигателя;

1 — расчетная зависимость при τ_j=5 с; *2* — то же при τ_j=5 с±10 %; *3* — то ж при τ_j=2,55 с; *4* — опытная зависимость при τ_j=5 с

Рис. 13. ЭДС синхронного двигателя при свободном выбеге:

1 — с вращающимся возбудителем; *2* — с закороченной обмоткой ротора; *3* — обмоткой ротора, замкнутой на разрядное сопротивление; *4* — со статически возбудителем, подающим в обмотку ротора неизменное напряжение обратно знака; *5* — возбудитель подключен к тому же источнику, что и двигатель

(кривая *1*). Почти так же медленно процесс затухани ЭДС происходит при замыкании обмотки ротора накоро ко (кривая *2*).

Наиболее интенсивно снижается ЭДС двигателя пр замыкании обмотки ротора на разрядное сопротивлени (кривая *3*). Этот результат опровергает распространенно мнение, что наиболее эффективно снижение ЭДС двига теля происходит при инверторном режиме статическо возбудителя с симметричной мостовой схемой. Как видн из рисунка, даже при питании возбудителя от источник неизменного напряжения и подаче в обмотку ротора по ного отрицательного напряжения (кривая *4*) ЭДС снижа ется медленнее, чем при замыкании обмотки ротора н разрядное сопротивление. Это происходит потому, чт при подаче на обмотку ротора отрицательного напряже ния постоянная времени изменения тока ротора остаето

равной τ_{d0}, а при замыкании на разрядное сопротивление резко снижается до τ_{d0R}.

Следует отметить, что в настоящее время перевод статического возбудителя в инверторный режим осуществляется электронными переключателями, а переключение обмотки ротора синхронного двигателя на разрядное сопротивление — с помощью контактора. Поэтому на практике для снижения ЭДС двигателя при переключении обмотки ротора на разрядное сопротивление требуется несколько большее время. Однако с внедрением быстродействующей переключающей аппаратуры, в том числе электронной, это явление перестает сказываться на характере процесса.

С другой стороны, если тиристорный возбудитель подключен к тому же источнику, что и двигатель, то при инвертировании возбудителя снижение ЭДС двигателя значительно замедляется (кривая *5*). В тех случаях, когда нарушение питания происходит вследствие КЗ в сети или при других режимах, приводящих к потере питания на тиристорном возбудителе, интенсивное гашение поля путем инвертирования возбудителя вообще невозможно.

Таким образом, с точки зрения быстроты снижения остаточного напряжения на шинах, к которым подключены синхронные двигатели, статические возбудители с симметричной мостовой схемой не имеют преимуществ перед возбудителями с несимметричной схемой.

Следует отметить, что на практике нет необходимости гасить поле ротора полностью. Достаточно напряжение на двигателе довести до значения 0,5—0,6, при котором в большинстве случаев допускается несинхронное включение. Время гашения поля до этого напряжения при статическом возбудителе и обычной форсировке возбуждения 1,75 составляет примерно 0,2 с. Некоторые типы симметричных мостовых тиристорных возбудителей не всегда позволяют осуществить форсированное гашение поля в условиях пониженного напряжения, так как при этом происходит срыв инвертирования и процесс гашения поля затягивается до 1—2 с. Для обеспечения эффективного гашения поля можно применить задержку на отпадание пускателя силовых цепей тиристорного возбудителя (§ 20) либо питание блоков управления переключать на резервный источник непосредственно от пускового органа АВР.

Что касается расчетного определения фазы ЭДС двигателя относительно напряжения сети по (25), то оно обеспечивает достаточно точный результат только в течение нескольких (до 10—20) периодов, так

как даже небольшая ошибка в расчетном определении угловой скорости, накапливаясь, создает значительную ошибку в определении угла поворота.

7. ГРУППОВОЙ ВЫБЕГ И ВЫБЕГ ПРИ ПОДПИТКЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Групповой выбег происходит при одновременном отключении нескольких двигателей, связанных друг с другом через общие шины, отключившиеся от сети. Двигатели, имеющие больший запас кинетической энергии, переходят в генераторный режим работы и имеют дополнительный тормозной момент по сравнению со свободным выбегом. Двигатели с меньшим запасом кинетической энергии получают дополнительный двигательный момент (за счет подпитки от первой группы машин). На общих шинах имеется напряжение значение и частота которого уменьшаются по мере уменьшения угловой скорости. В пределах условий, обеспечивающих необходимую устойчивость, выбег всех агрегатов в первое время происходит по одному закону с общим значением τ_j. Практика показывает, что устойчивость при групповом выбеге обеспечивается достаточно долго если сопротивление сети, соединяющей двигатели, невелико (между двигателями нет реакторов и трансформаторов). С уменьшением напряжения синхронный выбег нарушается и при напряжении примерно $0{,}25\,U_{ном}$ полностью прекращается и дальше идет как индивидуальный для каждого двигателя.

Может быть несколько вариантов группового выбега. Наиболее простой из них — выбег одинаковых двигателей с одинаковыми механизмами. Здесь групповой выбег происходит так же, как и при индивидуальном выбеге каждого агрегата.

Несколько сложнее групповой выбег агрегатов с одинаковым характером механических характеристик (например, если момент сопротивления всех механизмов пропорционален квадрату угловой скорости), но различных по мощности, нагрузке и моменту инерции. В этом случае вид уравнения выбега не изменится по сравнению с одиночным выбегом, но значение τ_j станет одинаковым для всех агрегатов. В соответствии с формулой (4), выразив все величины в указанной размерности, для эквивалентного значения времени замедления группы механизмов получим

$$\tau_{j,э} = \frac{\sum_{i=1}^{n} J_i \omega^2_{синх,i}}{\sum_{i=1}^{n} P_{ном,i}}, \qquad (34)$$

где n — общее количество агрегатов.

Если группа состоит из механизмов с различными механическими характеристиками, но преобладают (по установленной мощности) механизмы с каким-то одним видом ее (например, с вентиляторным моментом), то для определения угловой скорости при групповом выбеге можно воспользоваться уравнением выбега для данной, преобладающей части, например (10), определив $\tau_{j,э}$ по (34). Если механизмы с различным характером зависимости момента сопротивления от скорости представлены в равной мере, целесообразно принять уравнение выбега в среднем виде, например по (9).

Процесс группового выбега зависит не только от типа двигателей и приводимых механизмов, но и от параметров сети. Например, если имеются линейные реакторы, то продолжительность выбега по общей характеристике резко сокращается. Выбег отдельных двигателей или групп, разделенных реакторами, трансформаторами соизмеримой мощности или длинными линиями с большой индуктивностью, может рассматриваться самостоятельно, вне связи одной группы с другой.

Определение ЭДС при групповом выбеге в общем случае очень сложно. Например, в [4] приводится метод анализа группового выбега электродвигателей приводов собственных нужд блока 200 МВт с использованием для расчета ЭВМ. Однако для различных частных случаев возможны сравнительно несложные приближенные решения [5]. При наличии только асинхронных и невозбужденных синхронных двигателей ЭДС снижается довольно быстро, и для этого случая справедливы все положения, изложенные в § 4.

Обмотка статора возбужденного синхронного двигателя при групповом выбеге остается замкнутой через обмотки других двигателей, а также трансформаторов. При отключении группы электродвигателей ток в статоре не исчезает мгновенно, как при отключении от сети одного двигателя, и, следовательно, свободная составляющая тока ротора может быть меньше определяемой по (12). Кроме того, эта составляющая будет затухать с постоянной вре-

мени, меньшей τ_{d0} (но большей τ'_d). В связи с этим п
групповом выбеге можно пренебречь свободной сост
ляющей тока ротора синхронных двигателей и принимг
$i_f = i_{f,в}$ вместо определения его по формуле (13). Получ
мая погрешность будет обеспечивать некоторый зап
Выбег всех двигателей группы с учетом изложенного
дет происходить по общей хар
теристике с общей постоян
времени (34).

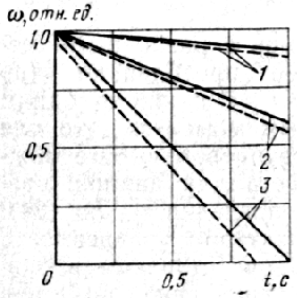


Рис. 14. Изменение угловой скорости синхронного двигателя при отключении от сети (сплошные линии) и близком КЗ в сети (пунктирные линии):
1 — τ_j=10 с; 2 — τ_j=2,5 с; 3 — τ_j=1,0 с

Выбег при близком КЗ про
ходит в общем случае по бо
крутой характеристике, чем с
бодный, за счет перехода дви
теля в генераторный режим. Д
асинхронного двигателя этот
фект на процесс выбега влия
практически не оказывает.

На рис. 14 приведены кри
выбега синхронного двигат
600 кВт, 6 кВ, 500 об/мин с аг
гатом, имеющим момент соп
тивления, не зависящий от уг
вой скорости, при разных нагр
ках. Степень загрузки агрег
характеризуется постоянной в
мени выбега τ_j. Сплошными
ниями показаны кривые выбега при отключении двига
ля от сети, пунктирными — при КЗ вблизи зажимов д
гателя. Из этих кривых видно, что разница в угловой с
рости через 1 с после начала выбега при наличии КЗ
сравнению с отключением составляет при τ_j=10 с ме
0,01 $\omega_{ном}$, при τ_j=2,5 с — 0,04 $\omega_{ном}$ и только при τ_j=
становится существенной. Аналогичные результаты по
чаются и для других машин. В случае необходимо
расчет выбега синхронного двигателя при КЗ можно
полнить в соответствии с рекомендациями [1].

Глава третья

ТОК ВКЛЮЧЕНИЯ ПРИ САМОЗАПУСКЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

8. ДОПУСТИМЫЙ ТОК ВКЛЮЧЕНИЯ

В настоящей главе речь идет о броске тока непос
ственно в момент восстановления напряжения на дви
теле, а именно о сверхпереходном значении тока, кото

и определяет допустимость включения. Из (1) и рис. 8
видно, что в момент восстановления напряжения ток
включения может значительно превысить пусковой.

Все асинхронные двигатели допускают режим, возни-
кающий при быстром отключении близкого КЗ релейной
защитой. Бросок тока при таком режиме может превы-
шать пусковой ток и мало отличается от тока включения
при самозапуске I'', который в худшем случае, когда век-
торы напряжения сети $U_с$ и ЭДС двигателя $E_д$ находятся
в противофазе, согласно (1) получается равным

$$I'' = \frac{U_с + E_д}{z_\Sigma}. \qquad (35)$$

Так как значение $E_д$ для асинхронного двигателя не-
велико (см. § 4), ток I'' ненамного превышает пусковой.

Многолетний опыт эксплуатации и большое количест-
во экспериментов показали, что асинхронные двигатели
короткозамкнутым ротором, выпускаемые в СССР, до-
пускают включение в режиме самозапуска.

В синхронном двигателе ЭДС в момент восстановле-
ния электроснабжения может быть равна напряжению
сети и даже превышать его. Соответственно и ток включе-
ния при малом сопротивлении сети может более чем в 2
раз превышать пусковой и вызвать повреждения в двига-
теле.

Как показали исследования и опыт эксплуатации, наи-
большей опасности в момент включения подвергается об-
мотка статора синхронного двигателя. При пуске двига-
теля относительная деформация изоляции обмотки стато-
ра составляет 50×10^{-5} отн. ед. На основании большого
количества экспериментов, выполненных Всесоюзным на-
учно-исследовательским институтом электроэнергетики
(ВНИИЭ), установлено, что для синхронных двигателей
мощностью до 2000 кВт при относительных деформациях
не более 150×10^{-5} отн. ед. [6] не происходит нарушения
изоляции, если такие деформации не слишком многочис-
ленны. Так как деформации и усилия примерно пропор-
циональны квадрату тока, то предельно допустимое зна-
чение тока включения составит $\sqrt{3}$ его пускового значения
[1].

Момент двигателя при включении не должен вызвать
механических повреждений вала и других конструктивных
элементов. Учитывая накопленный промышленностью
опыт эксплуатации синхронных двигателей при быстрых
отключениях КЗ, а также запасы прочности двигателей об-

щего назначения мощностью до 2000 кВт, предельно доп стимыми можно считать моменты, превышающие моме ты при КЗ в 1,5 раза.

Наибольший начальный момент при несинхронно включении возникает в том случае, когда угол между ве торами напряжения сети и остаточной ЭДС двигателя с ставляет 105—135°. Тогда при $E_д > 0{,}5$ максимальный м мент двигателя составит [6]

$$m_{max} \approx \left\{0{,}91E^2_{д.\,пр}\left[\frac{1}{x_d'}e^{-\frac{1{,}83}{T_a}} + \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'}\right)e^{-\frac{1{,}83}{A}}\right] + \right.$$

$$\left. + \frac{UE_{д.\,пр}}{x_d''}\left(0{,}7e^{-\frac{1{,}83}{T_d''}} + 0{,}87e^{-\frac{1{,}83}{A}}\right)\right\}\frac{S_{ном}}{P_{ном}}, \quad (3$$

а при $E_д \leqslant 0{,}5$

$$m_{max} \approx \left\{\frac{E^2_{д.\,пр}}{2}\left[\frac{1}{x_d'}e^{-\frac{2{,}6}{T_d''}} + \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'}\right)e^{-\frac{2{,}6}{A}}\right] + \right.$$

$$\left. + \frac{0{,}97UE_{д.\,пр}}{x_d''}\left(e^{-\frac{2{,}6}{T_d''}} + e^{-\frac{2{,}6}{A}}\right)\right\}\frac{S_{ном}}{P_{ном}}, \quad (3$$

где $A = \frac{T_d'' T_a}{T_d'' + T_a}$; T''_d — постоянная времени сверхперех ной составляющей тока статора по продольной оси, р [см. (67)]; T_a — постоянная времени апериодического с бодного тока статора, рад; x''_d и x'_d — сверхпереходное переходное индуктивные сопротивления машины по п дольной оси; $E_{д,пр}$ — приведенная ЭДС двигате (см. § 9).

Анализ (36) показывает, что моменты, превышающ момент при КЗ в 1,5 раза, получаются примерно при т же значениях ЭДС двигателя, при которых сверхперех ный ток в худшем случае равен 1,7 пускового.

Отклонение угла δ между векторами напряжения се и остаточной ЭДС двигателя на 15° от наиболее небла приятного положения (105—135° по условию моме двигателя и примерно 180° по условию деформации и ляции обмотки) приводит к снижению начального мом та и тока на 30%.

Учитывая изложенное, а также сравнительно редк необходимость осуществления самозапуска и малую

роятность того, что векторы напряжения сети и ЭДС двигателя в момент включения окажутся в противофазе, можно для всех синхронных двигателей мощностью до 2000 кВт считать самозапуск допустимым, если в самом неблагоприятном случае ток включения не будет превышать 1,7 пускового, т. е. в принятых относительных единицах

$$I''_{доп} \leqslant 1{,}7\frac{1}{x_d''}. \quad (37)$$

Под неблагоприятным случаем понимается наихудшее взаимное расположение векторов напряжения, максимальный режим системы (наибольшая мощность источников питания и наименьшее суммарное сопротивление сети), минимальное число подключенных электроприемников.

Для более мощных синхронных двигателей вопрос о допустимом токе включения и о возможности самозапуска с глухоподключенным возбудителем должен решаться совместно с заводом-изготовителем.

Если применяется ресинхронизация с введением в цепь ротора разрядного резистора или гашение поля путем введения резистора в цепь возбуждения электромашинного возбудителя или подачи напряжения обратного знака от тиристорного возбудителя, расчета тока включения, как правило, не требуется, так как ЭДС двигателя при выбеге быстро снижается (аналогично асинхронному двигателю). Не требуется также расчет тока включения при самозапуске, происходящем после глубокого понижения напряжения, вызванного близким КЗ, которое отключается соответствующей релейной защитой.

Самозапуск мощных синхронных и асинхронных двигателей, пускаемых через реактор или трансформатор, осуществляется также с включением этих элементов, причем для синхронных двигателей — с гашением поля. В этих случаях ток включения находится в пределах допустимого.

9. ТОК ВКЛЮЧЕНИЯ ПРИ ОДИНОЧНОМ САМОЗАПУСКЕ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Пренебрегая влиянием активного сопротивления, формулу (1) можно написать в виде

$$I'' = \left|\frac{\dot{U}_c}{x_\Sigma} - \frac{\dot{E}_д}{x_\Sigma(\omega)}\right|.$$

Поскольку частота ЭДС $E_д$ к моменту восстановления напряжения отличается от частоты сети в той же степени,

в какой угловая скорость в этот момент отличается от синхронной, индуктивное сопротивление, входящее во второй член правой части, тоже должно быть приведено к той же частоте. Для того чтобы в знаменателе обоих членов можно было использовать без пересчетов индуктивное сопротивление сети x_c и двигателя x''_d, которые при частоте, отличной от 50 Гц, и соответствующей ей угловой скорости составляют

$$x(\omega) = x\frac{\omega}{\omega_{синх}},$$

необходимо в числителе использовать приведенное значение ЭДС

$$E_{д,\,пр} = \frac{E_д \omega_{синх}}{\omega}, \qquad (38)$$

т. е. пересчитанное на синхронную скорость.

Обозначив угол между векторами $\dot{U}_c$ и $E_д$ через δ, получим

$$I'' = \frac{\sqrt{U_c^2 + E_{д,\,пр}^2 - 2U_c E_{д,\,пр}\cos\delta}}{x_c + x''_d}. \qquad (39)$$

Если учесть, что $\omega_{синх} = 1$, из сравнения (38) и (21) видно, что значение $E_{д,пр}$ можно найти по характеристике холостого хода непосредственно после определения тока ротора. по(14)

Если значение тока включения, найденное по (39), удовлетворяет условию (37), то самозапуск синхронного двигателя с глухоподключенным возбудителем является допустимым.

Очевидно, что ток включения может оказаться в пределах допустимого в двух случаях: 1) если ЭДС двигателя снизится настолько, что при включении даже в худшем случае ($\delta = 180°$) ток не превысит 1,7 пускового; 2) если ЭДС двигателя велика, но угол δ сравнительно мал.

В первом случае возможно включение в любой момент периода, во втором — только при благоприятном положении векторов. В свою очередь благоприятное расположение векторов может иметь место также в двух случаях: а) непосредственно после прекращения питания, пока векторы напряжения сети и ЭДС двигателя еще не успеют разойтись на угол, достаточный для нарушения условия (37); б) после прохождения первой противофазы в зонах между двумя соседними неблагоприятными положениями.

Остановимся на этом подробнее. Для того же двигателя 1350 кВт, 6 кВ, 1000 об/мин с водяным насосом, рассмотренного в качестве примера в гл. 2, были сняты осциллограммы напряжения сети и ЭДС дви-

гателя при свободном выбеге с разгруженным насосом (т. е. на холостом ходу, $k_з = 0{,}51$) и в случае, когда нагрузка двигателя до отключения составляет 0,76. На основании осциллограмм на рис. 15 построены зависимости модуля разности векторов $\sqrt{U_c^2 + E_{д,\,пр}^2 - 2U_c E_{д,пр}\cos\delta}$ от времени с момента отключения для разгруженного (кривая 1) и нагруженного (кривая 2) насосов. В наиболее тяжелом случае ($x_c = 0$)

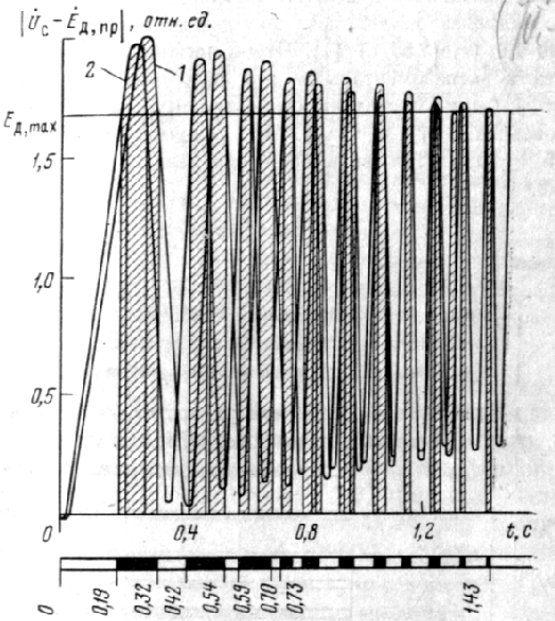


Рис. 15. Зависимость векторной разности напряжения сети и приведенной ЭДС при выбеге синхронного двигателя:

1 — разгруженного; 2 — нагруженного; зоны недопустимого включения затушеваны

это будет также зависимостью действующего значения периодической слагающей тока включения (в долях значения $1/x_d''$, равного примерно начальному пусковому току, отн. ед.) от времени перерыва питания. Участки, на которых ток включения выше допустимого ($1{,}7/x_d''$), заштрихованы. Так как самозапуск может произойти при любом промежуточном положении задвижки, надо учесть все участки недопустимого включения при любой нагрузке, что отражено в нижней части рис. 15.

Как видно, получается несколько интервалов времени, в которых включение теоретически допустимо: 0—0,19, 0,32—0,42, 0,54—0,59, 0,7—0,73 с и т. д., а также после затухания ЭДС двигателя до такого значения $E_{д,max}$, когда даже в случае наиболее неблагоприятного вклю-

чения ($\delta=\pi$) ток не превысит допустимого значения. Если точн времени срабатывания реле, контакторов и выключателей обеспечи гарантированное срабатывание АВР или АПВ в пределах допусти интервала, возможно осуществить включение значительно раньше, ЭДС упадет до $E_{д,max}$. В частности, для второго интервала уста должна быть 0,37±0,05 с.

На практике нагрузка насоса может колебаться в более широ пределах. Для указанного двигателя по методике и данным § 5 и ложения 1 выполнен расчет тока включения при нагрузках от (τ_j=5 с) до 1,0 (τ_j=2,55 с) [1]. Чтобы выявить влияние возмож погрешностей в экспериментальном или расчетном определении зн ний τ_j и $m_{тр}$ была рассчитана серия кривых, аналогичных рис. при отклонениях τ_j и $m_{тр}$ от своих основных значе на ±1, ±5, ±10 %. Ток включения определялся при x_d''=0,24 случая x_c=0.

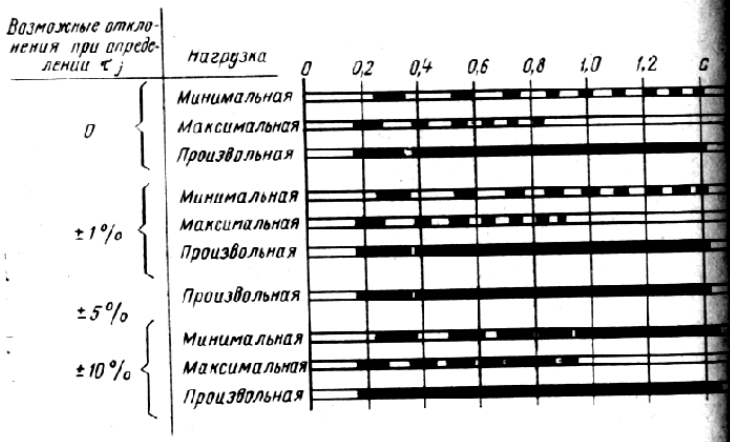


Рис. 16. Результаты определения зон недопустимого включения (за шеваны) синхронного двигателя 1350 кВт

На рис. 16 приведены зоны недопустимого включения, в котор ток превышает значение $I_{доп}''$=1,7·4,16=7,08 для каждого из расс танных случаев (кратность пускового тока 4,16). Результаты пока вают, что если нагрузка двигателя может колебаться от 0,51 (на разгружен) до 1,0 (полная нагрузка двигателя), то промежуточ интервалы допустимого включения при основных значениях τ_j и составят 0—0,18 и 0,35—0,38 с.

Возможная погрешность в определении $m_{тр}$ на результат влияет, а погрешность в определении постоянной времени приво к дальнейшему уменьшению промежуточного интервала допусти включения. Если возможна ошибка в значении τ_j на±1 %, то ин

алы допустимого включения и необходимая точность установки вре ени аппаратуры будут: 0—0,18 и 0,37±0,01 с; при ошибке 5 % — —0,18 и 0,365±0,005 с, а при 10 % — 0—0,17 с, причем второй интер ал исчезает.

Таким образом, улавливание благоприятного положения векторов апряжения сети и ЭДС двигателя оказывается возможным только не осредственно после прекращения питания, пока эти векторы еще не спеют разойтись на значительный угол. Такое улавливание будет тем руднее, чем меньше постоянная времени выбега агрегата τ_j. Что ка ается последующих интервалов времени, в течение которых положение екторов благоприятно, то их улавливание с помощью уставок по вре ени невозможно. На практике каждый механизм работает с различной агрузкой — от холостого хода до полной. Его момент трения может зменяться в зависимости от времени года, качества смазки и т. д. результате благоприятное взаимное расположение векторов U_c и $E_д$ удет происходить в различные моменты времени.

В принципе возможно улавливание благоприятного момента с по ощью устройства точной синхронизации аналогично тому, как это де ается для генераторов. Однако его применение значительно услож нет установку и не может быть признано приемлемым.

Для обеспечения допустимого тока включения при са озапуске синхронного двигателя с глухоподключенным озбудителем необходимо снижение ЭДС двигателя до акого значения, когда даже в самом неблагоприятном лучае (δ=180°) ток включения не превысит допустимо . Следовательно, нет необходимости при расчете тока ключения учитывать угол δ. Расчет производится для аихудшего случая по формуле

$$I''=\frac{U_c+E_{д,пр}}{x_c+x_d''}. \qquad (40)$$

Как отмечено в § 8, расчет тока включения при само пуске требуется только для синхронного двигателя с ухоподключенным возбудителем. Расчет выполняется (40), где $E_{д,пр}$ определяется по характеристике холо ого хода двигателя при токе i_f, определяемом по фор ле (13). Напряжение сети при проектировании прини ется равным 1,05, а в условиях эксплуатации определя ся экспериментально. Сопротивление x''_d определяется каталогу, а x_c представляет собой суммарное индук вное сопротивление сети, приведенное к номинальным раметрам двигателя (если эти сопротивления привести базовым параметрам, то полученную кратность тока ключения необходимо пересчитать с базового значения номинальный ток двигателя).

При наличии в сети нескольких источников питания, также крупных электродвигателей они объединяются т тем же правилам, что и при расчете токов КЗ. Наприме если на подстанции, схема которой изображена на рис. после отключения трансформатора *T1* срабатывает *А* на секционном выключателе, в качестве источников пи ния вместе с энергосистемой (шины 35 кВ) могут бы учтены двигатели *M2—M4*.

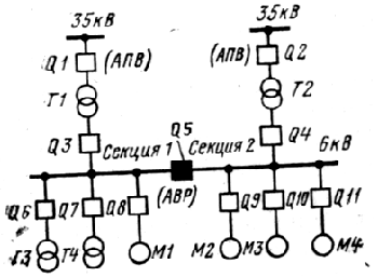


Рис. 17

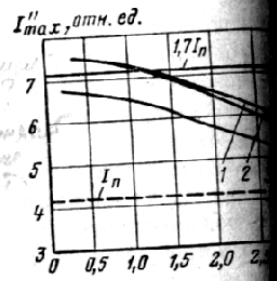


Рис. 18.

Рис. 17. Схема подстанции с различной нагрузкой на секциях шин ределяющей различные условия самозапуска

Рис. 18. Ток включения при самозапуске разгруженного синхрон двигателя:

1 — после свободного выбега; *2* — одиночный самозапуск при наличии на т шинах подстанции посторонней нагрузки; *3* — групповой самозапуск двух гателей

В приложении 2 приведен пример расчета тока в чения синхронного двигателя 1350 кВт, 6 кВ в различ режимах, соответствующих схеме рис. 17. Резуль расчета в виде зависимостей тока включения от вре перерыва электроснабжения приведены на рис. 18. ночный самозапуск (кривая *1*) возможен, например, АПВ выключателя *Q1*, если трансформаторы *T3* и *T* ключены. Как видно из результатов, включение дви ля с глухоподключенным электромашинным возбудит при свободном выбеге допустимо лишь через 1,3 с п отключения. Если необходимо более быстрое вклю двигателя, следует применить гашение поля.

10. ТОК ВКЛЮЧЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ПОСТОРОННЕЙ НАГР И В СЛУЧАЕ ГРУППОВОГО САМОЗАПУСКА

Одиночный самозапуск на практике происходит р Обычно к отключившимся шинам подключено либо сколько двигателей (секция *2* на рис. 17), либо двига и другая нагрузка (осветительная, печи и т. д. —

ция *1*). Тогда при включении в элементах сети возникает повышенный ток, в результате чего напряжение и ток включения на двигателе меньше, чем при одиночном самозапуске.

В общем случае ток можно определить по методу наложения. Если в схеме рис. 17 срабатывает АПВ на выключателе *Q1*, то в момент включения имеются напряжение сети и ЭДС двигателя *M1*. Если пренебречь влиянием активных сопротивлений, токи от напряжения сети составят:

в трансформаторе *T1*

$$I''_{1с} = \frac{U_с}{x_с + \dfrac{x''_d x_н}{x''_d + x_н}};$$

двигателе *M1*

$$I''_{1д} = I''_{1с}\frac{x_н}{x''_d + x_н};$$

ветви прочей нагрузки (*T3* и *T4* параллельно)

$$I''_{1н} = I''_{1с}\frac{x''_d}{x''_d + x_н}.$$

оки от ЭДС двигателя:

двигателе

$$I''_{2д} = \frac{E_{д,\,пр}}{x''_d + \dfrac{x_с x_н}{x_с + x_н}};$$

трансформаторе *T1*

$$I''_{2с} = I''_{2д}\frac{x_н}{x_с + x_н};$$

ветви прочей нагрузки

$$I''_{2н} = I''_{2д}\frac{x_с}{x_с + x_н}.$$

В худшем случае, когда векторы напряжения сети и ДС двигателя находятся в противофазе, указанные составляющие тока в трансформаторе *T1* и двигателе *M1* дут складываться, а в прочей нагрузке — вычитаться. сле преобразований получаем

$$I''_{д} = \frac{U_с x_н + E_{д,\,пр}(x_н + x_с)}{x_с x''_d + x''_d x_н + x_с x_н}. \qquad (41)$$

В формуле (41) и предшествующих ей сопротивл нагрузки, работающей с фактической мощностью (кВ $S_н$ при $\cos\varphi_н$, составит, отн. ед.,

$$z_н = \frac{S_б}{S_н};\quad x_н = \frac{S_б}{S_н \sin\varphi_н}.$$

При базовом напряжении, равном номинальному пряжению электроприемников, за базовую мощ можно принять мощность двигателя *M1* либо транс матора *T1*.

Если на секции имеется несколько электродвигат (секция *2* на рис. 17), то ток каждого из них можно же определить методом наложения. В общем случае о деляются токи сети и каждого двигателя от напряж сети и от ЭДС каждого двигателя. Для определения марного тока включения для какого-либо двигателя сложить составляющие этого тока, полученные для сматриваемой ветви от ЭДС всех остальных двигате Однако, как отмечалось в гл. 2, определение ЭДС дого двигателя при групповом выбеге очень сложно. группы асинхронных двигателей можно воспользова например, методикой, описанной в [3].

На практике часто возможны упрощения. Если двигатели выбегают с одинаковой ЭДС, то для опре ния тока включения в формуле (40) вместо сопроти ния одного двигателя учитывается сопротивление двигателей:

$$\frac{1}{x''_э} = \frac{1}{x''_{d1}} + \frac{1}{x''_{d2}} + \ldots,$$

находится суммарный ток I'' по (40), а затем ток ка го двигателя

$$I''_{д1} = I'' x''_э / x''_{d1}$$

и т. д.

В частном случае, если имеется n одинаковых д телей, эквивалентное сопротивление составит $x''_э =$ суммарный ток включения

$$I'' = \frac{U_с + E_{д,пр}}{x_с + x''_d/n},$$

а ток включения одного двигателя

$$I''_д = \frac{I''}{n} = \frac{U_с + E_{д,пр}}{nx_с + x''_d},$$

т. е. значительно меньше, чем при одиночном самозапуске. В приложении 2 выполнен расчет тока включения двигателя для самозапуска при наличии посторонней нагрузки (АПВ на выключателе *Q1* схемы рис. 17 при включенных *Q6—Q8*) и группового самозапуска двух двигателей (АПВ на выключателе *Q2* при включенных *Q9* и *Q10*). Как видно из рис. 18, при наличии посторонней нагрузки (кривая *2*) самозапуск двигателя с глухоподключенным возбудителем без гашения поля возможен через 1,25 с после отключения. При групповом самозапуске двух двигателей (кривая *3*) ток включения находится в пределах допустимого даже при практически мгновенном восстановлении напряжения.

Из формулы (40), учитывая (37) и подставляя $x''_э$ (43) вместо x''_d, получаем, что ток включения будет в пределах допустимого, если ЭДС двигателя (или двигателей), приведенная к синхронной угловой скорости, будет составлять

$$E_{д.пр} \leqslant 1{,}7\left(\frac{x_с}{x''_э} + 1\right) - U_с. \qquad (47)$$

При увеличении числа двигателей уменьшится $x''_э$ и значение $E_{д,пр}$, соответствующее допустимому току включения, станет значительно больше. Если условие (47) не выполнено в небольшой степени (ток включения при самозапуске не намного превышает допустимый для двигателей), а на питающей линии устанавливается реактор, выбранный по условию электродинамической и термической стойкости оборудования и линии, целесообразно несколько увеличить сопротивление реактора, т. е. $x_с$.

Ток включения при самозапуске синхронного двигателя с глухоподключенным электромашинным возбудителем может быть снижен до значения, близкого к пусковому току, и без использования реактора. Для этого следует при отключении источника питания ввести сопротивление в цепь возбуждения возбудителя с последующей форсировкой при вхождении в синхронизм. Такие схемы применяются в случаях, когда пуск и вхождение в синхронизм возможны без включения разрядного сопротивления.

Из (46) можно определить сопротивление сети, при котором ток включения не превысит допустимого. Электродвижущая сила синхронного двигателя при одиночном выбеге, т. е. в худшем случае, не может превысить 1,5, что определяется насыщением как самого двигателя, так и его возбудителя (с учетом пересчета на синхронную ча-

стоту вращения). Тогда при $x_c \geqslant 0{,}5x''_d$ ток включения бу-
дет допустимым во всех случаях. Чем больше двигателей
участвует в самозапуске одновременно, тем при меньше
x_c ток включения будет допустим.

Что касается системы электроснабжения, то для не
режим самозапуска не опасен, так как ток I'' меньше, че
ток при КЗ $I_к$. Хотя за счет наличия ЭДС, развиваемо
двигателями, числитель в (45) увеличивается, знамена
тель увеличивается в большей степени, так как сопроти
ление двигателя x''_d существенно больше, чем сопроти
ление сети x_c. Получается $I_{д,п} < I'' < I_к$. В случае необх
димости проверки допустимости несинхронного восстан
вления напряжения можно воспользоваться методико
[7].

Глава четвертая

РАЗГОН ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ САМОЗАПУСКЕ

11. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ САМОЗАПУСКЕ

Сверхпереходный ток, возникающий в момент восст
новления питания и определяющий электродинамическ
воздействие на двигатель, затухает в течение 1—3 пер
дов до значения, близкого к пусковому, и на дальнейш
процесс никакого влияния не оказывает. Разгон двига
лей, участвующих в самозапуске, происходит под в
действием полного электромагнитного момента, главн
часть которого — асинхронный момент — зависит от кв
рата напряжения. Поэтому анализ процесса разгона эл
тродвигателей невозможен без определения напряжен
на их зажимах.

В общем случае расчет напряжения на зажимах д
гателей, подключенных к той или иной точке сети, выпо
няется по схеме замещения, составленной, как и при р
чете режимов КЗ или электрическом расчете сети. К
правило, активными сопротивлениями можно пренебре
и элементы системы электроснабжения (трансформатор
реакторы, линии и т. д.) выражаются своими индуктивн
ми сопротивлениями.

Для линии, отн. ед.,

$$x_л = x_{л,уд} l \frac{S_б}{U_б^2},$$

где $x_{л,уд}$ — удельное реактивное сопротивление линии, Ом/км; l — д
на линии, км; $S_б$ — базовая мощность (обычно мощность питающ

трансформатора, генератора или же суммарная номинальная мощность двигателей), МВ·А; $U_б$ — базовое напряжение, кВ;

для трансформаторов

$$x_т = \frac{u_к\,\%}{100} \frac{S_б}{S_т}, \tag{49}$$

где в общем случае $S_б \neq S_т$;

для реакторов

$$x_р = \frac{x_р\,\%}{100} \frac{I_б U_{ном,р}}{I_{ном,р} U_б}, \tag{50}$$

где $x_р$ % — указанная в паспорте индуктивность реактора при номинальном токе реактора $I_{ном,р}$; $I_б$ — базовый ток, равный $S_б/U_б$.

Расчетные индуктивные сопротивления двигателей, участвующих в самозапуске, определяются их номинальными параметрами и угловой скоростью. Для асинхронного двигателя

$$x_д \approx z_д = \frac{S_б U_{ном}^2}{S_п U_б^2}, \tag{51}$$

где $U_б$ можно принять равным номинальному напряжению двигателей $U_{ном}$; $S_п$ — расчетная пусковая мощность двигателя при номинальном напряжении, кВ·А, т. е. мощность, потребляемая двигателем при заданном скольжении:

$$S_п = \frac{P_{ном} k}{\cos\varphi_{ном} \eta_{ном}}; \tag{52}$$

$P_{ном}$, $\cos\varphi_{ном}$, $\eta_{ном}$ — номинальные параметры двигателя; k — кратность пускового тока двигателя при скольжении s в момент восстановления питания и при номинальном напряжении.

В каталогах дается кратность пускового тока k_1 при скольжении, равном единице. Тогда при скольжении s [2]

$$k \approx \frac{k_1}{\sqrt{1 + \left(\frac{s_m}{s}\right)^2}}, \tag{53}$$

где s_m — скольжение, соответствующее максимальному моменту.

Для асинхронных двигателей мощностью более 100 кВт из формулы Клосса [§ 12, формула (61)]

$$s_m = s_{ном}\left(m_{max} + \sqrt{m_{max}^2 - 1}\right), \tag{54}$$

где $s_{ном}$ — номинальное скольжение; m_{max} — максимальн момент при номинальном напряжении, отн. ед.; для двиг телей до 100 кВт $s_m = (4 \div 4{,}5)\, s_{ном}$.

В расчетах очень часто принимают, что в интерва скольжений $1 > s > s_m$ индуктивное сопротивление двиг теля одинаково и равно значению, имеющему место пр неподвижном роторе:

$$x_{д1} = \frac{S_б \cos\varphi_{ном} \eta_{ном} U^2_{ном}}{P_{ном} k_1 U_б^2}. \quad (5$$

Зависимость индуктивного сопротивления синхронно двигателя от скольжения очень сложна [1, 2, 7] и д практических расчетов в аналити ком виде не используется. Обычно основу принимается сопротивление заторможенного двигателя, определ мое по его паспортным данным согл но (55). Сопротивление $x_д$ при ск жении s можно определить по ус ненной зависимости (рис. 19), пос енной на основании формул и эксп ментальных данных [1, 2].

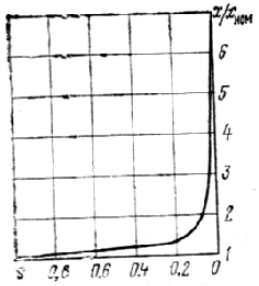


Рис. 19. Усредненная зависимость сопротивления синхронного двигателя от скольжения (сопротивление при $s=1{,}0$ принято за единицу)

В простейшем случае, когда пр ходит одиночный самозапуск а хронного или недовозбужденного хронного двигателя (рис. 20,*а*), на жение на его зажимах составит

$$U_д = U_c \frac{x_д}{x_c + x_д} = U_c \frac{1}{1 + x_c/x_д},$$

где под x_c понимается суммарное сопротивление всех ментов сети от той точки, где напряжение U_c может б принято неизменным (обычно сторона высокого напря ния питающего трансформатора).

При возбужденном синхронном двигателе напряже на его зажимах колеблется на значение, определяе развиваемой им ЭДС $\pm E_д$. Однако процесс его раз до подсинхронной скорости определяется прежде в средним значением асинхронного момента, зависящи квадрата среднего напряжения, определяемого по (56)

Если в самозапуске участвует группа двигателей, ключенных к одной и той же секции шин распределит ного устройства (рис. 20,*б*), то сначала по (52) опр ляется пусковая мощность $S_{п,i}$ каждого из них, затем

марная пусковая мощность $S_{п,э}$ эквивалентного двигателя, по которой аналогично (51) определяется эквивалентное расчетное сопротивление

$$x_э = \frac{S_б U^2_{ном}}{S_{п,э} U_б^2}. \quad (57)$$

Здесь следует иметь в виду, что двигатели могут обладать разным скольжением как в момент восстановления напряжения, так и в процессе последующего разгона.

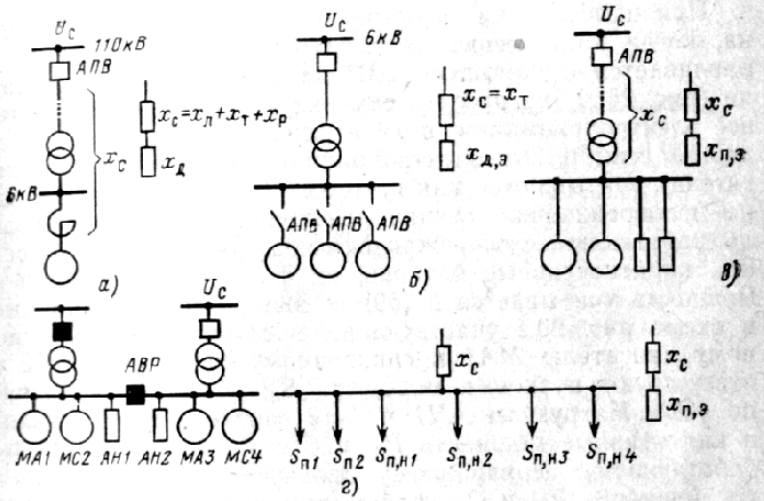


Рис. 20. Составление схем замещения для расчета напряжения на зажимах электродвигателей при самозапуске:
а — одиночном; *б* — групповом; *в* — групповом при наличии прочей нагрузки; *г* — при АВР на секционном выключателе

Кроме электродвигателей, участвующих в самозапуске, к шинам можно подключить и другую нагрузку — различные печи, освещение и т. д. (рис. 20,*в*). Эта нагрузка также учитывается условным понятием «пусковой мощности», равным

$$S_{п.н} = P_н \frac{1}{\cos\varphi_н} = \sqrt{P_н^2 + Q_н^2}, \quad (58)$$

где $P_н$ и $Q_н$ — активная и реактивная мощности, потребляемые из сети.

Эквивалентное сопротивление группы двигателей, участвующих в самозапуске совместно с прочей нагрузкой,

определяется по (57) через суммарную эквивалентную пусковую мощность

$$S_{п.э} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} P_{н.i}\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^{m} S_{п.j} + \sum_{i=1}^{n} Q_{н.i}\right)^2}, \quad (59)$$

где i — индекс, соответствующий i-му элементу нагрузки; j — индекс, соответствующий j-му электродвигателю, участвующему в самозапуске. В соответствии с ранее принятым допущением пусковая мощность двигателя является реактивной.

При наиболее часто встречающемся случае самозапуска, когда напряжение на отключившейся секции восстанавливается с помощью АВР на секционном выключателе (рис. 20,*г*), на процесс самозапуска оказывают влияние все электроприемники, получающие питание от неповрежденной секции. Эти электроприемники (в том числе и двигатели) учитываются как нагрузка по (58). В случае, если на неповрежденной секции имеются синхронные двигатели, работающие с опережающим коэффициентом мощности, или конденсаторные батареи, их фактическая реактивная мощность учитывается в (59) со знаком минус. Например, в схеме рис. 20,*г* участвующим в самозапуске асинхронному двигателю *МА1* и синхронному двигателю *МС2* соответствуют пусковые мощности $S_{п1}$ и $S_{п2}$, определенные по (52). Нагрузкам *АН1* и *АН2* соответствуют активные и индуктивные мощности $P_{н1}$ и $Q_{н1}$, $P_{н2}$ и $Q_{н2}$. Нормально работающему асинхронному двигателю *МА3* соответствуют мощности $P_{н3}$ и $Q_{н3}$, работающему синхронному двигателю *МС4* — активная мощность $P_{н4}$ и емкостная мощность $-Q_{н4}$. Таким образом, для этого конкретного случая формула (59) приобретает вид

$$S_{п.э} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{4} P_{н.i}\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^{2} S_{п.j} + \sum_{i=1}^{4} Q_{н.i}\right)^2},$$

причем

$$\sum_{i=1}^{4} Q_{н.i} = Q_{н1} + Q_{н2} + Q_{н3} - Q_{н4}.$$

Если суммарная мощность синхронных двигателей, подключенных к неповрежденной секции, так велика, что сумма всех реактивных мощностей $\Sigma S_{п,j} + \Sigma Q_{н,i}$ получается отрицательной, то их следует учитывать не как нагрузку, а как источник питания, т. е. как генераторы с ЭДС, близкой к номинальному напряжению, и внутренним сопротивлением, определяемым по (51).

Очень часто в самозапуске одновременно участвуют электродвигатели различных напряжений. Рассмотрим этот случай на примере схемы рис. 21,*а*. При повреждении трансформатора *Т2* отключаются выключатели *Q1* и *Q3*,

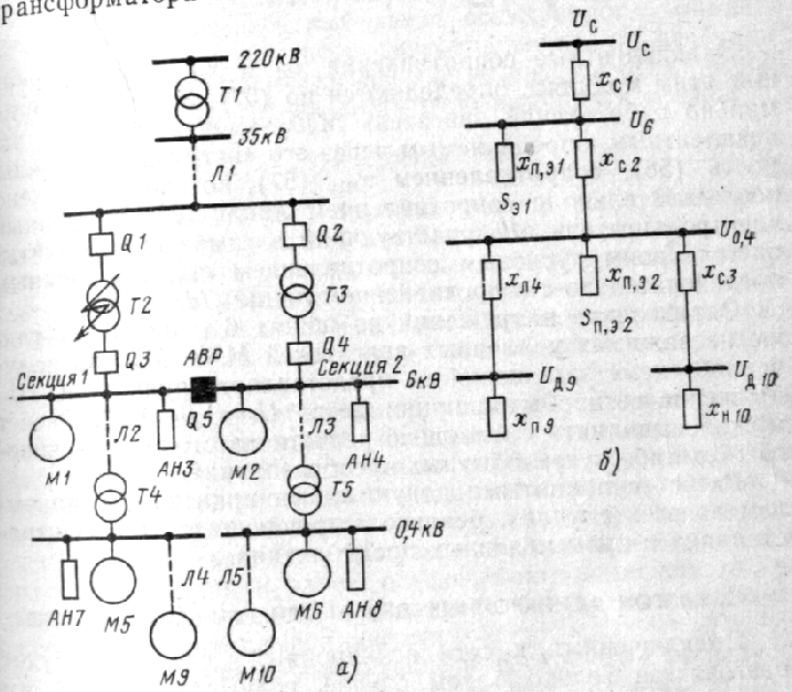


Рис. 21. Составление схем замещения для разветвленной сети:
а — схема электроснабжения; *б* — схема замещения

а все питавшиеся от него потребители устройством АВР будут включены через выключатель *Q5* к трансформатору *Т3*. Схема замещения для этого режима приведена на рис. 21,*б*. Сопротивления элементов сети здесь равны $x_{с1} = x_{т1} + x_{л1} + x_{т3}$; $x_{с2} = x_{л3} + x_{т5}$; $x_{с3} = x_{л5}$.

Эквивалентная пусковая мощность нагрузки, подключенной непосредственно к шинам 6 кВ (участвующий в самозапуске двигатель *М1* и нагрузка *М2*, *АН3*, *АН4*), составит

$$S_{п.э1} = \sqrt{\left(\sum_{i=2}^{4} P_{н.i}\right)^2 + \left(S_{п1} + \sum_{i=2}^{4} Q_{н.i}\right)^2}.$$

Эквивалентная пусковая мощность нагрузки, подключенной непосредственно к шинам 0,4 кВ (участвующий в самозапуске двигатель *М5* и нагрузка *М6*, *АН7*, *АН8*) составит

$$S_{\text{п. э2}} = \sqrt{\left(\sum_{i=6}^{8} P_{\text{н. } i}\right)^2 + \left(S_{\text{л5}} + \sum_{i=6}^{8} Q_{\text{н. } i}\right)^2}.$$

Эквивалентные сопротивления $x_{э1}$ и $x_{э2}$, соответствующие этим модулям, определяются по (57). Удаленный нормально работающий двигатель *М10* заменяется своим эквивалентным, определяемым через его «нагрузочную» мощность (58), сопротивлением $x_{н10}$ (57), которое включено последовательно с сопротивлением линии *Л5*. Удаленный электродвигатель *М9*, участвующий в самозапуске, учитывается своим пусковым сопротивлением $x_{п9}$, включенным последовательно с сопротивлением линии *Л4*.

Определение напряжений на шинах 6 и 0,4 кВ, а также на зажимах удаленных двигателей *М9* и *М10* по полученной схеме замещения не представляет трудностей. Напряжение сети обычно принимается $U_c = 1{,}0 \div 1{,}02$. Расчет можно выполнить с помощью расчетного стола постоянного тока либо путем обычных преобразований.

Расчет с принятыми допущениями практически приемлем во всех случаях, реально встречающихся на электростанциях и промышленных предприятиях.

12. РАЗГОН АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ САМОЗАПУСКЕ

Подключенный к сети асинхронный двигатель будет разгоняться только в том случае, если развиваемый им момент будет больше момента сопротивления в соответствии с основным уравнением движения

$$m_д - m_c = J\frac{d\omega}{dt} = -J\frac{ds}{dt}. \qquad (60)$$

В этом уравнении под $m_д$ для асинхронного двигателя понимается электромагнитный асинхронный момент m_a, который с достаточной степенью точности выражается так называемой формулой Клосса [2]

$$m_a = \frac{2m_{max}U_д^2}{s/s_m + s_m/s}, \qquad (61)$$

а под m_c — момент сопротивления агрегата, т. е. момент сопротивления механизма вместе с механическими потерями в двигателе.

Если момент сопротивления определяется экспериментальным путем, то механические потери двигателя учитываются непосредственно в процессе измерений.

В формулу (61), как правило, подставляют паспортное значение кратности максимального момента m_{max}, которое отнесено к валу двигателя. В этих условиях становится ненужным десятипроцентный запас асинхронного момента (по сравнению с моментом сопротивления), на необходимость которого указывают некоторые авторы. Для обеспечения разгона двигателя достаточно выполнить условие

$$m_a > m_c. \qquad (62)$$

Значение s_m в (61) определяется по (54). Двигатель при самозапуске разгоняется медленнее, чем при пуске. Более длительный разгон, вообще говоря, вызывает повышенный нагрев. Поэтому успешным считается такой самозапуск, когда двигатель может разогнаться до рабочей скорости и при этом температура его обмоток не превысит допустимого значения.

Расчет нагрева обмоток при самозапуске выполняется так же, как и при пуске. Существует несколько методов расчета нагрева обмоток машин переменного тока. Для практических расчетов можно использовать приближенную методику завода «Электросила» [1, 2]. Практически все асинхронные двигатели, выпускаемые промышленностью в настоящее время и ранее, обеспечивают возможность как минимум однократного самозапуска без превышения температуры обмоток сверх допустимой.

В общем случае определение возможности самозапуска асинхронного двигателя складывается из следующих операций:

1) определяются снижение угловой скорости за время перерыва питания (§ 3 и 7), угловая скорость и скольжение в момент восстановления напряжения;

2) определяется напряжение на зажимах двигателя после восстановления напряжения (§ 11);

3) по (61) определяется вращающий момент двигателя при полученных напряжении и скольжении;

4) определяется момент сопротивления агрегата при полученной угловой скорости;

5) если условие (62) выполнено, то самозапуск обеспечен.

Процесс самозапуска зависит от вида механической характеристики асинхронного двигателя и от характера зависимости момента сопротивления механизма от угловой

скорости. Рассмотрим две основные разновидности асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором: двигатель с малым номинальным скольжением, который обладает повышенными энергетическими показателями, и двигатель с повышенным пусковым моментом, используемый для механизмов с тяжелыми условиями пуска. Будем считать, что оба двигателя обладают одинаковым максимальным моментом m_{max}. Их механические характеристики определяются значением скольжения s_m.

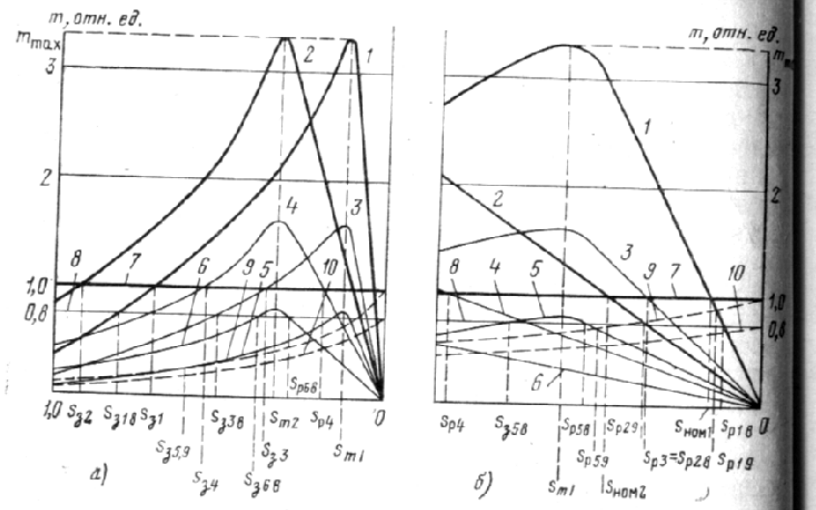


Рис. 22. Зависимость самозапуска от вида механической характеристики асинхронного двигателя и момента сопротивления агрегата:
1, 2 — $U_д$=1,0; *3, 4* — $U_д$=0,7; *5, 6* — $U_д$=0,5; *7, 8* — m_c=const; *9, 10* — $m_c \approx \omega^2$

На рис. 22,*а* изображены механические характеристики этих двигателей при напряжении, равном 1,0, т. е. при номинальном (соответственно кривые *1* и *2*), и при напряжениях, равных 0,7 (кривые *3* и *4*) и 0,5 (кривые *5* и *6*). На том же рисунке изображены характеристики моментов сопротивления двух видов: для агрегата с моментом сопротивления, не зависящим от угловой скорости, который равен номинальному моменту двигателя (прямая *7*) или 0,8 его значения (прямая *8*), и для агрегата с «вентиляторной» характеристикой, когда момент сопротивления пропорционален квадрату угловой скорости, а его значение при скольжении, равном нулю, составляет 1,0 (кривая *9*) или 0,8 (кривая *10*). Для наглядности зона малых сколь-

жений повторена на рис. 22,*б* в расширенном масштабе. Номинальным скольжениям двигателей $s_{ном1}$ и $s_{ном2}$ соответствуют точки пересечения механических характеристик двигателей при $U_д$=1,0 (кривые *1* и *2*) с характеристикой момента сопротивления m_c=1,0. Если нагрузка уменьшается до 0,8, соответственно и рабочие скольжения станут меньше ($s_{р1\,8}$ и $s_{р2\,8}$). Уменьшаются рабочие скольжения и при «вентиляторной» характеристике момента сопротивления ($s_{р1\,9}$ и $s_{р2\,9}$).

Как видно из рис. 22, двигатель с повышенным моментом сопротивления допускает самозапуск в значительно более широком интервале скольжений. Так, при номинальном напряжении даже при неизменном моменте сопротивления, равном номинальному, самозапуск возможен при увеличении скольжения до значения $s_{э2}$, в то время как для двигателя с малым номинальным скольжением граница возможности самозапуска проходит при значительно меньшем скольжении $s_{э1}$. Это же соотношение сохраняется и при снижении напряжения до 0,7 (соответственно точки $s_{э4}$ и $s_{э3}$). При дальнейшем снижении напряжения до 0,5 оба двигателя не смогут обеспечить самозапуск, если m_c=1.

При снижении момента сопротивления, не зависящего от скорости, до 0,8 двигатель с повышенным пусковым моментом обеспечивает самозапуск при номинальном напряжении даже после полной остановки агрегата, а двигатель с малым рабочим скольжением — только при угловой скорости не ниже $\omega_{э1\,8}=1-s_{э1\,8}$. Оба двигателя обеспечивают самозапуск и при снижении напряжения до 0,5, если скольжение не увеличится более чем до $s_{э6\,8}$ и $s_{э5\,8}$. И хотя в двигателе с повышенным пусковым моментом угловая скорость повысится совсем немного, лишь до скольжения $s_{р6\,8}$, тем не менее самозапуск следует считать успешным. Важно то, что двигатель после восстановления напряжения прекратит снижать свою угловую скорость и будет продолжать вращаться в соответствии с рабочей частью характеристики. Следовательно, по мере разгона других двигателей, когда напряжение начнет повышаться, этот двигатель будет также повышать свою скорость и в конце концов выйдет на рабочую точку $s_{р2\,8}$.

Из рис. 22 видно, что самозапуск агрегатов, имеющих квадратичную зависимость момента сопротивления от угловой скорости, происходит значительно легче, чем при моменте сопротивления, не зависящем от скорости. Так, даже при полной загрузке агрегата оба двигателя обеспечат са-

мозапуск при номинальном напряжении и при снижении напряжения до 0,7 во всем диапазоне угловых скоростей вплоть до полной остановки. И лишь при уменьшении напряжения до 0,5 двигатель с малым номинальным скольжением при полной нагрузке агрегата будет иметь несколько ограниченный диапазон допустимого снижения угловой скорости (скольжение $s_{35\,9}$). Но при нагрузке 0,8 он также будет обеспечивать самозапуск во всем диапазоне скольжений.

Как правило, в самозапуске участвует значительное количество двигателей. При расчете самозапуска асинхронных двигателей могут выявиться следующие случаи: 1) самозапуск обеспечен для всех двигателей; 2) самозапуск не обеспечен для всех двигателей; 3) для одной части двигателей самозапуск обеспечен, для другой нет.

Естественно, что в первом случае никаких дополнительных расчетов не требуется. Во втором случае необходимо ограничить количество двигателей, участвующих в самозапуске. Максимальная мощность двигателей, которые могут остаться подключенными к сети во время кратковременного исчезновения напряжения, определяется согласно § 24. Если технологический процесс требует обеспечения самозапуска бо́льшего количества двигателей, чем это возможно по расчету, то используется так называемый ступенчатый самозапуск. В этом случае на время нарушения питания оставляют подключенным к сети то количество двигателей, которое допустимо согласно расчету. Остальные двигатели отключаются от сети действием релейной защиты, а затем автоматически вновь включаются специальными устройствами (см. § 20) после окончания разгона и перехода в рабочий режим первой группы двигателей. При расчете самозапуска второй группы двигателей первая группа учитывается как нормально работающие двигатели.

В третьем случае группа двигателей, при которых самозапуск обеспечен, будет разгоняться, а другая группа, для которой самозапуск не обеспечен, — затормаживаться. Такого режима следует избегать, но в принципе он возможен. Точный его расчет достаточно сложен. Для приближенного расчета считают, что все двигатели первой группы разгоняются до рабочей скорости и их расчетное сопротивление значительно увеличивается, а вторая группа затормаживается до остановки. Тогда расчет повторяется, причем первая группа двигателей учитывается как группа нормально работающих двигателей, а вторая учи-

тывается эквивалентным пусковым сопротивлением при скольжении, равном единице. Если теперь напряжение окажется достаточным для разгона второй группы двигателей, то самозапуск всех двигателей будет обеспечен. Здесь также можно применить ступенчатый самозапуск.

Как легко видеть из сказанного, если в момент восстановления напряжения момент двигателя превышает момент сопротивления и агрегат разгоняется, то далее он обязательно разгонится до рабочей угловой скорости. Исходя из этого положения можно определить минимальное напряжение, при котором самозапуск агрегатов с асинхронными двигателями возможен во всех случаях, даже если за время перерыва питания агрегат успел остановиться.

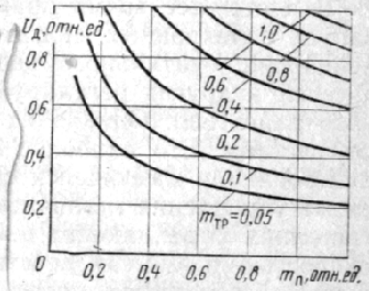


Рис. 23. Минимальные напряжения, при которых возможен самозапуск остановившегося асинхронного двигателя

Кратность пускового момента двигателя $m_п$ при номинальном напряжении известна и приводится в паспортных данных. Для всех агрегатов, момент сопротивления которых зависит от угловой скорости, в неподвижном состоянии действует только момент трения $m_{тр}$ (или другие моменты, эквивалентные ему). Этот момент также известен, а во многих случаях может быть измерен. По сути дела это момент трогания с места. Для агрегатов с моментом сопротивления, не зависящим от угловой скорости, принимается $m_{тр}=m_с$. Поскольку момент, развиваемый двигателем, пропорционален квадрату напряжения, при $m_п U_д^2 > m_{тр}$ двигатель начинает разгоняться. Отсюда условие успешности самозапуска остановившегося асинхронного двигателя

$$U_{д.\,min} \geqslant \sqrt{m_{тр}/m_п}. \qquad (63)$$

Например, при кратности пускового момента $m_п=0{,}5$ и моменте трения механизма $m_{тр}=0{,}1$ самозапуск будет обеспечен после любого времени перерыва питания при напряжении не ниже $\sqrt{0{,}1:0{,}5}=0{,}45$.

В соответствии с формулой (63) на рис. 23 приведены минимально допустимые напряжения, при которых самозапуск асинхронного двигателя возможен при любой начальной угловой скорости и любом характере нагрузки агрега-

та в зависимости от паспортной кратности пускового мо-
мента двигателя и момента сопротивления агрегата в не-
подвижном состоянии.

Самозапуск асинхронных двигателей с фазным рото-
ром при значительных нагрузках и перерывах электро-
снабжения осуществляется с введением пусковых резисто-
ров. Такие схемы достаточно просты как в релейном, та-
и в полупроводниковом исполнении [9].

В настоящее время практически не используется само-
запуск асинхронных двигателей, работающих в режиме
асинхронно-вентильного каскада, вентильных электродви-
гателей и других регулируемых систем на базе асинхрон-
ного двигателя. Однако их самозапуск возможен и легко
осуществим. Его наиболее целесообразно выполнять с ис-
пользованием имеющейся схемы управления. Изменения в
схеме управления незначительны и сводятся к приведению
состояния управляющих звеньев в соответствие с угловой
скоростью в момент восстановления питания и с напря-
жением на зажимах двигателя.

Крайне редко применяющиеся асинхронные двигатели
с реакторным или автотрансформаторным пуском также
могут участвовать в самозапуске. Предпочтительным спо-
собом является перевод схемы в начальное пусковое со-
стояние, если за время отсутствия или глубокого сниже-
ния напряжения скольжение превысит значение $s_з$. При
меньших перерывах питания пусковой реактор или авто-
трансформатор может не вводиться.

В некоторых случаях может возникнуть необходимость
более точного и подробного расчета самозапуска асинхрон-
ных двигателей, например с использованием уравнений
Парка — Горева. Для таких расчетов можно воспользо-
ваться рекомендациями [10, 11] и другими специальными
работами.

13. РАЗГОН СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДО ПОДСИНХРОННОЙ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

Разгон синхронного электродвигателя происходит в со-
ответствии с общим для всех двигателей уравнением дви-
жения (60), однако развиваемый им момент определяет-
ся гораздо более сложным выражением, чем для асинхрон-
ного двигателя. В общем случае разгон синхронного дви-
гателя после включения происходит под влиянием полного
электромагнитного момента

$$m_д = m_{ас} + m_{ас\sim} + m_в + m_р + m_т + m_{дп}, \qquad (6$$

где $m_{ас}$ — средний асинхронный момент; $m_{ас}$ — знакопе-
ременные составляющие асинхронного момента, обусловленные электрической несимметрией ротора и имеющие двойную частоту скольжения; $m_в$ — синхронизирующий момент, обусловленный наличием возбуждения; $m_р$ — реактивный момент, который также является синхронизирующим и обусловлен магнитной несимметрией ротора; $m_т$ — тормозной момент, возникающий за счет токов, наводимых в обмотке статора при работе возбужденного двигателя (частота токов равна ωf_c); $m_{дп}$ — дополнительная составляющая момента, возникающая при быстром изменении угловой скорости ротора.

В целях упрощения анализа процесса разгона синхронного двигателя после восстановления питания будем считать его состоящим из двух этапов: а) разгон до подсинхронной угловой скорости; б) вхождение в синхронизм. Под термином «подсинхронная угловая скорость» $\omega_а$ понимается такое установившееся ее значение, до которого двигатель разгонится под действием асинхронного момента при данной нагрузке и отсутствии возбуждения. Иными словами, это — установившееся значение угловой скорости асинхронного режима синхронного двигателя. Подсинхронной угловой скорости соответствует подсинхронное скольжение $s_а = 1 - \omega_а$, идентичное по своему физическому смыслу рабочему скольжению асинхронного двигателя $s_р$ (§ 12, рис. 22).

Поскольку на первом этапе разгона синхронного двигателя возбуждение отсутствует, можно не учитывать момент $m_в$, а также тормозной момент

$$m_т = \frac{r_{ст} + r_c}{1 - s} \left(\frac{E_d}{x_d} \right)^2, \qquad (65)$$

поскольку $E_d = 0$. Здесь $r_{ст}$ и r_c — активные сопротивления обмотки статора и питающей сети.

Можно также не учитывать реактивный момент, который в неявнополюсных двигателях вообще отсутствует, а в явнополюсных при больших скольжениях невелик, имеет знакопеременный характер (частота $2s$) и не оказывает влияния на среднее значение угловой скорости, как и незначительные моменты $m_{ас\sim}$.

Разгон невозбужденного синхронного электродвигателя до подсинхронной угловой скорости определяется в основном средним значением асинхронного момента $m_{ас}$, который в дальнейшем будем называть просто асинхронным моментом. В конце первого этапа, т. е. при скольжениях,

близких к s_a, сказывается также влияние дополнительного момента $m_{дп}$.

В целях приближения анализа разгона синхронного двигателя до подсинхронного скольжения к самозапуску асинхронного двигателя отметим, что в идеализированном частном случае, когда к обмотке возбуждения неявнополюсного синхронного двигателя подключено бесконечно большое разрядное сопротивление, между ними нет никакой разницы.

В общем случае асинхронный момент синхронного двигателя можно выразить в виде трех составляющих. При короткозамкнутой обмотке ротора или при глухом подключении возбудителя

$$m_{ac,г}=m_d'+m_d''+m_q'', \qquad (6$$

где

$$m_d'=\frac{U_д^2}{2}\left(\frac{1}{x_d'}-\frac{1}{x_d}\right)\frac{sT_d'}{1+(sT_d')^2}; \qquad (6$$

$$m_d''=\frac{U_д^2}{2}\left(\frac{1}{x_d''}-\frac{1}{x_d'}\right)\frac{sT_d''}{1+(sT_d'')^2}; \qquad (6$$

$$m_q''=\frac{U_д^2}{2}\left(\frac{1}{x_q''}-\frac{1}{x_q}\right)\frac{sT_q''}{1+(sT_q'')^2}. \qquad (6$$

В формулах (66) переходная постоянная времени по продольной оси T_d' и сверхпереходные постоянные времени по продольной T_d'' и поперечной T_q'' осям выражены в радианах и связаны с соответствующими постоянными времени τ, выраженными в секундах, соотношением

$$T=2\pi f\tau, \qquad (6$$

где f — частота напряжения сети, Гц.

Каждая из трех составляющих асинхронного момента имеет максимумы, равные

$$m_{d,\,max}'=\frac{1}{4}\left(\frac{1}{x_d'}-\frac{1}{x_d}\right);\quad m_{d,\,max}''=\frac{1}{4}\left(\frac{1}{x_d''}-\frac{1}{x_d'}\right);$$

$$m_{q,\,max}''=\frac{1}{4}\left(\frac{1}{x_q''}-\frac{1}{x_q}\right) \qquad (6$$

при скольжениях соответственно

$$s_m'=1/T_d';\quad s_{m,d}=1/T_d'';\quad s_{m,q}=1/T_q''. \qquad (6$$

С учетом этих выражений формулы (66а) — (66в) можно записать в виде (61)

$$m_d'=\frac{2m_{d,\,max}'U_д^2}{s/s_m'+s_m'/s}; \qquad (70а)$$

$$m_d''=\frac{2m_{d,\,max}''U_д^2}{s/s_{m,\,d}+s_{m,\,d}/s}; \qquad (70б)$$

$$m_q''=\frac{2m_{q,\,max}''U_д^2}{s/s_{m,\,q}+s_{m,\,q}/s}. \qquad (70в)$$

Таким образом, каждая из трех составляющих асинхронного момента синхронного двигателя определяется так же, как и вращающий момент асинхронного двигателя.

Формулами (66а) и (70а) выражается момент, образуемый за счет обмотки возбуждения; (66б) и (70б) — за счет пусковых контуров ротора по продольной оси; (66в) и (70в) — за счет пусковых контуров ротора по поперечной оси. Для неявнополюсных синхронных двигателей сверхпереходные сопротивления по продольной и поперечной осям равны между собой ($x_q''=x_d''$), а для явнополюсных разница между ними не превышает 10%. Такие же соотношения имеют место и для сверхпереходных постоянных времени по двум осям (см. приложение 4) [1, 2, 8]. Приняв для всех синхронных двигателей $x_q''\approx x_d''$ и $\tau_q''\approx\tau_d''$, получим, что составляющие асинхронного момента m_d'' и m_q'' будут иметь максимум в одной и той же точке при скольжении $s_{m,d}$, а суммарный момент, обусловленный пусковой обмоткой (для неявнополюсного двигателя ей эквивалентен поверхностный слой бочки ротора), составит

$$m''=m_d''+m_q''=\frac{2m_{max}''U_д^2}{s/s_{m,\,d}+s_{m,\,d}/s}=$$

$$=\frac{U^2}{2}\left(\frac{2}{x_d''}-\frac{1}{x_d'}-\frac{1}{x_q}\right)\frac{sT_d''}{1+(sT_d'')^2}, \qquad (71)$$

где

$$m_{max}''=\frac{1}{4}\left(\frac{2}{x_d''}-\frac{1}{x'_d}-\frac{1}{x_q}\right). \qquad (72)$$

Уравнение (66) примет вид

$$m_{ac,г}=m_d'+m''. \qquad (73)$$

На рис. 24,*а* приведены составляющие асинхронного момента m'' (кривая *1*) и m_d' (кривая *2*). Зависимость суммарного асинхронного момента синхронного двигателя от

скольжения при глухом подключении возбудителя ($m_{ac,г}$) выразится кривой *3*, имеющей провал в зоне подсинхронных скольжений. Для наглядности на рис. 24,*б* зона малых скольжений изображена в увеличенном масштабе. При подключении к обмотке возбуждения разрядного резистора кратностью k_R практически изменяется только переходная постоянная времени по продольной оси

$$\tau'_{d,R} = \frac{\tau_d'}{1+k_R}. \qquad (74)$$

Следовательно, изменится только составляющая асинхронного момента m_d'. Асинхронные моменты синхронного

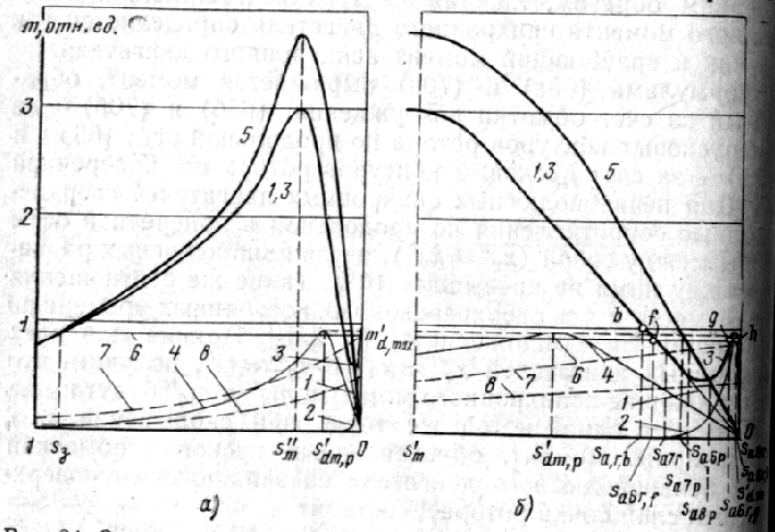


Рис. 24. Зависимость разгона синхронного двигателя до подсинхронной скорости от способа подключения возбудителя и момента сопротивления m_c агрегата:

1 — m''; *2* — m_d'; *3* — $m_{ac,г}=m''+m_d'$; *4* — $m_{d,p}'$; *5* — $m_{ac,p}=m''+m_{d,p}'$; *6* — $m_c=0{,}9=\text{const}$; *7* — $m_c \sim \omega^2$ (при $s=0$ $m_c=0{,}9$); *8* — $m_c \sim \omega^2$ (при $s=0$ $m_c=0{,}5$)

двигателя при подключении разрядного резистора $m_{ac,p}$ и при глухом подключении возбудителя будут отличаться при одном и том же напряжении на величину

$$\Delta m = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{x_d'}-\frac{1}{x_d}\right)\left[\frac{sT'_{d,p}}{1+(sT'_{d,p})^2}-\frac{sT_d'}{1+(sT_d')^2}\right], \qquad (75)$$

а связь между ними выразится как

$$m_{ac,г}=m_{ac,p}-\Delta m. \qquad (76)$$

Максимальное значение момента при включении разрядного резистора $m'_{d,max}$ не изменится, а соответствующее ему скольжение увеличится до $s'_{m,p}=1/T'_{d,R}$. Составляющая момента m_d' выразится как

$$m'_{d,p}=m_d'+\Delta m=\frac{2m'_{d,max}U_д^2}{s/s'_{m,p}+s'_{m,p}/s}, \qquad (77)$$

а суммарный асинхронный момент — как

$$m_{ac,p}=m'_{d,p}+m''. \qquad (78)$$

Составляющая момента $m'_{d,p}$ при наличии разрядного резистора на рис. 24 изображена кривой *4*, а суммарный асинхронный момент для этого случая ($m_{ac,p}$) — кривой *5*.

Если обмотка ротора замкнута на очень большое разрядное сопротивление, т. е. $k_R \to \infty$, то $\tau'_{d0} \to 0$ и $m'_{d,p} \to 0$. Тогда $m_{ac}=m''$ и мы имеем дело с упомянутым выше идеализированным частным случаем, когда асинхронный момент синхронного двигателя полностью идентичен моменту асинхронного двигателя.

Аналогично асинхронному двигателю подключенный к сети синхронный двигатель будет разгоняться, если развиваемый им асинхронный момент окажется больше момента сопротивления, т. е. при выполнении условия (62). Подсинхронное скольжение, до которого разгонится двигатель, определяется точкой пересечения характеристик асинхронного момента и момента сопротивления.

Все условия, оговоренные в § 12, справедливы и для первого этапа разгона синхронного двигателя. Однако, в конце этого этапа, т. е. в зоне подсинхронного скольжения, существенным образом сказываются специфические особенности синхронного двигателя.

Кроме характеристик асинхронного момента и его составляющих на рис. 24 приведены некоторые характеристики момента сопротивления: для механизма с неизменным моментом сопротивления, равным 0,9 (прямая *6*); для механизма с моментом сопротивления, зависящим от квадрата угловой скорости, имеющего при $s=0$ $m_c=0{,}9$ (кривая *7*), и для аналогичного механизма с моментом сопротивления при синхронной угловой скорости, равным 0,5 (кривая *8*). Характеристики асинхронного момента синхронного двигателя показаны для одного напряжения, поскольку его влияние полностью идентично влиянию на момент асинхронного двигателя.

Как видно из рисунка, при включении в ротор разрядного сопротивления асинхронный момент синхронного двигателя (кривая *5*) больше, чем при глухом подключении

возбудителя (кривая *3*), почти во всем диапазоне скол жений. Подсинхронное скольжение для каждого вида на грузки определяется однозначно и составляет при m_c= =0,9=const величину s_{a6p} (точка пересечения кривых и *6*), а при $m_c \sim \omega^2$ в зависимости от нагрузки s_{a7p} (пере сечение кривых *5* и *7*) или s_{a8p} (пересечение кривых *5* и *8*). При моменте сопротивления, не зависящем от угловой ско рости, разгон до подсинхронной угловой скорости буде обеспечен, если за время перерыва питания скольжени увеличится не более чем до $s_з$, а при «вентиляторной» ха рактеристике механизма — вплоть до полной остановки аг регата.

При глухом подключении возбудителя зависимость асин хронного момента от скольжения имеет сложную форм (кривая *3*) и при определенных нагрузках имеет три точ ки пересечения с характеристикой момента сопротивлени В частности, с характеристикой *6* кривая *3* пересекаетс в точках *f*, *g* и *h*. Из рисунка видно, что если за врем перерыва питания скольжение превысило значени $s_{a6г,f}$ ($s_з > s > s_{a6г,f}$), то двигатель разгонится до подсинхрон ного скольжения $s_{a6г,j}$. Если к моменту восстановления пи тания скольжение окажется в интервале $s_{a6г,f} > s > s_{a6г,}$ то двигатель после восстановления питания затормозитс до $s_{a6г,f}$. Если же перерыв электроснабжения был кратко временным и скольжение увеличилось не более чем д $s_{a6г,g}$ ($s < s_{a6г,g}$), установившееся скольжение будет $s_{a6г,}$

Аналогичный результат получится и при моменте со противления, изображенном кривой *7*. При малой нагру ке, когда характеристика момента сопротивления (кри вая *8*) проходит ниже провала в характеристике асинхро ного момента, двигатель при глухом подключении возб дителя разгонится до малого подсинхронного скольжени $s_{a8г}$. При большой нагрузке подсинхронное скольжение бу дет очень большим. Если момент сопротивления равен 1, то пересечение кривых *3* и *6* будет только в одной точ при скольжении $s_{a,г,b}$.

На заключительную стадию первого этапа разгона си хронного двигателя существенное влияние может оказат дополнительный момент $m_{дп}$. При достаточно больш электромагнитных постоянных времени затухание токов обмотках статора и ротора отстает от процесса разгон Получается, что мгновенное значение токов при разго выше, чем при вращении с постоянной угловой скорост для того же скольжения. В результате мгновенное знач ние момента может быть больше асинхронного момент

соответствующего подсинхронному скольжению [12]. Следовательно, если двигатель за время нарушения электроснабжения затормозился до достаточно большого скольжения, то за счет набранного в зоне больших скольжений ускорения он может разогнаться до скольжения, меньшего $s_{a6г,f}$. В этом случае возможно, что установившимся скольжением подсинхронного режима окажется $s_{a6г,h}$. Однако режим самозапуска следует рассчитывать на худший случай, т. е. разгон до скольжения $s_{a6г,f}$.

В общем случае при наличии разрядного сопротивления синхронный двигатель разгоняется до более высокой подсинхронной угловой скорости, чем при глухом подключении возбудителя или закороченной обмотке возбуждения, если асинхронный момент в зоне провала (между точками *f* и *g*) меньше, чем момент сопротивления в той же зоне, что имеет место в большинстве случаев. Если же в зоне провала асинхронного момента его значение остается выше, чем значение момента сопротивления, то двигатель разгонится до более высокой угловой скорости. Минимальный асинхронный момент в зоне провала при глухом подключении возбудителя

$$m_{ас.\,г.\,пр} \approx 4U_д^2 \left[\frac{m'_{d,\,max}(1 + m'_{d,\,max}/m''_{max})}{1 + 4(1 + m'_{d,\,max}/m''_{max})} + \right.$$

$$\left. + (m'_{d,\,max} + m''_{max}) \frac{s_m'}{s_{m,\,d}} \right] \qquad (79)$$

имеет место при скольжении

$$s_{пр} \approx 2s'_m(1 + m'_{d,max}/m''_{max}). \qquad (80)$$

Значение подсинхронного скольжения определяют графоаналитическим способом, как показано на рис. 24, либо с помощью ЭВМ, принимая правую часть уравнения движения (60) равной нулю: $m_{ас} - m_с = 0$. В некоторых случаях возможно получение решения аналитическим путем.

Из рис. 24,*б* видно, что в зоне подсинхронных скольжений при значении момента двигателя до 2—3 номинального его зависимость от скольжения при включении в обмотку ротора разрядного резистора имеет линейный характер, т. е. $m_{ас,р} \sim s$ при $m \leqslant 2 \div 3$. В каталогах на синхронные двигатели проводится кратность так называемого «входного» момента при номинальном напряжении $m_{вх}$,

представляющего собой асинхронный момент при скольжении $s=0{,}05$. Тогда

$$m_{\text{ас. р}} = U_{\text{д}}^2 m_{\text{вх}} \frac{s}{0{,}05}. \qquad (81)$$

Зная значение момента сопротивления, которое в зоне подсинхронных скольжений может быть принято постоянным и равным моменту сопротивления при синхронной угловой скорости $m_{\text{с1}}$, получаем (при кратностях сопротивления разрядного резистора, соответствующих данным каталога)

$$s_{\text{а. р}} = \frac{0{,}05 m_{\text{с1}}}{U_{\text{д}}^2 m_{\text{вх}}}. \qquad (82)$$

Поскольку момент сопротивления не сохраняется до значения больше 1,0, а линейность асинхронного момента 2—3, формулы (81) и (82) будут справедливы при напряжении на зажимах двигателя не менее 0,7—0,6. К тому времени, когда синхронные двигатели достигнут подсинхронного скольжения, асинхронные двигатели, участвующие в самозапуске, также приблизятся к своей рабочей скорости. При этом индуктивные сопротивления всех двигателей возрастут и согласно § 11 напряжения на зажимах двигателей также повысятся. Это обеспечивает применимость формул (81) и (82) в большинстве практических случаев.

При глухом подключении возбудителя, как видно из рисунка, значение подсинхронного скольжения неоднозначно и его аналитическое выражение оказывается неприемлемым для практического пользования. Время разгона синхронного двигателя до подсинхронной скорости можно определить согласно [8].

14. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСПЕШНОСТИ РЕСИНХРОНИЗАЦИИ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Если в обмотку возбуждения синхронного двигателя, работающего в асинхронном режиме с подсинхронным скольжением, подать напряжение, суммарный момент, развиваемый синхронным двигателем, будет определяться уравнением (64).

Синхронизирующий момент, определяемый наличием возбуждения, равен

$$m_{\text{в}} = \frac{U_{\text{д}} E_q}{x_d} \sin\delta. \qquad (83)$$

Его значение в зависимости от угла между векторами ЭДС двигателя и напряжения сети будет то положительным, то отрицательным (рис. 25, кривая *1*). В результате возникнут колебания угловой скорости около подсинхронного значения. Если в период действия положительной полуволны синхронизирующего момента двигатель достигнет синхронной угловой скорости, то произойдет втягивание в синхронизм. Из (83) следует, что синхронизирующий момент тем больше, чем больше напряжение на зажимах двигателя и чем больше развиваемая им ЭДС, которая в свою очередь зависит от степени форсировки возбуждения.

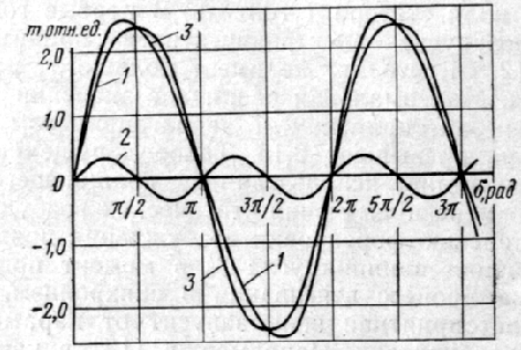


Рис. 25. Синхронизирующие моменты синхронного двигателя: *1* — $m_{\text{в}}$; *2* — $m_{\text{р}}$; *3* — синхронизирующий момент для явнополюсного двигателя

Так называемый «реактивный» момент явнополюсного синхронного двигателя, который не зависит от наличия возбуждения (рис. 25, кривая *2*), имеет двойную частоту по сравнению с моментом $m_{\text{в}}$ и определяется по формуле

$$m_{\text{р}} = \frac{U_{\text{д}}}{2}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right)\sin 2\delta. \qquad (84)$$

Общий синхронизирующий момент в явнополюсном двигателе определяется суммой этих двух моментов (рис. 25, кривая *3*). Максимальное значение реактивного момента невелико (не более 0,3) и на процесс втягивания в синхронизм существенного влияния не оказывает, тем более что максимум реактивного момента не совпадает с максимумом основного синхронизирующего момента $m_{\text{в}}$.

Тормозной момент (65) при наличии возбуждения не равен нулю. Однако при $s \approx 0$ знаменатель первого множителя возрастает до единицы, а числитель мал, так как

при мощности двигателя 200 кВт и более сопротивление обмотки статора, выраженное в относительных единицах, ничтожно. Поэтому момент $m_т$ можно не учитывать.

На вхождение в синхронизм влияет дополнительный момент $m_{дп}$. В практических расчетах его не учитывают, так как нарушение электроснабжения может быть весьма кратковременным, а снижение угловой скорости за этот период небольшим. Тогда $m_{дп}$, связанный с наличием значительного ускорения, не успевает развиться. Исключение этого момента из расчетов создает определенный запас.

Подача возбуждения в синхронный двигатель при его работе на подсинхронной угловой скорости может произойти при любом относительном положении ротора и магнитного поля статора (угол δ_0). В первые годы применения самозапуска электродвигателей принималось допущение [2, 6], что это не имеет большого практического значения. Максимальная разница в значении момента при наиболее благоприятном и неблагоприятном положении ротора не превышает 0,15. Такое допущение безусловно справедливо при использовании вращающегося возбудителя. По мере применения статических возбудителей с высокой степенью форсировки возбуждения появились новые исследования влияния угла δ_0 в момент подачи возбуждения на процесс втягивания в синхронизм. Вообще говоря, благоприятная зона зависит от параметров двигателя и возбудителя. Например, в [13] в качестве наиболее благоприятной зоны указывается $120° < \delta_0 < 150°$, а самые неблагоприятные условия для вхождения в синхронизм имеют место при $\delta_0 \approx 30°$.

Уравнение движения (60) для синхронного двигателя с моментом, выраженным в виде (64), в принципе можно решить, если все слагаемые выразить в функции одного переменного, в частности угла δ. Если считать, что этот угол положителен при отставании вектора ЭДС двигателя от вектора напряжения сети, а число пар полюсов p в общем случае не равно единице, то

$$s = 1 - \omega = 1 - \left(1 - \frac{d\delta}{pdt}\right) = \frac{d\delta}{pdt}; \qquad (85)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{ds}{dt} = -\frac{d^2\delta}{pdt^2}. \qquad (85)$$

Тогда (60) примет вид

$$m_в + m_р + m_{ас} + m_{ас\sim} + m_т + m_{дп} - m_с = -J\frac{d^2\delta}{pdt^2}, \qquad (87)$$

где главную роль играют $m_в$, $m_{ас}$ и $m_с$.

Уравнение (87) является универсальным и может быть использовано для анализа самозапуска синхронного двигателя на всех этапах, т. е. от момента нарушения электроснабжения до момента достижения синхронной скорости после восстановления питания. Однако его решение без упрощений и допущений достаточно сложно даже при условии применения самой современной вычислительной техники. В моменте $m_в$ составляющая E_q зависит от угловой скорости и от постоянной времени контура возбуждения. Если к кольцам ротора прикладывается сразу полное напряжение, равное напряжению при установившемся режиме, и если учесть, что ток возбуждения нарастает плавно, то

$$E_q \approx E_{q.\,у}\left(1 - \frac{d\delta}{pdt}\right)\left(1 - e^{-\frac{t - t_{в1}}{\tau'_d}}\right), \qquad (88)$$

где $E_{q,у}$ — установившееся значение ЭДС двигателя при синхронной скорости; $t_{в1}$ — время подачи напряжения, с.

Если подача возбуждения происходит на подсинхронной угловой скорости, можно принять $\omega = 1$ и тогда

$$E_q \approx E_{q.\,у}\left(1 - e^{-\frac{t - t_{в1}}{\tau'_d}}\right). \qquad (88а)$$

Для приближенных расчетов заключительного этапа, т. е. оценки возможности втягивания в синхронизм, можно принять [2]

$$E_q \approx E_{q,у} \approx \text{const}. \qquad (88б)$$

Реактивный момент может быть легко учтен (84) при $U_д \approx \text{const}$. Асинхронный момент определяется по (73) или (78) с учетом (66а), (70а), (71), (74), (75,), (77) и (85). Учет (85) особенно усложняет решение уравнения (87). Однако если речь идет только о последнем этапе, т. е. о втягивании в синхронизм после достижения подсинхронного скольжения, то при наличии разрядного сопротивления можно воспользоваться формулой (81) в виде

$$m_{ас.\,р} = U_д^{\,2}\frac{m_{вх}}{0{,}05p}\frac{d\delta}{dt}. \qquad (89)$$

Для заключительного этапа самозапуска (вхождения в синхронизм) уравнение (87) наиболее просто решается в каждом конкретном случае в численной форме методом последовательных интервалов, если не учитывать $m_{ас}$, $m_т$ и $m_{дп}$, а остальные моменты двигателя принять с учетом (83), (84), (88б), (89) и $m_с = \text{const}$.

Анализ разгона синхронного двигателя и вхождения в синхронизм можно выполнять также на основе уравнений Парка — Горева с использованием аналоговых или цифровых вычислительных машин [1]. Такие решения выполняются в исследовательских целях. Для практических задач, как правило, достаточно ответить на вопрос: втянется ли в синхронизм после подачи возбуждения двигатель, работающий на подсинхронной скорости. Расчеты, основанные на решении уравнения (87), и анализ экспериментальных данных показывают, что существует некоторое критическое скольжение $s_{кр}$, при котором возможна синхронизация двигателя как при пуске, так и при самозапуске. Если фактическое скольжение превышает это значение, то двигатель в синхронизм не втягивается. Тогда условие успешного вхождения в синхронизм может быть выражено как

$$s_{кр} > s_а. \qquad (90)$$

Известно несколько способов определения $s_{кр}$. Хорошие результаты обеспечивает формула [14, 32]

$$s_{кр} = 0{,}06\sqrt{\frac{m_{в,\,max} - 0{,}6m_c}{\tau_{j,\,ном}}}, \qquad (91)$$

где $m_{в,max}$ — максимальное значение синхронного момента, приводимое в каталогах для максимальной форсировки возбуждения:

$$m_{в,max} = U_д E_q / x_d; \qquad (92)$$

$\tau_{j,ном}$ — постоянная времени, с, определяемая по (4).

В некоторых работах вместо (91) используется выражение

$$s_{кр} = 0{,}065\sqrt{\frac{m_{в,\,max}}{\tau_{j,\,ном}}}, \qquad (93)$$

которое было выведено при допущении, что асинхронный момент двигателя при вхождении в синхронизм практически уравновешивается моментом сопротивления и тормозным моментом [1].

Иногда вместо критерия (90) возможность вхождения в синхронизм оценивается сравнением момента сопротивления механизма при скольжении 0,05 с асинхронным моментом двигателя при том же скольжении, определенном с учетом напряжения на зажимах двигателя и кратности разрядного сопротивления ($m_{ас\,0{,}05} \geqslant m_{с\,0{,}05}$). Этот метод довольно прост, поскольку асинхронный момент при $s = 0{,}05$ и $U_д = 1$ («входной») приводится в каталогах. Метод является приближенным и, как правило, обеспечивает чрезмерный запас.

15. СПОСОБЫ РЕСИНХРОНИЗАЦИИ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

На выбор способа ресинхронизации синхронного двигателя оказывают влияние очень многие факторы: характеристики двигателя, его загрузка, система возбуждения, характер зависимости момента сопротивления от скольжения, момент инерции агрегата, мощность питающей сети, способ автоматического восстановления электроснабжения и т. д.

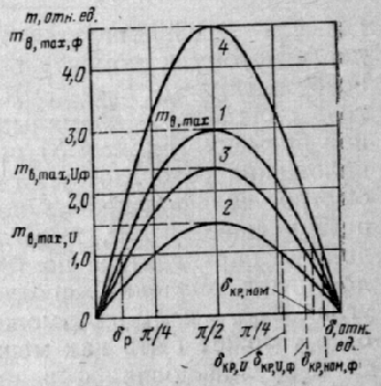


Рис. 26. Синхронизирующий момент и зоны сохранения синхронной работы синхронного двигателя ($\delta_{кр}$):
1 — при $U_{ном}$ без форсировки возбуждения; 2 — то же при пониженном напряжении; 3 — при пониженном напряжении и форсировке возбуждения; 4 — то же при номинальном напряжении

Сначала рассмотрим случай, когда за время перерыва электроснабжения двигатель не выходит за пределы устойчивой синхронной работы. В синхронном режиме при рабочем значении тока возбуждения и номинальном напряжении угол между вектором напряжения сети и ЭДС двигателя составляет $\delta_р$ (рис. 26). При прекращении питания вектор ЭДС начинает отставать от вектора напряжения сети и угол δ увеличивается согласно законам, рассмотренным в § 5. Если к моменту восстановления напряжения до номинального значения угол не успеет достичь некоторого критического значения $\delta_{кр,ном}$, то синхронный момент останется бо́льшим, чем момент сопротивления, и двигатель сохранит синхронный режим, восстановив рабочее значение угла $\delta_р$. Из рисунка ясно, что

$$\delta_{кр,ном} = \pi - \delta_р. \qquad (94)$$

Если напряжение восстановится не до полного, а до некоторого пониженного значения $U_д < 1{,}0$, соответственно (83) уменьшится синхронизирующий момент (рис. 26,

кривая 2) и критическое значение угла $\delta_{кр,U}$ также будет меньше. Считая, что E_q и x_d не изменились, из (83) получим

$$\delta_{кр,\,U} = \pi - \arcsin\left(\frac{\sin\delta_р}{U_д}\right). \qquad (9$$

Однако при пониженном напряжении срабатывает форсировка возбуждения, в результате чего начинает возрастать ток в обмотке возбуждения и ЭДС двигателя. Синхронизирующий момент также начинает увеличиваться (рис. 26, кривая 3) и критическое скольжение станет

$$\delta_{кр,\,U,\,ф} = \pi - \arcsin\left(\frac{\sin\delta_р E_{qр}}{U_д E_q}\right), \qquad (9$$

где E_q — ЭДС двигателя, соответствующая согласно (21) достигнутому к моменту восстановления напряжения току возбуждения i_f; $E_{qр}$ — ЭДС без форсировки. Если двигатель обладает очень малым моментом инерции и постоянной времени τ_j (см. § 3) по сравнению с τ_{d0}, то изменение положения ротора от угла $\delta_р$ до $\delta_{кр}$ произойдет настолько быстро, что форсировка возбуждения практически не успеет осуществиться, и тогда критическое значение угла должно определяться по (95). При $\tau_j > \tau_{d0}$ ЭДС двигателя достигнет значения, соответствующего (96). Разница в углах $\delta_{кр,U}$ и $\delta_{кр,U,ф}$ может быть значительной. Угол $\delta_{кр,U,ф}$ может быть как меньше, так и больше $\delta_{кр,ном}$.

В случае подачи форсированного возбуждения при номинальном напряжении синхронизирующий момент возрастает (рис. 26, кривая 4), однако критическое значение угла $\delta_{кр,ном,ф}$ возрастает не намного по сравнению с $\delta_{кр,ном}$. Во всех случаях $\pi/2 < \delta_{кр} < \pi$.

Зная $\delta_{кр}$, можно определить время, в течение которого оно будет достигнуто. В связи с тем что весь переходный процесс происходит в пределах одного полуоборота ротора, можно считать угловую скорость и момент сопротивления неизменными. Тогда из (23) время достижения критического угла $\delta_{кр}$ составит

$$t_{кр} = \sqrt{\frac{2\tau_j}{p\omega_{синх}}(\delta_{кр} - \delta_р)}, \qquad (97$$

или иначе

$$t_{кр} = \sqrt{\frac{2J_{пр}\omega_{синх}}{pk_з P_{ном}}(\delta_{кр} - \delta_р)}. \qquad (97а$$

где $k_з$ — коэффициент загрузки двигателя, т. е. момент сопротивления, выраженный в относительных единицах

($k_з = m_с = M_с/M_{ном}$); $\delta_{кр}$ и $\delta_р$ выражены в радианах, а остальные величины имеют размерность, указанную в формуле (4).

Если происходило не отключение двигателя, а близкое КЗ, с целью уточнения расчета можно учесть не только момент сопротивления, но и тормозной момент (65). Тогда $k_з = m_с + m_т$.

Обычно синхронные двигатели работают с углом $\delta_р = 15 \div 20° = 0{,}26 \div 0{,}35$ рад. Если $\delta_р = 0{,}3$ рад, то при номинальном напряжении и отсутствии форсировки возбуждения (94) $\delta_{кр} = (\pi - 0{,}3)$ рад и для инерционной постоянной времени $\tau_j = 5$ с получим (97)

$$t_{кр} = \sqrt{\frac{2 \cdot 5}{314}(\pi - 0{,}3 - 0{,}3)} = 0{,}28\text{с}.$$

Если время нарушения электроснабжения не превысило значения $t_{кр}$, то возможно восстановление нормальной работы любого механизма, приводимого синхронным двигателем. Будем называть такой случай самозапуском без потери синхронизма. Для некоторых механизмов он оказывается единственным принципиально возможным способом. Реальное его воплощение тем труднее, чем меньше время $t_{кр}$. Для того чтобы облегчить условия самозапуска без потери синхронизма, как это следует из (95)—(97), возможны следующие пути:

а) повышение напряжения на зажимах двигателя $U_д$ при восстановлении питания до значения, близкого к единице;

б) уменьшение рабочего угла $\delta_р$, т. е. применение двигателя повышенной мощности, что ведет одновременно к уменьшению коэффициента загрузки $k_з$;

в) повышение ЭДС двигателя, т. е. повышение форсировки возбуждения (этот путь эффективен только при $\tau_{d0} < \tau_j$);

г) повышение момента инерции и, следовательно, постоянной времени τ_j, для чего двигатели и агрегаты снабжаются маховиками.

Пути уменьшения времени нарушения электроснабжения будут рассмотрены в гл. 5 и 6.

Следующим способом самозапуска синхронного электродвигателя является ресинхронизация с глухоподключенным возбудителем. Такой способ возможен, если выполнен ряд условий: во-первых, критическое скольжение двигателя, определенное по (91), должно превышать асинхронное скольжение, определенное согласно § 13, т. е.

должно быть выполнено условие (90). Во-вторых, за вр мя перерыва питания скольжение двигателя должно ув личиться не более чем до такого значения, при котор вращающий момент двигателя станет меньше момента с противления агрегата, т. е. не более $s_з$ на рис. 24,*а*. (Е тественно, если момент сопротивления механизма завис от угловой скорости в степени, равной или более двух, эт фактор может не проверяться.). В-третьих, напряжение зажимах двигателя после его восстановления должно бы достаточным для того, чтобы произошел разгон двига ля до подсинхронной скорости (см. § 13). И, нако в-четвертых, в момент восстановления напряжения сп переходное значение тока должно быть в пределах до стимого (см. гл. 3).

Если хотя бы одно из указанных условий не выпо но, самозапуск с глухоподключенным возбудителем не можен. Тогда применяется ресинхронизация с включе разрядного сопротивления. При этом, как следует из ри и § 14, увеличивается значение асинхронного скольж т. е. легче выполняется условие (90), увеличивается хронный момент и отпадает ограничение по току включ

Если синхронный двигатель оборудован пусковы тотрансформатором (реактором), то необходимость ег пользования при самозапуске определяется, как пра двумя условиями: ограничением тока статора двига до допустимого значения и ограничением колебани пряжения в сети.

Если ни один из описанных способов не обеспеч разгона и ресинхронизации двигателя, используется запуск с предварительной разгрузкой механизма. Т способ применяется очень редко. Конкретные схемы запуска синхронных двигателей рассмотрены в § 19

В последние годы разработан, исследован в лаб торных условиях и опробован в промышленных уст ках самозапуск с циклической подачей возбуждения. этом до подсинхронной скорости двигатель разгоняе разрядным сопротивлением, а затем напряжение на ца ротора подается не непрерывно, а лишь в те полуп ды, когда синхронизирующий момент будет направле ложительно, т. е. будет создавать положительное ус ние. При отрицательных значениях момента $m_в$ (83) пряжение в обмотку ротора не подается. Работы в занном направлении ведутся ПО «Союзхимпромэне ВНИИЭ и некоторыми предприятиями химической мышленности.

Глава пятая

ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОЗАПУСКА РАЗЛИЧНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И МЕХАНИЗМОВ

16. САМОЗАПУСК РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Из массы различных механизмов можно выделить некоторые группы, самозапуск которых наиболее часто применяется в разных производствах.

В металлургии, химии, горнорудной и других отраслях промышленности важное значение приобретает самозапуск центробежных насосов. Это относится к тем производствам, в которых даже кратковременный перерыв подачи воды приводит к тяжелым авариям. Еще более остро стоит вопрос об обеспечении самозапуска насосов, перекачивающих различные технологические жидкости и растворы в химических и некоторых других производствах.

Центробежные насосы без обратного клапана со статическим напором, равным нулю, имеют механическую характеристику вентиляторного типа. С ростом статического напора момент сопротивления становится пропорциональным третьей и более (в отдельных агрегатах до пятой-шестой) степени угловой скорости. Это создает предпосылки к легкому обеспечению самозапуска.

Иногда высказывается опасение, что при внезапном отключении нагруженного насоса обратный клапан резко закроется и может выйти из строя с тяжелыми последствиями. Однако такой режим имеет место всегда при отключении двигателя релейной защитой и конструкция любого насоса и его вспомогательных устройств на него рассчитана. Если перерыв электроснабжения невелик, то к моменту его восстановления обратный клапан еще не успеет закрыться и произойдет самозапуск с открытым клапаном.

Более существенное ограничение в применении самозапуска насосов вызывается опасением возможности гидравлического удара в напорном трубопроводе при внезапном включении нагруженного насоса. Различными организациями (ПО «Союзхимпромэнерго», ВНИИЭ, ПО «Союзтехэнерго», наладочными организациями треста «Энергочермет» и др.) проведено большое количество опытов по определению броска давления. В худшем случае при самозапуске мощной группы водяных насосов бросок давления не превышает 90 %. Учитывая сравнительно редкое возникновение режима самозапуска, такие броски давления можно считать допустимыми. Применение соответствующих конструкций напорных трубопроводов позволяет осуществить дальнейшее снижение броска давления. В некоторых случаях может потребоваться усиление крепления гибких элементов трубопровода, например крепления гибкого шланга на металлической трубе (фурмы доменных печей и др.).

Если насос работает с подсосом, то за время перерыва питания он может потерять воду, включиться незаполненным и выйти из строя.

Опыт показывает, что потеря столба воды происходит, как правил лишь при снижении угловой скорости ниже 50 %. Это обеспечивает с хранение работоспособности практически любого мощного насоса пр перерыве электроснабжения на 1—3 с. В сомнительных случаях расч том или опытом можно установить допустимое время перерыва элек троснабжения $t_{доп}$ по условию сохранения столба воды во всасывающем патрубке и насосе. Двигатель оборудуется защитой минимальное напряжения с выдержкой времени $t_з$, обеспечивающей возможность самозапуска лишь при быстром восстановлении электроснабжения (§ 22).

Самозапуск центробежных насосов, приводимых асинхронными ко роткозамкнутыми двигателями, обеспечивается практически во всех случаях. В некоторых установках насос может работать на отдельны водовод и не имеет обратного клапана. Самозапуск таких насосов про исходит при полной рабочей нагрузке. При достаточно длительно перерыве электроснабжения агрегат после остановки начнет вращаться в обратную сторону. Опыт показывает [15], что и в таком режиме са мозапуск асинхронного двигателя с центробежным насосом может быт обеспечен.

Синхронные двигатели обеспечивают самозапуск насосов в боль шинстве случаев по схеме с глухоподключенным возбудителем. Если на грузка близка к номинальной, то может потребоваться схема ресин хронизации с введением разрядного резистора.

В некоторых производствах требуется бесперебойное снабжени сжатым воздухом (блоки разделения воздуха в химическом произво стве, пневмотранспорт и др.) или другим газом. При значительны расходах сжатого воздуха в настоящее время применяют турбоком прессоры с подачей 250 м³/мин и более. Приводятся они, как пр вило, синхронными турбодвигателями мощностью 1500—18 000 кВ 3000 об/мин.

Турбокомпрессор имеет вентиляторную механическую характерист ку. Поэтому в режиме самозапуска работа агрегата мало чем отличае ся от работы центробежного насоса. Для механизма самозапуск инк кой опасности не представляет, если он обеспечен для всех вспомога тельных механизмов — системы смазки, охлаждения и т. д. Самозапус обеспечивается достаточно легко. Большинство синхронных двигателе допускает самозапуск с глухоподключенным возбудителем через рабо чий линейный реактор. Если асинхронный или синхронный двигатель имеет реакторный или автотрансформаторный пуск, целесообразно самозапуск производить с введением пускового элемента. Вообще са мозапуск мощных турбокомпрессоров ограничивается, как правило, м моментом двигателя, а его влиянием на сеть. Аналогичным образо обеспечивается самозапуск различного вида турбогазодувок, эксгауст ров и им подобных механизмов.

Более сложно решается вопрос самозапуска поршневых компре соров. Для них характерны высокие коэффициенты загрузки приво

ных электродвигателей, очень малые моменты инерции и инерционные постоянные времени, порой не превышающие десятых долей секунды, независимость момента сопротивления от угловой скорости, низкие собственные угловые скорости. Пуск таких агрегатов почти всегда осуществляется с разгруженным механизмом.

Поршневые компрессоры для систем сжатого воздуха имеют, как правило, подачу 100, 50 м³/мин и менее и давление на выходе 0,8 МПа. Количество цилиндров два (при малой производительности — один). Частота движений поршней равна частоте вращения двигателя. Для таких агрегатов вопрос об осуществлении самозапуска решается путем выбора электродвигателей со специальными характеристиками — когда пусковой момент высок, а номинальное (для синхронного двигателя — подсинхронное) скольжение мало. В некоторых случаях может быть завышена номинальная мощность двигателя. Самозапуск обеспечивается тем легче, чем выше частота движений поршней и соответственно угловая скорость двигателя и чем ниже загрузка двигателя.

Если для привода поршневого компрессора с номинальной подачей 100 м³/мин требуется синхронный двигатель 167 об/мин, то при его номинальной мощности 625 кВт самозапуск обеспечивается при перерыве электроснабжения до 1,5 с (скольжение увеличивается до 0,3) по схеме с глухоподключенным возбудителем, а при перерыве до 3 с — с введением разрядного сопротивления. Синхронный двигатель 300 кВт, 375 об/мин обеспечивает самозапуск поршневого компрессора с подачей 50 м³/мин по схеме с глухоподключенным возбудителем при повышении скольжения до 0,9. При меньшей номинальной мощности электродвигателей самозапуск возможен лишь при условии разгрузки механизма. При этом для двухцилиндровых компрессоров целесообразно соединить с атмосферой выхлопы обоих цилиндров.

Наибольшие трудности вызывает осуществление самозапуска многоцилиндровых поршневых компрессоров химических производств с высоким давлением на выходе (32 МПа и более), требующих применения электродвигателей большой мощности (1000—6000 кВт). Компрессор с двигателем соединяется через редуктор. Если за время перерыва электроснабжения угол δ не превысит критического значения, произойдет самозапуск без потери синхронизма. Для некоторых поршневых компрессоров это вообще единственно возможный способ осуществления самозапуска, так как разгрузка механизма возможна не всегда (в зависимости от химического состава газа и конструкции газопроводов). Однако из-за очень малого момента инерции и высокого коэффициента загрузки время достижения критического угла, определяемое по (97), составляет менее 0,2 с (обычно 0,12—0,15 с). Добиться того, чтобы время перерыва электроснабжения в случае исчезновения питания было меньше указанного при существующих параметрах коммутационной аппаратуры серийного изготовления в сетях 6—10 кВ, не представляется возможным. Что касается близких КЗ, вызывающих глубо-

кое снижение напряжения, то на ряде предприятий радикально решен вопрос их локализации за время менее 0,15 с (см. § 22).

В некоторых случаях самозапуск поршневых компрессоров осуществляется и при более длительных нарушениях электроснабжения. Например, синхронные двигатели ДСКП-260-24/36 привода аммиачных компрессоров при коэффициенте загрузки 0,5—0,6 обеспечивают самозапуск при перерыве питания 2 с и более [16]. При загрузке примерно 0,6 возможен самозапуск с введением разрядного резистора в цепь ротора при перерыве питания до 1,9 с. При загрузке 0,7 самозапуск возможен только при условии отключения всей прочей нагрузки, что затрудняет сохранение работоспособности производства в целом. При более высоких загрузках самозапуск невозможен.

В настоящее время в опытном порядке на двух агрегатах используется самозапуск по схеме с циклической подачей форсированного возбуждения, упомянутой в § 15. При этом оказывается возможным обеспечить самозапуск при коэффициенте загрузки двигателя примерно 0,8.

В общем случае самозапуск мощных поршневых компрессоров может быть обеспечен, если при снижении угловой скорости агрегат разгружается и затем загрузка подается лишь после вхождения двигателя в синхронизм. При самозапуске поршневых компрессоров необходимо обеспечить самозапуск и бесперебойную работу вспомогательных механизмов (цилиндровая и подшипниковая смазка, охлаждение и т. д.), что обычно трудностей не вызывает. Целесообразно применение блокировок, отключающих двигатель при нарушении работы вспомогательных устройств.

Особое значение приобретают вопросы обеспечения комплексного самозапуска всех механизмов технологической линии, обеспечивающих ее безаварийную работу. Если же речь идет о предприятии с непрерывной технологией, то остановка хотя бы одного двигателя приводит к расстройству и остановке всей технологической линии. Поэтому в самозапуске должны участвовать все необходимые двигатели. Если их одновременный самозапуск невозможен, он выполняется ступенчатым. Если же и это невыполнимо, следует ограничиться самозапуском двигателей только тех механизмов, которые необходимы для предотвращения аварии, порчи оборудования или остановки технологического процесса после восстановления напряжения (см. § 1). Естественно, следует стремиться к обеспечению самозапуска максимального количества электродвигателей.

В настоящее время на многих производствах с непрерывным технологическим циклом осуществлен самозапуск целых технологических линий. Конкретные решения в различных случаях могут быть существенно различными. В основном они определяются максимальным временем нарушения электроснабжения, после которого еще возможно восстановление нормальной работы агрегата или линии в целом. В табл. 1 приведены данные о допустимых значениях продолжительности перерыв-

Таблица 1. *Допустимое время нарушения электроснабжения*

Потребитель	Допустимое время, с
Коксохимическое производство	
Гравитационное, сушильное и флотационное отделения обогатительной фабрики	1—2
Дробильные и смесительные машины, отделение предварительного дробления	1—2
Насосы подачи оборотной воды на охлаждение первичных холодильников и подачи надсмольной воды на орошение газосборников и в аммиачное отделение	1—2
Эксгаустер	1—2
Цех ректификации бензола	1—2
Окускование	
Корпус дробления и измельчения кокса, известняка	1
Конвейеры подачи агломерата в бункер доменного цеха и готовых окатышей	1
Обогатительное производство	
Дробилки	1
Прокатное производство	
Непрерывные прокатные станы	До 1
Химическая и нефтехимическая промышленность	
Аммиачные и другие мощные поршневые компрессоры	0,13—0,2
Другие потребители аммиачных производств	1—2
Завод синтетического спирта	0,2
Каталитический крекинг	3—5
Каталитический риформинг	3
Установка деасфальтизации	1,5—3
Атмосферно-вакуумная трубчатка	2—3
Завод синтетического каучука	
Цех газораспределения	1
Цех выделения каучука	1—2
Цехи полимеризации и экстрактивной дистилляции	2—3
Цех дегидрирования бутилена	3
Цех дегидрирования бутана	5—8
Автомобильный завод	
Шахтные печи, работающие на газе	0,1
Энергетические установки	
Водонасосные, кислородные и компрессорные (для сжатого воздуха) станции, трубогазодувки, эксгаустеры	1—3
Вытяжные вентиляторы ядовитых веществ	0,1—1

ва электроснабжения для некоторых наиболее характерных потребителей [17, 18].

17. САМОЗАПУСК МЕХАНИЗМОВ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Характерным примером комплексного обеспечения самозапуска механизмов технологической линии является решение этого вопроса для собственных нужд тепловых электростанций на основе директивных указаний Минэнерго СССР «О самозапуске электроприводов собственных нужд тепловых электростанций» и «Рекомендации по восстановлению режимов основного оборудования после кратковременных перерывов электроснабжения собственных нужд электростанции» [19].

В первую очередь должен быть обеспечен самозапуск электродвигателей особо ответственных механизмов, отключение которых может привести к повреждению котла, турбины или генератора, а также механизмов, отключение которых приводит к нарушению технологического режима и снижению нагрузки. Первая из этих групп ни при каких условиях не отключается от шин защитой минимального напряжения, а вторая оборудуется защитой, имеющей уставку по напряжению, равную $0{,}5U_{ном}$, и выдержку времени 3—9 с.

Особенно опасны уменьшение расхода воды в корпусе котла и в конденсаторах турбины, снижение уровня воды в барабане котла, снижение давления на всасывающей и напорной сторонах питательных насосов, падение давления жидкости в системе смазки и регулирования турбины, а также в системе смазки генератора и агрегата питательного насоса, снижение производительности питателей пыли, уменьшение разряжения в топке котла, повышение давления в обратной магистрали сетевой воды теплофикационного блока. Следовательно, требуется самозапуск питательных насосов, насосов регулирования турбин, циркуляционных насосов, дутьевых вентиляторов, бустерных конденсатных насосов и др. Полный перечень механизмов, электродвигатели которых должны участвовать в самозапуске, определяется в каждом конкретном случае в зависимости от местных условий.

Отключение таких механизмов, как шаровые мельницы, перекачивающие насосы, багерные и шламовые насосы гидрозолоудаления, топливоподача, не приводит к немедленному изменению нагрузки котлов, турбин и генераторов и поэтому их относят к неответственным. Они отключаются защитой минимального напряжения первой ступени, выполненной с таким расчетом, чтобы при малых перерывах электроснабжения, после которых снижение напряжения на зажимах двигателей будет небольшим, эти электродвигатели участвовали в самозапуске совместно с электродвигателями ответственных механизмов, а при более длительных нарушениях отключались, обеспечивая тем самым возможность самозапуска ответственных механизмов. Обычно время срабатывания первой ступени защиты минимального напряжения составляет 0,5 с, а уставка по напряжению 0,65—0,7.

Как видно из перечня механизмов, участвующих в самозапуске, в основном это насосные агрегаты и вентиляторы. Их самозапуск осуществляется достаточно легко. В большинстве случаев они приводятся во вращение асинхронными электродвигателями. Поэтому для ориентировочных расчетов можно воспользоваться упрощенной методикой [19].

Допустимое время перерыва электроснабжения двигателей собственных нужд зависит от характера вызвавших его причин. Если рабочий источник питания отключился быстродействующей защитой (токовой отсечкой, дифференциальной защитой) или вследствие ошибочного отключения персоналом, время перерыва электроснабжения может достигать 1,5 с. В эксплуатации возможны специфические условия, в которых время перерыва электроснабжения собственных нужд может отличаться от указанного.

Минимально допустимое расчетное значение напряжения на шинах секций собственных нужд 6 кВ в момент восстановления электроснабжения должно быть для тепловых электростанций среднего давления 0,55, для электростанций высокого давления с поперечными связями и для блочных электростанций с агрегатами мощностью 150 МВт и более — 0,6. Если в качестве электропривода питательных электронасосов использованы двигатели с пусковым моментом менее 0,8 и время перерыва питания превышает 0,7 с, то минимальное напряжение должно быть 0,65. Минимально допустимое напряжение на шинах 0,4 кВ может быть принято равным 0,55.

Расчеты самозапуска проводятся для самых неблагоприятных режимов работы оборудования, т. е. когда начальные напряжения на шинах собственных нужд оказываются минимальными. Напряжение на разгруженных резервных источниках электроснабжения должно быть в пределах 1,05—1,1. При значениях напряжения на секциях собственных нужд в момент восстановления напряжения не менее указанных выше самозапуск обычно проходит успешно. При этом продолжительность успешного самозапуска всех двигателей, как правило, не превышает 35 с для электростанций среднего давления, 25 с для электростанций высокого давления с поперечными связями по пару, 20 с для блочных электростанций с агрегатами мощностью более 150 МВт.

Требования к схемам электроснабжения собственных нужд, устройствам релейной защиты и автоматики должны соответствовать указанным в гл. 6 и [19]. Из специфических требований следует отметить нецелесообразность ускорения действия максимальной токовой защиты, если ее выдержка времени не превышает 1,2 с, а при превышении указанного значения необходимо вводить ускорение действия до 0,5—0,7. Действие релейной защиты должно быть согласовано с работой технологических блокировок и защит.

В некоторых случаях значения напряжения в момент его восстановления могут отличаться от указанных выше 0,55—0,65. Например, на

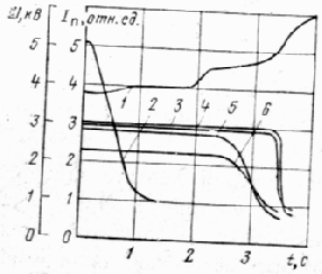


Рис. 27. Напряжение *1* и токи *2—6* при самозапуске электродвигателей собственных нужд блока 300 МВт:

2 — резервный возбудитель; *3* — питательный насос; *4* — циркуляционный насос; *5* — дымосос; *6* — дутьевой вентилятор

блоке 300 МВт на отдельных электростанциях может быть обеспечен самозапуск собственных нужд после перерыва питания 3 с при значении напряжения в момент его восстановления 0,51 [20]. Это объясняется приближенностью расчета по методике [19]. Именно поэтому директивные материалы рекомендуют для окончательного решения вопроса о возможности самозапуска пользоваться более точными методиками и экспериментальными данными.

На рис. 27 приведены значения напряжения на секции 6 кВ и тока основных двигателей при самозапуске механизмов собственных нужд блока 300 МВт. Следует подчеркнуть, что на блоках 300 МВт электродвигатели питательных насосов по условиям самозапуска имеют благоприятную механическую характеристику и поэтому могут разгоняться при напряжении 0,55. На блоках же 200 МВт для этих насосов необходимо напряжение не ниже 0,67 [20], поэтому они, как правило, разгоняются последними. Если после разгона всех остальных электродвигателей напряжение на секции не поднимется до этого значения, то самозапуск электродвигателей собственных нужд блока 200 МВт будет неуспешным. Пример схемы устройства автоматического включения резервного питания секции собственных нужд тепловой электростанции и расчет ее параметров приведен в гл. 6.

Определенной спецификой обладают собственные нужды крупных блочных, в том числе атомных электростанций. При нормальной работе секция собственных нужд получает питание через трансформатор собственных нужд, подключенный к генераторному напряжению своего блока (§ 21). Переход на резервное питание от пускорезервного трансформатора под действием АВР обычно выполняется с кратковременным перерывом питания. Если сеть, к которой подключен пускорезервный трансформатор, обладает небольшой мощностью КЗ (порядка 400 МВ·А), то самозапуск двигателей собственных нужд блока РБМК-1000 может быть успешным лишь при перерыве питания не более 1 с и при участии в самозапуске не более одного главного циркуляционного насоса [21]. Если же пускорезервный трансформатор перед этим уже нес какую-то нагрузку, то самозапуск может оказаться неуспешным.

При более мощной сети (мощность КЗ порядка 5000 МВ·А) условия самозапуска двигателей собственных нужд несколько лучше. Если

пускорезервный трансформатор не нес никакой нагрузки, то после перерыва питания 2,5 с самозапуск ответственных механизмов блока длится 24 с. Хотя при этом на 10 с прекращается подача воды от части питательных насосов и на 1,1 с от конденсатных насосов второй ступени, что вызывает сокращение подачи половины главных циркуляционных насосов до 0,82—0,9 на время 14 с, тем не менее устойчивость режимов блока сохраняется и самозапуск можно считать успешным. Если же пускорезервный трансформатор нес нагрузку, то одновременный самозапуск собственных нужд блока 1000 МВт не обеспечивается.

Для обеспечения самозапуска электродвигателей собственных нужд указанного блока при срабатывании технологических защит турбины или при системных авариях даже в условиях слабого резервного источника питания перевод собственных нужд с рабочего источника на резервный в принципе может осуществляться без перерыва питания. Для этого при работе любой технологической защиты (в том числе от осевого сдвига, потери вакуума и др.) необходимо сначала автоматически включить резервный ввод собственных нужд, а уже потом отключить генератор и рабочее питание собственных нужд. Это позволяет сохранить в работе все главные циркуляционные насосы при незначительной (менее 1 с) задержке в отключении генератора от сети, что не скажется на объеме разрушений турбины даже при работе ее мгновенных защит, так как время выбега несоизмеримо больше времени задержки [21]. Сложность перевода собственных нужд с рабочего на резервный источник без перерыва питания заключается в определении допустимости несинхронного включения по условиям работы как двигателей (см. гл. 3), так и генераторов, турбины и трансформаторов.

В указанных режимах до отключения рабочего ввода генератор и двигатели собственных нужд выбегают совместно. В зависимости от момента отключения блока от сети выбег может начинаться из двигательного режима генератора либо из генераторного. При системных авариях и быстром отключении блока совместный выбег может начинаться и от сверхсинхронной скорости (скольжение до 0,12). Это накладывает отпечаток на режим последующего самозапуска.

На рис. 28 по расчетным данным [21] приведены характеристики самозапуска электродвигателей собственных нужд блока РБМК-1000 в различных режимах. Показаны скольжения генератора и пяти двигателей, напряжения генератора и секции собственных нужд, токи двигателей. За положительное скольжение принято скольжение при угловой скорости ниже синхронной, за отрицательное — выше синхронной.

Сигнал на отключение основного и включение резервного источника питания может подаваться одновременно. В этом случае на шинах собственных нужд блока 450 МВт тепловой электростанции бестоковая пауза составляет примерно 1,5—2 периода, что обеспечивает самозапуск всех двигателей собственных нужд. Сверхпереходное значение тока

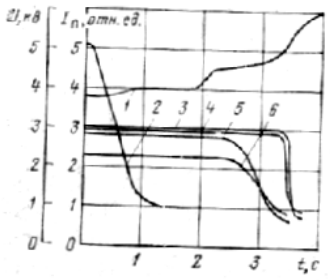


Рис. 27. Напряжение *1* и токи *2—6* при самозапуске электродвигателей собственных нужд блока 300 МВт:

2 — резервный возбудитель; *3* — питательный насос; *4* — циркуляционный насос; *5* — дымосос; *6* — дутьевой вентилятор

блоке 300 МВт на отдельных электростанциях может быть обеспечен самозапуск собственных нужд после перерыва питания 3 с при значении напряжения в момент его восстановления 0,51 [20]. Это объясняется приближенностью расчета по методике [19]. Именно поэтому директивные материалы рекомендуют для окончательного решения вопроса о возможности самозапуска пользоваться более точными методиками и экспериментальными данными.

На рис. 27 приведены значения напряжения на секции 6 кВ и тока основных двигателей при самозапуске механизмов собственных нужд блока 300 МВт. Следует подчеркнуть, что на блоках 300 МВт электродвигатели питательных насосов по условиям самозапуска имеют благоприятную механическую характеристику и поэтому могут разгоняться при напряжении 0,55. На блоках же 200 МВт для этих насосов необходимо напряжение не ниже 0,67 [20], поэтому они, как правило, разгоняются последними. Если после разгона всех остальных электродвигателей напряжение на секции не поднимется до этого значения, то самозапуск электродвигателей собственных нужд блока 200 МВт будет неуспешным. Пример схемы устройства автоматического включения резервного питания секции собственных нужд тепловой электростанции и расчет ее параметров приведен в гл. 6.

Определенной спецификой обладают собственные нужды крупных блочных, в том числе атомных электростанций. При нормальной работе секция собственных нужд получает питание через трансформатор собственных нужд, подключенный к генераторному напряжению своего блока (§ 21). Переход на резервное питание от пускорезервного трансформатора под действием АВР обычно выполняется с кратковременным перерывом питания. Если сеть, к которой подключен пускорезервный трансформатор, обладает небольшой мощностью КЗ (порядка 400 МВ·А), то самозапуск двигателей собственных нужд блока РБМК-1000 может быть успешным лишь при перерыве питания не более 1 с и при участии в самозапуске не более одного главного циркуляционного насоса [21]. Если же пускорезервный трансформатор перед этим уже нес какую-то нагрузку, то самозапуск может оказаться неуспешным.

При более мощной сети (мощность КЗ порядка 5000 МВ·А) условия самозапуска двигателей собственных нужд несколько лучше. Если

пускорезервный трансформатор не нес никакой нагрузки, то после перерыва питания 2,5 с самозапуск ответственных механизмов блока длится 24 с. Хотя при этом на 10 с прекращается подача воды от части питательных насосов и на 1,1 с от конденсатных насосов второй ступени, что вызывает сокращение подачи половины главных циркуляционных насосов до 0,82—0,9 на время 14 с, тем не менее устойчивость режимов блока сохраняется и самозапуск можно считать успешным. Если же пускорезервный трансформатор нес нагрузку, то одновременный самозапуск собственных нужд блока 1000 МВт не обеспечивается.

Для обеспечения самозапуска электродвигателей собственных нужд указанного блока при срабатывании технологических защит турбины или при системных авариях даже в условиях слабого резервного источника питания перевод собственных нужд с рабочего источника на резервный в принципе может осуществляться без перерыва питания. Для этого при работе любой технологической защиты (в том числе от осевого сдвига, потери вакуума и др.) необходимо сначала автоматически включить резервный ввод собственных нужд, а уже потом отключить генератор и рабочее питание собственных нужд. Это позволяет сохранить в работе все главные циркуляционные насосы при незначительной (менее 1 с) задержке в отключении генератора от сети, что не скажется на объеме разрушений турбины даже при работе ее мгновенных защит, так как время выбега несоизмеримо больше времени задержки [21]. Сложность перевода собственных нужд с рабочего на резервный источник без перерыва питания заключается в определении допустимости несинхронного включения по условиям работы как двигателей (см. гл. 3), так и генераторов, турбины и трансформаторов.

В указанных режимах до отключения рабочего ввода генератор и двигатели собственных нужд выбегают совместно. В зависимости от момента отключения блока от сети выбег может начинаться из двигательного режима генератора либо из генераторного. При системных авариях и быстром отключении блока совместный выбег может начинаться и от сверхсинхронной скорости (скольжение до 0,12). Это накладывает отпечаток на режим последующего самозапуска.

На рис. 28 по расчетным данным [21] приведены характеристики самозапуска электродвигателей собственных нужд блока РБМК-1000 в различных режимах. Показаны скольжения генератора и пяти двигателей, напряжения генератора и секции собственных нужд, токи двигателей. За положительное скольжение принято скольжение при угловой скорости ниже синхронной, за отрицательное — выше синхронной.

Сигнал на отключение основного и включение резервного источника питания может подаваться одновременно. В этом случае на шинах собственных нужд блока 450 МВт тепловой электростанции бестоковая пауза составляет примерно 1,5—2 периода, что обеспечивает самозапуск всех двигателей собственных нужд. Сверхпереходное значение тока

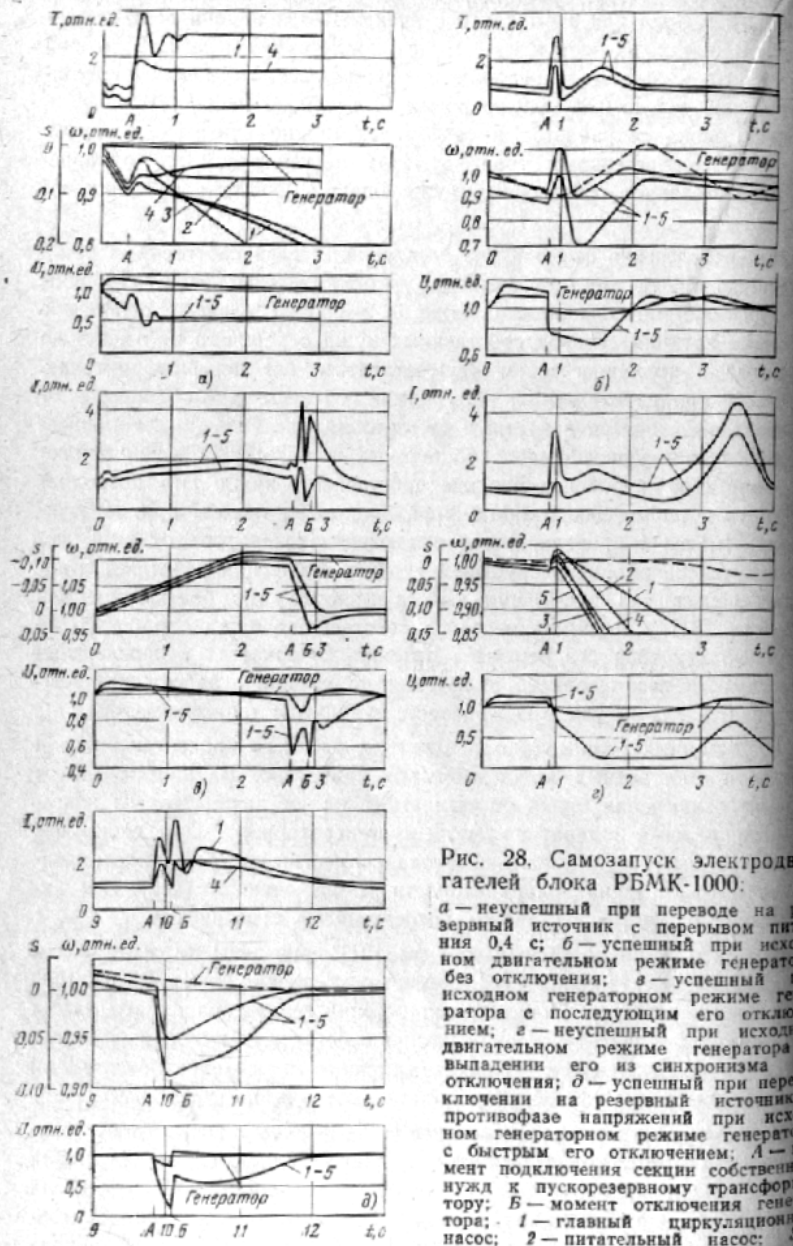


Рис. 28. Самозапуск электродвигателей блока РБМК-1000:

а — неуспешный при переводе на резервный источник с перерывом питания 0,4 с; *б* — успешный при исходном двигательном режиме генератора без отключения; *в* — успешный при исходном генераторном режиме генератора с последующим его отключением; *г* — неуспешный при исходном двигательном режиме генератора и выпадении его из синхронизма без отключения; *д* — успешный при переключении на резервный источник в противофазе напряжений при исходном генераторном режиме генератора с быстрым его отключением; *А* — момент подключения секции собственных нужд к пускорезервному трансформатору; *Б* — момент отключения генератора; *1* — главный циркуляционный насос; *2* — питательный насос; *3* — конденсатный насос; *4*, *5* — прочие электродвигатели

при включении ниже, чем при пуске, и равно 2—2,5 [22], хотя 38% всей мощности двигателей собственных нужд составляет мощность синхронных двигателей.

18. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ И СПОСОБА САМОЗАПУСКА ДВИГАТЕЛЕЙ, НАХОДЯЩИХСЯ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

В связи с тем, что для синхронных двигателей вопрос решается сложнее, чем для асинхронных, сначала определяют возможность самозапуска и способ ресинхронизации синхронных двигателей. Осуществляется это с помощью опытов асинхронного хода и снятия характеристик выбега.

Сначала производится опыт асинхронного хода двигателя с глухоподключенным возбудителем при полной нагрузке механизма. Для этого проще всего на работающем двигателе полностью ввести реостат в обмотке возбуждения электромашинного возбудителя либо другим способом перевести двигатель в асинхронный режим. Если после подачи возбуждения двигатель войдет в синхронизм, то возможен его самозапуск по простейшей схеме с глухоподключенным возбудителем без специальной схемы ресинхронизации. Целесообразно провести осциллографирование тока статора и ротора в процессе опыта. Это позволит определить ток и оценить качество вхождения в синхронизм, определить подсинхронное скольжение. Скорость ленты должна быть не менее 25 мм/с. Скольжение определяется по количеству периодов тока статора $N_{ст}$, приходящихся на один период тока ротора: $s_д = 1/N_{ст}$. В процессе этого опыта можно получить ответ на вопрос о необходимости и степени форсировки возбуждения.

Если опыт асинхронного хода с глухоподключенным возбудителем прошел успешно, следует проверить ток включения. Ток включения определяется по (40), но ЭДС двигателя находится экспериментально по осциллограмме опыта отключения двигателя (или группы двигателей) при разгруженном механизме или при минимально возможной нагрузке, так как тогда ЭДС затухает медленнее и ток включения будет наибольшим. При одиночном выбеге, когда двигатель отключается от шин подстанции, требуется установка трансформатора напряжения за выключателем двигателя, с помощью которого и осциллографируется напряжение на зажимах двигателя.

Кроме ЭДС двигателя необходимо осциллографирование напряжения сети или угловой скорости. Если осциллографируется напряжение сети, то угловая скорость и скольжение определяются по количеству периодов напряжения сети $N_с$ и ЭДС двигателя $N_д$ за один и тот же небольшой (примерно 0,1 с) отрезок времени: $\omega = N_д/N_с$; $s = (N_с - N_д)/N_с$. Значения $N_с$ и $N_д$ могут быть дробными. Полученные значения угловой скорости и скольжения относятся к моменту времени, соответствующему середине каждого отрезка. По $E_д$ и ω определяются

$E_{д.пр}$ [см. (38)] и I'' (40) для интересующего момента времени (время перерыва питания).

Если ток включения находится в пределах допустимого, то возможен самозапуск по схеме с глухоподключенным возбудителем без гашения поля. Если ток включения выше допустимого, то при выбеге необходимо принять меры к гашению поля. Тиристорный возбудитель при этом либо закрывается, либо переводится в инверторный режим, а во вращающемся возбудителе вводится сопротивление в обмотку возбуждения. Такие способы гашения поля не требуют включения разрядного сопротивления в цепь ротора.

Если опыт асинхронного хода с глухоподключенным возбудителем дал отрицательные результаты, выполняется опыт асинхронного хода с введением в цепь ротора разрядного резистора. Регулирующий орган возбудителя остается в рабочем положении. Успешное вхождение двигателя в синхронизм после подачи возбуждения указывает на возможность осуществления самозапуска при полной нагрузке механизма этим способом. Расчета тока включения не требуется. Если же и этот опыт показал отрицательные результаты, то самозапуск возможен лишь при условии разгрузки механизма.

Выбрав способ самозапуска синхронных двигателей, можно экспериментальным путем найти данные, необходимые для определения снижения напряжения при самозапуске большого количества двигателей. Производится пробный самозапуск каждого типа асинхронных и синхронных двигателей с рабочей нагрузкой при рабочем напряжении в сети с интересующим интервалом перерыва питания, соответствующим времени действия АВР или АПВ. Для синхронных двигателей опыт проводится при выбранном способе самозапуска. Осциллографируется ток статора. Из осциллограммы определяется ток самозапуска $I_{а,р}$ при рабочем напряжении $U_р$. Расчетное сопротивление двигателя, Ом, равно

$$x_д \approx z_д = \frac{U_р}{I_{з,р}\sqrt{3}}.$$

Зная расчетное сопротивление каждого двигателя и сопротивление всех элементов сети, можно составить схему замещения и определить напряжение (см. § 11). Затем определяется асинхронный момент двигателей при найденном напряжении и угловой скорости в момент восстановления электроснабжения.

Имея характеристику асинхронного момента синхронного или асинхронного двигателя при номинальном напряжении и характеристику момента сопротивления механизма, сравнение моментов при пониженном напряжении удобно производить графически (см. рис. 22 и 24).

Механическая характеристика агрегата может быть получена из опыта выбега, если отключение производится при рабочей нагрузке. Перед отключением измеряется мощность двигателя, потребляемая из

сети. Вычитая из этой мощности потери в двигателе, получают мощность, развиваемую двигателем $P_{изм}$, кВт, которая в относительных единицах равна вращающему моменту на валу двигателя при данной угловой скорости или моменту сопротивления:

$$m_с = P_{изм}/P_{ном}.$$

В процессе выбега регистрируют угловую скорость. Строится зависимость скорости, отн. ед., от времени с момента отключения, с. Характеристика выбега разбивается на равные участки по времени Δt. Чем больше участков, тем выше точность. Определяется отрицательное ускорение (замедление) на каждом участке, за которое может быть принято изменение угловой скорости $\Delta\omega_i$. В произвольном масштабе строится зависимость

$$\Delta\omega_i = f(\omega_i),$$

где ω_i — средняя угловая скорость на каждом участке по отношению к синхронной. Кривая строится в пределах $0 \leq s \leq 1$.

По определенному выше значению момента для начальной угловой скорости определяется масштаб полученной кривой.

Для получения характеристики асинхронного момента производится опыт пуска при той же нагрузке с регистрацией угловой скорости. Определяется зависимость избыточного момента Δm (масштаб тот же), а затем в каждой точке $m_{ас} = \Delta m + m_с$.

19. СХЕМЫ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ САМОЗАПУСКА СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Схема управления синхронным двигателем включает в себя две части: управление системой возбуждения и управление выключателем высокого напряжения.

Для обеспечения успешного самозапуска система возбуждения должна обеспечивать интенсивное гашение магнитного потока и ЭДС двигателя и создание оптимальных условий для вхождения в синхронизм.

При электромашинном возбудителе схемы самозапуска не отличаются от схем пуска. Они достаточно подробно рассмотрены в [8]. Вопрос заключается в определении возможности и допустимости самозапуска с точки зрения работы электродвигателя (см. гл. 3 и 4), механизма и сети (см. гл. 6). Для индикации работы двигателя в асинхронном режиме с подсинхронным скольжением используется токовое реле в цепи статора или реле, реагирующее на появление переменной составляющей в цепи ротора. От этого реле подается сигнал в схему пуска электродвигателя, и ресинхронизация происходит точно так же, как и синхронизация при пуске.

Наиболее распространенным видом возбудителей в настоящее время является тиристорный возбудитель. Для двигателей средней мощности используется, как правило, возбудитель типа ТВУ, для более мощных турбодвигателей — ТЕ8, для крупных двигателей — ТВ и, наконец, для синхронных двигателей индивидуального исполнения — комплектные тиристорные устройства типа КТУ. Все эти тиристорные возбудители получают питание от промышленной сети переменного тока, обычно 380 В.

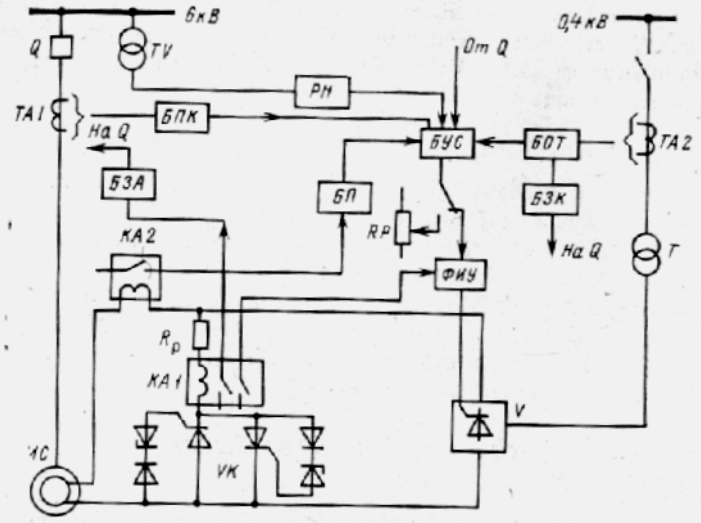


Рис. 29. Принципиальная схема управления тиристорным возбудителем типа ТВУ

Полупроводниковый преобразователь *V* (рис. 29) возбудителя типа ТВУ питается от трансформатора *Т*. Импульсы управления тиристорами образуются в фазоимпульсном устройстве *ФИУ*, управляющее напряжение для которого образуется в блоке уставок и суммирования *БУС*. Управляющие сигналы на вход *БУС* подаются от блока пуска *БП* (подключенного к герконовому реле в цепи ротора двигателя *КА2*), блока порогового компаундирования *БПК* (подключенного к трансформатору тока в цепи статора *ТА1*), вспомогательных контактов выключателя *Q*, регулятора напряжения *РН* (подключенного к трансформатору напряжения *TV*) и блока ограничения тока возбуждения *БОТ* (подключенного к трансформатору тока *ТА2* в цепи питания возбудителя). Трансформатор тока *ТА2* служит также для косвенного измерения тока

ротора синхронного двигателя. При пуске и самозапуске обмотка ротора замыкается на разрядный резистор $R_р$ с помощью тиристорного ключа *VK*. Контроль за частотой скольжения в процессе разгона осуществляется герконовым токовым реле *КА2*. Выпрямитель *V* открывается при достижении необходимой угловой скорости. При затянувшемся асинхронном режиме двигателя от герконового реле *КА1* через блок защиты от длительного асинхронного хода *БЗА*, который имеет в своем составе реле времени, отключается выключатель высокого напряжения двигателя *Q*. Этот выключатель отключается также блоком защиты от КЗ в системе возбуждения *БЗК*, при срабатывании релейной защиты двигателя и, если это предусмотрено схемой, от действия устройств автоматики на подстанции. При отключении выключателя *Q* происходит интенсивное гашение поля двигателя путем перевода преобразователя *V* в инверторный режим.

Возбудитель ТВУ обеспечивает автоматическую подачу возбуждения при пуске и самозапуске в функции скольжения, автоматическое гашение поля при отключении двигателя от сети, автоматическое регулирование тока возбуждения, его форсировку и т. д.

Возбудитель типа ТЕ8 может выполняться как по трехфазной мостовой схеме, так и по схеме с нулевым выводом. Он более сложен за счет наличия узлов, позволяющих получать различные способы регулирования возбуждения двигателя в синхронном режиме. С точки зрения обеспечения самозапуска схема управления ТЕ8, ТВ и ТВР полностью аналогична схеме ТВУ. Для синхронных двигателей 132—1000 кВт, 500—1500 об/мин вместо трансформатора *Т* статический возбудитель может питаться от дополнительной трехфазной обмотки, уложенной на дно пазов статора. Принципиальная схема управления возбудителем при этом не меняется.

В конкретных условиях производства серийно выпускаемые статические возбудители не всегда удовлетворяют предъявляемым требованиям. Например, при тяжелых условиях пуска синхронных двигателей с возбудителями ТВ на период пуска или самозапуска можно снизить порог срабатывания тиристорного ключа *VK* [23] путем шунтирования на время пуска части стабилитронов (на рис. 29 условно показано по одному стабилитрону в каждом плече вместо нескольких).

Если происходит аварийное отключение не отдельного двигателя, а целой секции шин и для подачи на нее ре-

зервного питания необходимо снизить остаточное напряжение, гашение поля всех подключенных синхронных двигателей обеспечивается импульсом, который подается либо от вспомогательного контакта выключателя рабочего ввода секции, либо от пускового органа системы автоматики (§ 23) и воздействует либо на выключатели *Q* (рис. 29), либо непосредственно на *БУС*. Однако в первом случае выключатели *Q* снабжаются устройствами АПВ, что значительно усложняет схему, а во втором этого не требуется.

Для синхронных двигателей малой мощности и при пониженных требованиях к автоматическому управлению применение достаточно сложных возбудителей ТВУ или ТЕ приводит к повышению капитальных затрат и эксплуатационных расходов. Поэтому на ряде предприятий изготовляются упрощенные тиристорные возбудители или отдельные их узлы.

В простейшем случае (при малой загрузке и легких условиях пуска и вхождения в синхронизм) могут применяться нерегулируемые тиристорные выпрямители. Тогда при снижении угловой скорости ниже подсинхронной возбудитель отключается и ротор двигателя замыкается на разрядное сопротивление, а после достижения подсинхронной скорости включается. В цветной металлургии и химической промышленности используются возбудители типа СПВУ, выполненные по несимметричной мостовой схеме и обеспечивающие гашение поля путем включения разрядного сопротивления, а ресинхронизацию — автоматически.

Для упрощения схемы управления тиристорным возбудителем в тех случаях, когда не требуется непрерывного автоматического регулирования тока возбуждения и угла регулирования от фазоимпульсных блоков более 90°, можно использовать фазоимпульсный узел, разработанный В. Ф. Мамаевым [24]. Эта схема предназначена именно для обеспечения успешного самозапуска синхронных двигателей. Тиристорный преобразователь *V* (рис. 30) выполнен по симметричной мостовой схеме. Регулирование угла открывания силовых тиристоров осуществляет фазоимпульсный узел *ФИУ*, питаемый от пятиобмоточного (обмотки *1—5*) трансформатора *ТУ* через выпрямительный мост *6*. При превышении фазного напряжения от обмоток *2* и *3* над регулируемым напряжением от обмотки *5* транзисторы *13—18* открываются и подают импульсы на соответствующие силовые тиристоры. Установка напряжения осуществляется с помощью резистора *30*. Обмотка *2* с транзисторами *16—18* работает на катодную, а обмотка *3* с транзисторами *13—15* — на анодную группу силовых тиристоров. Если выходы от *ФИУ* подключены к силовым тиристорам *VT1—VT6*, как указано без скобок, то регулируемое напряжение составит от 0 до 0,5 максималь-

ного, а в скобках — от 0,5 до максимального. При изменении питающего напряжения угол открывания силовых тиристоров остается постоянным, так как регулируемое напряжение от обмотки *5* и напряжение от обмоток *2* и *3* изменяются пропорционально. Учитывая, что синхрон-

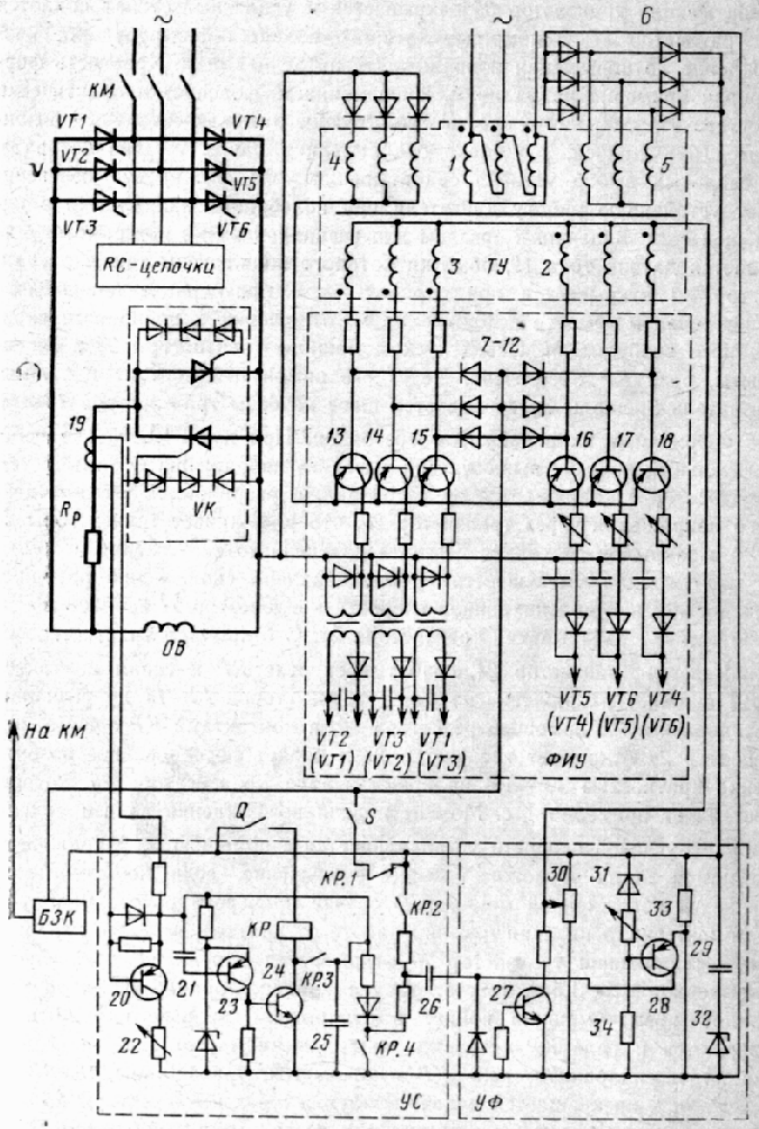


Рис 30. Упрощенная схема управления тиристорным возбудителем

ный двигатель и тиристорный возбудитель питаются от одного источника, достаточно осуществлять контроль по напряжению в цепях управления. К цепям управления подключен мост из двух резисторов *33*, *34* и двух стабилитронов *31*, *32*, в диагональ которого включен транзистор *28*. При снижении напряжения в питающей сети до уставки срабатывания транзистор *35* открывается и усиленный сигнал подается на транзистор *27*, с помощью которого подается фиксированное возбуждение до повышения напряжения в питающей сети. Кратность форсировки примерно равна двум. Инерционность форсировки практически отсутствует, так как емкость фильтрующего конденсатора *29* выбирается наименьшей, а уставка срабатывания равна уставке возврата. Правильный выбор уставки срабатывания узла форсировки обеспечивает устойчивую работу двигателя при колебаниях напряжения в питающей сети. Задающим органом для ресинхронизации при самозапуске является датчик тока *19*, обмотки которого подключены так, что транзистор *20* открывается при отрицательном полупериоде наведенного напряжения в обмотке возбуждения по отношению к полярности тиристорного возбудителя. Перед пуском машины транзисторы *23* и *24* закрыты, реле *КР* обесточено. Через его замкнутый контакт *КР.1*, выключатель *S*, диоды *7—12* подается плюс на базы транзисторов *13—18*, что удерживает их в закрытом состоянии. При пуске двигателя вспомогательный контакт выключателя высокого напряжения *Q* замыкается, конденсатор *21* заряжается от источника, а разряжается от наведенного напряжения через транзистор *20*, что удерживает транзисторы *23* и *24* в закрытом состоянии. Частота наведенного напряжения в обмотке возбуждения уменьшается пропорционально скольжению ротора и при достижении подсинхронной скорости конденсатор *21* заряжается до напряжения срабатывания транзистора *23*. С открытием транзистора *23* открывается транзистор *24*, срабатывает реле *КР* и своим контактом *КР.1* снижает напряжение на базах транзисторов *13—18* до величины, установленной с помощью резистора *30*, а контактами *КР.2* через конденсатор *26* открывает транзистор *27* и подает форсированное возбуждение кратностью 1,5—1,8 на время заряда конденсатора *26*, которое составляет примерно 1 с. Момент подачи возбуждения вблизи подсинхронной угловой скорости устанавливается с помощью регулировочного резистора *22* на возможно большее скольжение, если необходим самозапуск нагруженной машины. В случае проворота ротора при пуске в момент синхронизации или при работе от кратковременного перерыва электроснабжения транзистор *20* открывается и реле *КР* отключается с выдержкой 1—1,5 с за счет заряда конденсатора *25*. Если за указанное время машина войдет в синхронизм, транзисторы *23* и *24* откроются и реле *КР* останется во включенном состоянии, а если не войдет в синхронизм, реле *КР* отключается, транзисторы *13—18* закрываются, прекращается подача возбуждения и конденсаторы *25* и *26* за время примерно 0,2 с разряжаются через замкнутый контакт *КР.4*.

Момент подачи возбуждения от узла синхронизации выбирается экспериментально на загруженной машине, что позволяет эксплуатировать ее в оптимальном режиме.

Представляет интерес схема автоматической ресинхронизации, разработанная предприятием «Белэнергоремналадка» [25]. Выявление асинхронного хода осуществляется как для возбужденного, так и для невозбужденного двигателя. При одновременном выполнении двух условий — двигатель потребляет реактивную мощность и ток статора больше номинального — схема ресинхронизации (рис. 31) гасит поле двигателя, а после уменьшения скольжения и спада тока статора подается возбуждение. Если же потребление реактивной мощности и повышенный ток статора сохраняются достаточно долго (например 10 с и более), то подается команда на отключение двигателя. Направление мощности определяется фазочувствительной схемой, включающей в себя стабилитроны *VD2*, *VD3*, динисторы *VD8*, *VD9*, поляризованное реле *KV1* и диоды *VD5*, *VD6*, шунтирующие обмотки реле *KV1*. Напряжение в фазочувствительную схему подается непосредственно от трансформатора напряжения, а ток статора — от трансформатора тока через трансформатор *ТУ*. При совпадении по фазе напряжения и тока двигателя ЭДС, развиваемая на обмотках *4* и *5* *ТУ*, сдвигается относительно напряжения сети на 90° и мгновенной суммы напряжений на стабилитронах *VD1* и *VD2* (*VD3*) недостаточно для пробоя динисторов *VD8* (*VD9*). При угле сдвига между током и напряжением $0<\varphi<180°$ суммарное напряжение больше напряжения зажигания динистора и по одной из обмоток реле *KV1* проходит ток, вызывая его срабатывание. После замыкания контакта реле *KV1* создается цепь для обтекания током реле *KA2*, которое срабатывает при токе статора больше номинального и включает схему ресинхронизации.

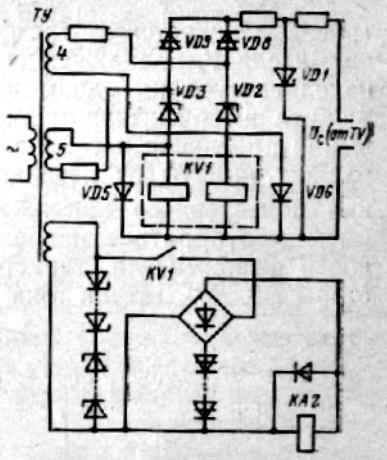


Рис. 31. Реагирующий орган включения схемы ресинхронизации синхронного двигателя в зависимости от направления реактивной мощности и значения тока статора

Для мощных синхронных двигателей применяются также бесщеточные системы возбуждения. Бесщеточный возбудитель состоит из вращающегося диодного выпрямителя, обращенного трехфазного генератора 400 Гц и защитного устройства.

Обмотка возбуждения синхронного двигателя *МС*

(рис. 32) питается от трехфазного мостового диодного выпрямителя *V*, подключенного к якорю *Я* генератора 400 Гц, находящемуся на одном валу с синхронным двигателем. Защита выпрямителя и якоря возбудителя от перенапряжения при пуске и самозапуске двигателя осуществляется блоком защиты от перенапряжений (БЗП). При появлении повышенного напряжения на обмотке возбуждения, имеющего обратное направление по отношению к полярности выпрямителя, тиристоры *VT1, VT2* включают резисторы *R2, R3*. Датчик тока *PA* служит для измерения тока возбуждения двигателя и защиты от перегрузки. Обмотка возбуждения синхронного возбудителя *ОВ* питается от однофазного статического мостового тиристорного выпрямителя *VB* и трансформатора *ТВ* от сети 380 *В*. Управление возбуждением осуществляется с помощью блока оперативного управления *БОУ* и автоматического регулятора возбуждения *АРВ*.

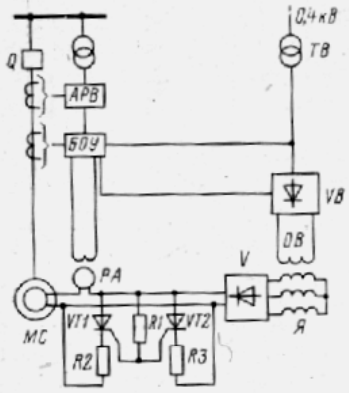


Рис. 32. Бесщеточная система возбуждения синхронного электродвигателя

Бесщеточная диодная система возбуждения обеспечивает автоматическую синхронизацию двигателя в функции от тока статора, автоматическую форсировку возбуждения (кратность по току 1,4 и более), а также ограничение длительности автоматической форсировки возбуждения (регулируется в пределах до 15 с) и защиту от асинхронного хода и КЗ. Никаких мер для гашения поля двигателя при выбеге не предусмотрено. Поэтому при диодной бесщеточной системе возбуждения длительность гашения поля довольно значительна (аналогично глухоподключенному электромашинному возбудителю, см. § 6). Значительно лучше условия самозапуска при тиристорной бесщеточной системе возбуждения, которая в настоящее время еще не получила широкого распространения.

Самозапуск синхронного двигателя зависит кроме системы возбуждения от схемы управления его выключателем. В тех случаях, когда возможен одновременный самозапуск всех двигателей, подключенных к секции шин, а ток несинхронного включения в пределах допустимого, никаких изменений в схемы управления включателями вносить не требуется. Если из-за чрезмерного снижения напряжения одновременный самозапуск всех электродвигателей невозможен, часть из них отключается. При этом могут быть отключены и некоторые двигатели, самозапуск которых необходим по условиям технологии. Выключатели таких двигателей оборудуются устройством АПВ, и двигатели участвуют в самозапуске второй ступени.

Устройство АПВ выключателя может понадобиться и в другом случае. Если к секции шин 6—10 кВ наряду с другими достаточно ответственными потребителями подключен мощный высокоинерционный синхронный двигатель, при отключении секции на ней еще долго поддерживается достаточно высокое напряжение. Для того чтобы напряжение на секции снизилось до значения, обеспечивающего возможность несинхронного включения резервного питания, требуется 15 с и более. Однако и после этого ток включения может значительно превысить уставку максимальной токовой защиты и вызвать ее ложное срабатывание. Во избежание этого приходится усложнять систему релейной защиты. Кроме того, длительное ожидание включения резервного питания может отрицательно сказаться на работе других потребителей.

Для устранения этих недостатков можно использовать кратковременное отключение выключателя синхронного двигателя с АПВ после подключения секции к резервному источнику [26]. При исчезновении питания защита от по-

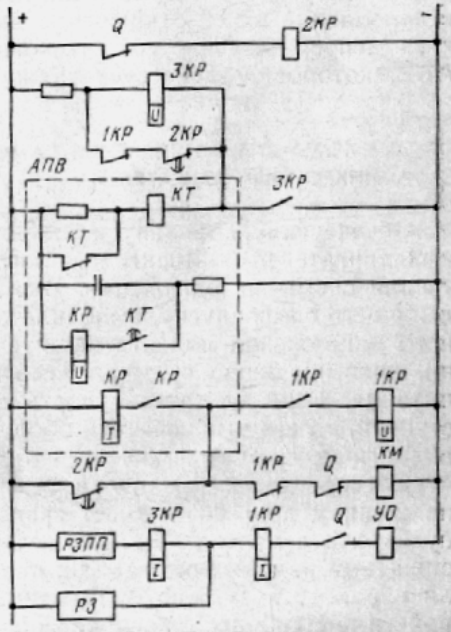


Рис. 33. Схема управления выключателем синхронного электродвигателя, обеспечивающая АПВ

тери питания *РЗПП* (рис. 33) отключает выключатель двигателя *Q*. От его вспомогательных контактов подается сигнал на автоматическое гашение поля. С выдержкой времени устройство *АПВ* дает команду на повторное включение выключателя, после чего происходит самозапуск двигателя. Уставка времени устройства *АПВ* принимается равной времени снижения ЭДС двигателя до уровня, обеспечивающего несинхронное включение (см. гл. 3). Как правило, она составляет 0,5—1,5 с.

Пуск устройства *АПВ* в этой схеме происходит только при отключении выключателя защитой от потери питания двигателя *РЗПП*. После включения выключателя *Q* реле *2КР* размыкающим контактом шунтирует удерживающую обмотку реле *3КР* и схема возвращается в исходное состояние. Размыкающий контакт реле *1КР* в цепи, шунтирующей удерживающую обмотку реле *3КР*, и размыкающий контакт реле *2КР* в цепи контактора электромагнита включения привода выключателя *КМ* необходимы для предотвращения срыва импульса пуска реле *АПВ* после отключения выключателя защитой от потери питания. Все остальные виды защит двигателя *РЗ* действуют помимо реле *3КР*, в связи с чем после их срабатывания АПВ не происходит. Вместо защиты от потери питания или в дополнение к ней отключение двигателя может происходить непосредственно от пускового органа устройства АВР, которое воздействует также на реле *3КР*.

20. СХЕМЫ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ САМОЗАПУСКА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Обеспечение самозапуска короткозамкнутых асинхронных двигателей 3—10 кВ не вызывает трудностей с точки зрения схемы их включения. Выключатель двигателя, подлежащего самозапуску, выполняется без защиты минимального напряжения или эта защита имеет выдержку времени, превышающую время автоматического восстановления питания. Если двигатель участвует в самозапуске второй ступени, то его выключатель оборудуется устройством АПВ аналогично схеме рис. 33.

Обеспечение самозапуска асинхронного двигателя напряжением до 1000 В имеет свои особенности. Магнитные пускатели и контакторы при исчезновении или глубоком снижении напряжения отпадают. Для сохранения двигателя в работе возможно применение нескольких видов устройств. Наиболее распространенными из них являются задержки на отпадание пускателей и устройства АПВ контакторов и пускателей.

Задержками на отпадание пускателя может оборудоваться такое количество электродвигателей, которое допускается для одновременного самозапуска непосредственно после восстановления напряжения. Для задержки пускателя в притянутом состоянии используется энергия предварительно заряженного конденсатора. Схема одной из таких задержек, разработанной И. С. Стеркиным и выпускаемой для нужд потребителей химической промышленности, которая предназначена для магнитных пускателей 1—

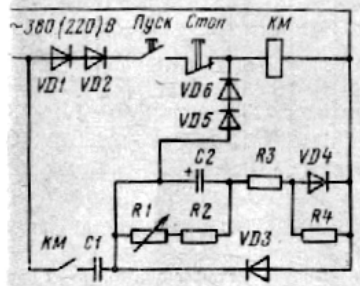


Рис. 34. Схема задержки на отпадание магнитного пускателя

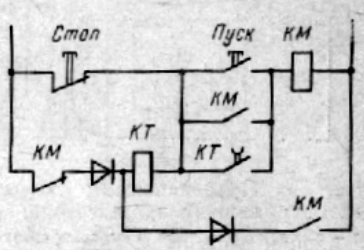


Рис. 35. Принципиальная схема устройства АПВ электродвигателя с реле времени

5-го габаритов, приведена на рис. 34 [18]. При нажатии кнопки *Пуск* через диоды *VD1* и *VD2* на катушку пускателя подается выпрямленный ток и пускатель включается. В процессе работы через ограничительный конденсатор *C1* и диоды *VD5* и *VD6* катушка пускателя обтекается выпрямленным током пониженного напряжения, что существенно увеличивает срок службы катушки. Одновременно с отпусканием кнопки *Пуск* происходит заряд конденсатора *C2* (обратная полуволна напряжения обходит его через диод *VD3*, разряжая при этом конденсатор *C1*). В случае исчезновения напряжения в сети за счет энергии, запасенной в конденсаторе *C2*, катушка пускателя продолжает обтекаться постоянным током и пускатель остается включенным в течение времени, необходимого для восстановления напряжения (обычно 3—6 с, но при соответствующем подборе сопротивлений и конденсаторов — до 15 с и более). При нажатии кнопки *Стоп* пускатель отключается и при опускании кнопки остается отключенным, так как энергии конденсатора недостаточно для притягивания катушки.

Большее распространение получили устройства АПВ пускателей. Раньше других начали применяться устройства АПВ, содержащие реле времени. Электропромышленностью выпускаются станции управления типов КУ5124 и

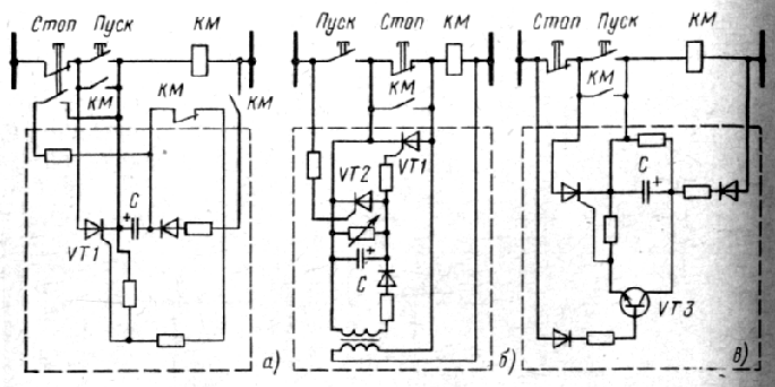


Рис. 36. Принципиальные схемы устройств АПВ, использующих энергию заряженного конденсатора:

а — с двухэлементной самовозвращающейся кнопкой отключения; *б*, *в* — с принудительным разрядом емкости с помощью тиристора или транзистора

КУ5125, работающие на этом принципе. Схема одного из простейших устройств АПВ пускателя *КМ* показана на рис. 35 [27]. Если напряжение будет восстановлено раньше, чем сработает реле времени *КТ*, пускатель повторно включится. Однако эта схема требует использования дополнительного вспомогательного контакта пускателя.

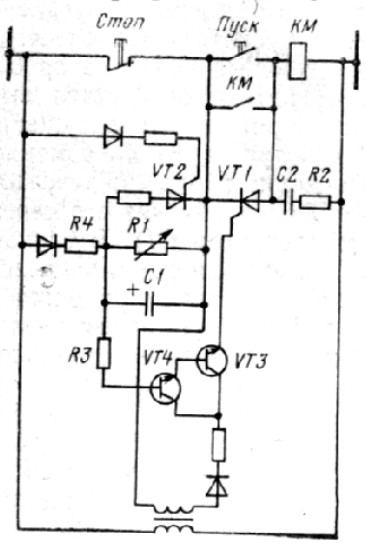


Рис. 37. Принципиальная схема универсального устройства повторного включения электродвигателей

Более распространены устройства АПВ, использующие энергию заряженного конденсатора. Рассмотрим их действие на примере устройств, используемых на предприятиях химической промышленности [18, 27]. Параллельно кнопке

Пуск подключен тиристор *VT1* (рис. 36,*а*), через цепь управления которого разряжается конденсатор *С*. Этим конденсатором определяется время, в течение которого произойдет повторное включение пускателя. При отключении магнитного пускателя вручную происходит мгновенный разряд конденсатора, исключающий самопроизвольное включение после отпускания кнопки *Стоп*. В схеме рис. 36,*а* это достигается за счет использования двухэлементной самовозвращающейся кнопки *Стоп*, что приводит к необходимости прокладки дополнительных проводов между кнопочным постом и пускателем, а иногда требует дополнительных вспомогательных контактов пускателя. В схеме рис. 36,*б* принудительный мгновенный разряд конденсатора осуществляется тиристором *VT2*, а на рис. 36,*в* — транзистором *VT3*, которые шунтируют конденсатор при ручном отключении.

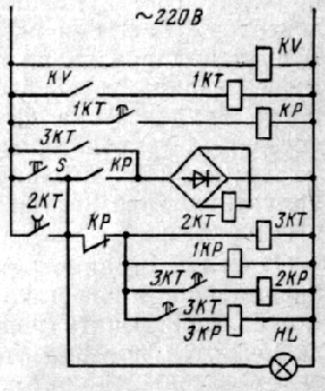


Рис. 38. Схема устройства, обеспечивающего ступенчатый самозапуск электродвигателей напряжением до 1000 В

Все три вида устройств могут применяться для пускателей и контакторов любых габаритов. Схема рис. 36,*б* практически не меняет выдержку времени в зависимости от напряжения в сети до отключения пускателя и применяется в случае, когда к той же секции шин, что и рассматриваемый двигатель, подключены синхронные двигатели или конденсаторная батарея. Схема рис. 36,*в* обеспечивает самозапуск асинхронного двигателя после перерыва питания установленной длительности лишь в том случае, если напряжение на зажимах схемы управления, т. е. на секции, исчезнет быстрее, чем отключится пускатель. В этой схеме тиристоры, шунтирующие кнопку включения, необходимо отбирать по току управления (не более 30 мА для тиристоров типов Т2-10 или Т6-10).

Наиболее универсальной является схема, изображенная на рис. 37. В ней исключена необходимость индивидуального подбора тиристоров, и она может быть использована при любых повреждениях в сети и любом характере соседних электроприемников. При нажатии кнопки *Пуск* пускатель включается и самоблокируется вспомогатель-

ным контактом *КМ*, а конденсатор *С1* заряжается до напряжения, определяемого делителем *R1*, *R4*. При нарушении электроснабжения пускатель отпадает и конденсатор *С1* разряжается по двум параллельным цепям через *R1* и *R3*, *VT4*, *VT3*, *VT1*. Если за время открытого состояния тиристора *VT1* напряжение в сети восстанавливается, пускатель включится и произойдет самозапуск двигателя. При нажатии кнопки *Стоп* по цепи управления тиристора *VT2* проходит ток. Тиристор открывается и шунтирует конденсатор *С1*. Время разряда *С1* должно быть меньше времени отпадания якоря пускателя. Для регулирования времени разряда установлен резистор *R1*. Уменьшение габаритов конденсатора *С1* достигается путем использования сдвоенных транзисторов КТ608Б. Демпферная цепочка *R2*, *С2* служит для ограничения перенапряжения, вызванного индуктивностью катушки магнитного пускателя в переходных режимах.

В целях ограничения тока включения при повышенной инерционности агрегата ($\tau_j > 60$ с) к зажимам двигателя можно подключить реле напряжения, контакты которого включаются последовательно с элементом, шунтирующим вспомогательный контакт пускателя.

Правилами устройства электроустановок рекомендуется включать катушки магнитных пускателей (контакторов) на линейное напряжение. Тогда при замыкании одной фазы сети на землю напряжение, приложенное к катушке пускателя, уменьшится не более чем в $\sqrt{3}$ раз (не будет меньше фазного) и составит не менее 0,6. Поскольку напряжение отпадания пускателей близко к указанному значению, большинство магнитных пускателей не отключится. Если же катушки включены на фазное напряжение, то при замыкании на землю одной фазы отключатся все пускатели, катушки которых подключены к ней.

Когда мощность трансформатора 6/0,4 кВ недостаточна для обеспечения самозапуска всех необходимых двигателей, применяется ступенчатый самозапуск. Релейная схема устройства, обеспечивающего ступенчатый самозапуск в три этапа, приведена на рис. 38. Выходными элементами являются реле *1КР*, *2КР* и *3КР*. Первая группа двигателей включается без выдержки времени, вторая — с выдержкой времени проскальзывающего контакта реле времени *3КТ*, а третья — с полной выдержкой времени этого реле. Реле *2КТ* обеспечивает отключение и вывод схемы из работы при отсутствии напряжения в течение установленного времени. Реле *1КТ* отстраивает схему от возможного ложного срабатывания при ее включении. Включение схемы в работу осуществляется кнопкой *S*. Лампа сигнализирует готовность схемы к работе.

Если двигатель включается автоматическим выключателем, последний для обеспечения самозапуска снабжается задержкой действия защиты минимального напряжения на 3 с (серийные автоматические выключатели такой задержки не имеют).

В зарубежной практике и в разработках отечественной электропромышленности используются также пневматические приставки к промежуточным реле и магнитным пускателям с номинальным током до 63 А. Приставки обеспечивают выдержку времени при включении или при отключении, что позволяет их применять с замыкающим или размыкающим вспомогательным контактом пускателя. Выдержка времени регулируется в пределах 0,1—30 или 10—180 с.

Глава шестая

ВЛИЯНИЕ САМОЗАПУСКА НА СИСТЕМУ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

21. ТРЕБОВАНИЯ К СХЕМАМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Самозапуск электродвигателей, являясь эффективным средством обеспечения непрерывности технологического процесса при кратковременных нарушениях электроснабжения, в свою очередь предъявляет определенные требования к системе электроснабжения. Согласно нормативным документам электроснабжение потребителей или отдельных электроприемников, требующих бесперебойного электроснабжения (с перерывом не более чем на время действия устройств противоаварийной автоматики), должно осуществляться не менее чем от двух независимых источников питания. Независимыми называются такие источники, нарушение электроснабжения на одном из которых не оказывает существенного влияния на работу другого.

Крупные промышленные предприятия во многих случаях получают питание по линиям 110 кВ от двух-трех подстанций энергосистемы. Эти подстанции связаны между собой и с соседними районными подстанциями линиями 110—220 кВ, в результате чего КЗ в сети 110 кВ любой из подстанций может вызвать одновременно глубокое снижение напряжения у всех потребителей, получающих пи-

тание и от других подстанций. В результате происходят неоправданные нарушения технологического процесса. В этом случае две подстанции 110 кВ, питающие промышленное предприятие, не могут рассматриваться как два независимых источника питания. Если отказаться от связи между подстанциями по линиям 110 кВ при сохранении связей по линиям 220 кВ, то за счет реактивного сопротивления автотрансформаторов глубокая посадка напряжения на шинах 110 кВ одной подстанции не приводит к недопустимой посадке напряжения на других подстанциях. Однако иногда такое решение нельзя осуществить из-за условий устойчивости энергосистемы.

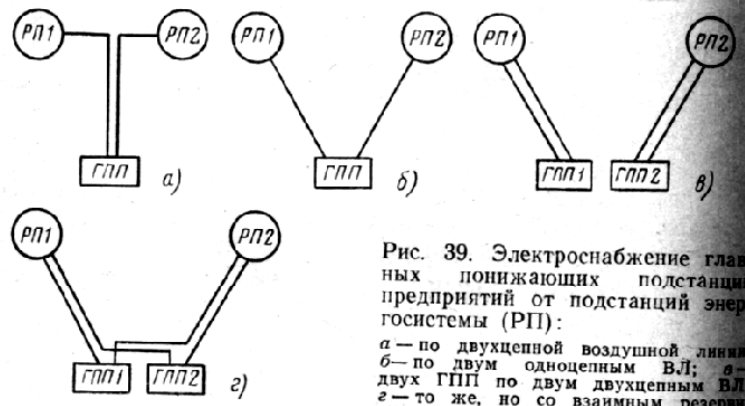


Рис. 39. Электроснабжение главных понижающих подстанций предприятий от подстанций энергосистемы (РП):

а — по двухцепной воздушной линии; *б* — по двум одноцепным ВЛ; *в* — двух ГПП по двум двухцепным ВЛ; *г* — то же, но со взаимным резервированием источников

Новейшие достижения в области коммутирующей аппаратуры 110 кВ и релейной защиты позволяют быстро отключить элемент сети, на котором произошло КЗ. Для некоторых промышленных узлов в настоящее время этот вопрос решен. Трудность заключается в чрезвычайно жестких требованиях, предъявляемых к быстродействию защиты и выключателей некоторыми химическими производствами и другими потребителями. Время локализации КЗ $t_{лок}$ должно быть меньше допустимого по условиям технологии перерыва электроснабжения $t_{доп}$ (см. § 16 табл. 1):

$$t_{лок} < t_{доп}. \qquad (98)$$

Иногда питание главной понижающей подстанции (ГПП) предприятия осуществляется от двух независимых источников питания по одной двухцепной ВЛ, как показано на рис. 39,*а*, что приводит к снижению степени независимости источников, особенно в районах с повышенной

грозовой активностью. Механическое повреждение двухцепной ВЛ приводит к прекращению электроснабжения от двух источников. Как правило, для электроснабжения предприятий с одной ГПП при преобладании ответственных потребителей следует применять две одноцепные питающие ВЛ 110 кВ (рис. 39,*б*). Крупные предприятия имеют две и более ГПП. Их питание осуществляется от двух источников по двум двухцепным ВЛ (рис. 39,*г*). Такая схема обеспечивает питание обеих ГПП завода при выходе из строя одной ВЛ. Схема рис. 39,*в* приводит к полному отключению одной из ГПП при выходе из строя одной соответствующей ВЛ, что требует существенного усложнения схемы внутризаводского электроснабжения. Поэтому схема рис. 39,*в* значительно уступает схеме рис. 39,*г*.

Главные понижающие подстанции промышленных предприятий подключаются к районным подстанциям (РП) энергосистемы различными способами. В настоящее время самым ненадежным видом схемы внешнего электроснабжения являются магистральные линии 110 кВ с большим количеством отпаек, если на отпайках устанавливаются короткозамыкатели и отделители. При подключении к такой магистрали ответственных производств почти каждая авария в системе электроснабжения развивается до значительных размеров. Если на предприятии большинство электроприемников относится ко второй категории, а для электроприемников первой категории $t_{доп} > 3$ с, то магистральные схемы с отделителями могут применяться. Однако отключающие импульсы от релейной защиты трансформаторов ГПП с точки зрения надежности электроснабжения целесообразно подавать на головной выключатель линии, отказавшись от использования короткозамыкателей. Более надежными являются магистральные линии с выключателями на отпайках.

Для потребителей, предъявляющих наиболее высокие требования к надежности электроснабжения (а именно на них в первую очередь требуется обеспечение самозапуска электродвигателей), основным видом схем питания ГПП являются радиальные линии. При переходе от магистральной двухцепной ВЛ 110 кВ, питающей отпайками три ГПП крупного предприятия азотной промышленности по схеме с короткозамыкателями и отделителями, к радиальной схеме количество полных остановок производства по причине отказов в системе электроснабжения уменьшается от 3 раз в год до 1 раза в 3 года. На стороне высшего

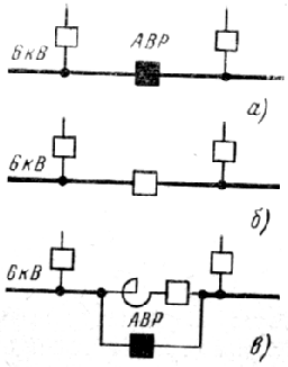


Рис. 40. Схемы включения шин распределительных пунктов 6—10 кВ:

а — с раздельной работой вводов; *б* — с параллельной работой вводов; *в* — с параллельной работой вводов через секционный реактор

напряжения ГПП при радиальной схеме питания, особенно на предприятиях со значительным загрязнением атмосферы вблизи ГПП, предпочтительнее использовать блочную схему линия — трансформатор без коммутирующей аппаратуры.

Распределение электроэнергии на предприятиях осуществляется на напряжении 6—10 кВ. Распределительные пункты (РП) этого напряжения имеют, как правило, по два раздельно работающих ввода с устройством АВР между ними. Традиционное выполнение схем РП (рис. 40,*а*) затрудняет обеспечение бесперебойной работы технологического оборудования при кратковременном перерыве электроснабжения, так как при наличии поршневых компрессоров или недостаточной мощности источников электроснабжения невозможен самозапуск ряда механизмов. Схема с параллельной работой вводов (рис. 40,*б*) при соответствующем усложнении релейной защиты обеспечивает непрерывное питание обеих секций подстанции в случае отключения одного из вводов. Однако из-за увеличения токов КЗ при современной номенклатуре коммутирующей аппаратуры эти схемы могут применяться при мощности трансформаторов ГПП до 25 МВ·А, а иногда до 40 МВ·А. При большей их мощности можно использовать схему с двумя секционными выключателями (рис. 40,*в*), один из которых соединяет секции через реактор при нормальной работе, а второй шунтирует реакторную цепь при выходе из строя одного из вводов. Схемы рис. 40,*б*, *в* в некоторых случаях обеспечивают повышение надежности электроснабжения, облегчая самозапуск электродвигателей, а иногда позволяют сохранить бесперебойность работы оборудования и без самозапуска. Однако в настоящее время такие схемы применяются редко.

Принцип блочности (агрегатности) электроснабжения предусматривает питание всех электроприемников одной технологической линии от одной подстанции, что существенно повышает надежность электроснабжения. К каждой цеховой подстанции подключаются электроприемники только одного производства, а к каждой секции — только одной технологической линии. В идеальном случае от одной ячейки ГПП питается одна технологическая линия какого-либо производства, и не подключены больше никакие потребители. Пример схемы, построенной по блочному принципу, приведен на рис. 41. Если возникает авария в любой точке системы электроснабжения одной технологической нитки производства, то ее локализация при правильной работе устройств релейной защиты и автоматики не отразится на работе других производств и технологических линий данного производства (см. § 22).

Как видно из рис. 40 и 41, в системах внутризаводского электроснабжения используется неявное резервирова-

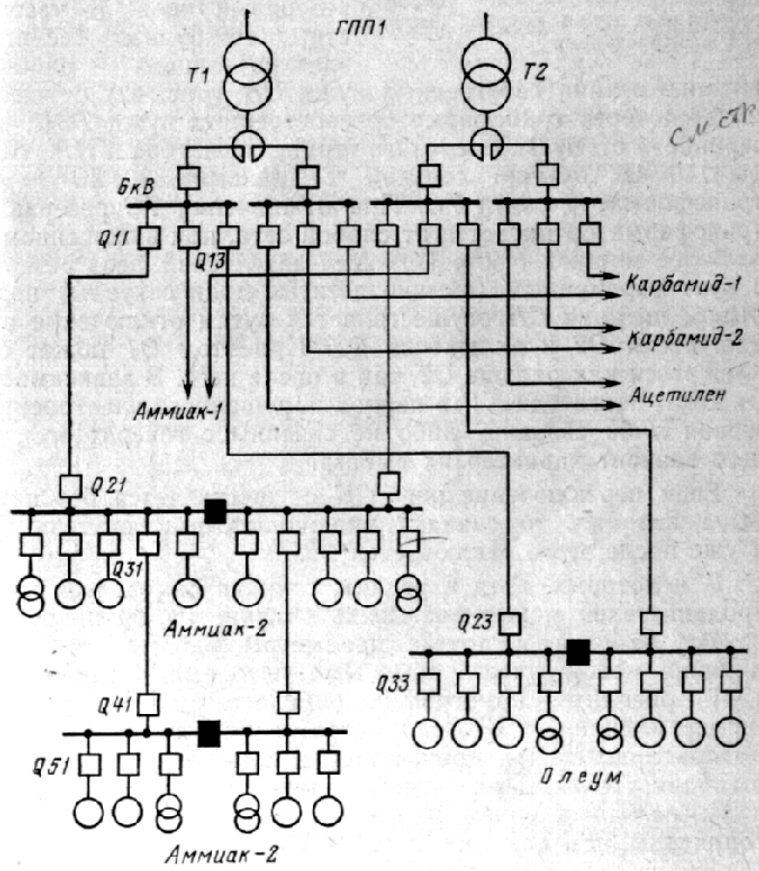


Рис. 41. Схема электроснабжения предприятия промышленности минеральных удобрений с соблюдением принципа блочности питания

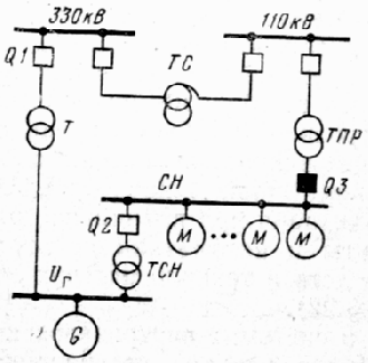


Рис. 42. Схема питания секции собственных нужд крупной блочной электростанции

ние питания, т. е. когда потерявшая питание секция с помощью устройства АВР (как правило, на секционном выключателе) подключается к вводу, уже несущему рабочую нагрузку.

В схемах питания собственных нужд электростанций чаще используется явное резервирование, которое осуществляется путем воздействия на специальный резервный ввод. В частности, на крупных блочных электростанциях рабочее питание секции собственных нужд *СН* (рис. 42) осуществляется через трансформатор собственных нужд *ТСН*, резервное — от пускорезервного трансформатора *ТПР*. Шины 110 кВ обычно связаны с шинами 330 кВ через трансформатор связи *ТС*. При отключении *ТС* резервный трансформатор питается от слабой сети, при включенном — от более мощной (см. § 17). Автоматический ввод резерва с кратковременным (обычно десятые доли секунды) перерывом питания *СН* осуществляется путем отключения выключателя *Q2* и включения *Q3*. При этом *Q1* может отключаться как раньше *Q2*, так и после него. В зависимости от этого двигателя *СН* в период нарушенного электроснабжения либо связаны, либо не связаны с генератором, от чего зависит характер их выбега.

Если переключение шин *СН* осуществляется без перерыва питания, то сначала включается выключатель *Q3*, а уже после этого отключается *Q2*.

В некоторых, хотя и редких, случаях самозапуск электродвигателей может оказывать влияние на тепловую нагрузку кабелей и другие параметры работы сети. Это влияние можно учесть обычными методами. Например, в [28] приводится номограмма, определяющая зависимость между мощностью КЗ, параметрами питающего трансформатора и потерей напряжения при самозапуске асинхронных двигателей. При использовании двигателей с номинальным напряжением 10 кВ эти соотношения более благоприятны, чем для двигателей 6 кВ.

22. ВЛИЯНИЕ САМОЗАПУСКА НА РЕЛЕЙНУЮ ЗАЩИТУ И АВТОМАТИКУ

Самозапуск в ряде случаев влияет на работу релейной защиты, в связи с чем могут предъявляться соответствующие требования к ее расчету и схемам.

Максимальная токовая защита действует при повреждениях не только на защищаемом участке, но и при внешних КЗ, резервируя защиту последующего участка, если считать от источника питания. Токовые реле, сработавшие при внешнем КЗ, должны надежно возвращаться в исходное положение после отключения КЗ соответствующей защитой и снижения тока до максимального тока нагрузки.

Например, при КЗ в точке *К* (рис. 43,*а*) сработают токовые реле защит *1* и *2*. После отключения повреждения защитой *2* прохождение тока КЗ прекращается и пришедшие в действие токовые реле защиты *1* должны возвращаться в исходное положение, так как иначе защита *1* ложно отключит свой выключатель. Поэтому ток возврата защиты *1* должен быть больше тока нагрузки, проходящего в линии, на которой эта защита установлена.

Ток нагрузки после отключения КЗ имеет повышенное значение из-за наличия тока самозапуска двигателей, подключенных к подстанции *Б*, которые успели затормозиться вследствие глубокого снижения напряжения при прохождении тока КЗ. Характер изменения тока и напряжения

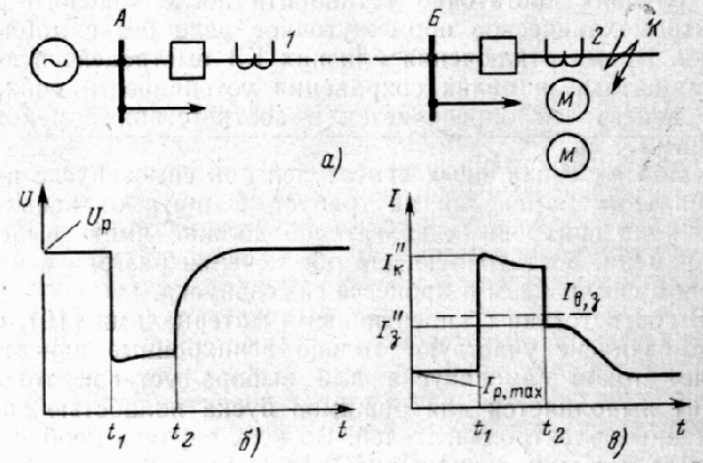


Рис. 43. Влияние самозапуска на работу максимальной токовой защиты:

а — схема; *б* — напряжение на шинах *А* при КЗ в точке *К*; *в* — ток защиты *1* при КЗ в точке *К*; t_1 — момент возникновения КЗ; t_2 — момент отключения тока КЗ защитой *2*; $I_{в,а}$ — ток возврата защиты

в описанном процессе изображен на рис. 43,*б* и *в*. Увеличение тока при самозапуске по сравнению с максимальным рабочим током $I_{р,max}$ учитывается коэффициентом запуска $k_з = I_з/I_{р,max}$, и тогда первичный ток срабатывания защиты, А, равен

$$I_{с.з} = \frac{k_н k_з}{k_в} I_{р,max} = \frac{k_н}{k_в} I_з'', \qquad (99)$$

где $k_н$ — коэффициент запаса (надежности), равный 1,1—1,2; $k_в$ — коэффициент возврата защиты.

Токовая отсечка настраивается на отключение токов близких КЗ $I_к''$. Если ток включения при самозапуске $I_з''$ соизмерим с ним, то при восстановлении электроснабжения возможно ложное действие защиты. Отсечка в некоторых случаях может сработать и от ударного (с учетом апериодической составляющей) тока включения. Для предотвращения ложного действия ток срабатывания отсечки $I_{с,о}$ должен находиться в пределах

$$I_к'' > I_{с,о} > k_у I_з'', \qquad (100)$$

где $k_у$ — ударный коэффициент, выбираемый, как и при расчете тока КЗ ($2 > k_у > 1$).

При очень быстром затухании тока включения выполнение этого условия не обязательно. Достаточно отстроиться от тока включения по времени, для чего в некоторых случаях достаточно установить после токового реле электромеханическое промежуточное реле без самоблокировки. Время отключения близких КЗ быстродействующими защитами в целях сохранения устойчивости синхронных двигателей определяется в соответствии с рекомендациями § 15.

Защита асинхронных двигателей при самозапуске принципиальных изменений не требует. Защита от асинхронного хода синхронных двигателей должна иметь выдержку времени, достаточную для обеспечения разгона и вхождения в синхронизм в процессе самозапуска.

В соответствии с директивными материалами [19], если в самозапуске участвуют только асинхронные двигатели, расчет токов самозапуска для выбора уставок токовых защит выполняется для режимов пуска полностью заторможенных электродвигателей. Во всех случаях необходимо принять меры к сокращению перерыва в электроснабжении ускорением действия устройств релейной защиты, сетевой и технологической автоматики. Для этого необходимо уменьшать до минимума уставки по времени максимальных токовых защит и не предусматривать излишних ступеней выдержки времени.

Выше упоминалось значение защиты минимального напряжения для обеспечения самозапуска электродвигателей. В том случае, когда асинхронный или синхронный электродвигатель наиболее ответственного механизма должен участвовать в самозапуске первой ступени, причем его самозапуск возможен при любом перерыве электроснабжения вплоть до полной остановки двигателя, защита минимального напряжения на его выключателе может, вообще говоря, и отсутствовать. Однако с точки зрения обеспечения безопасных условий эксплуатации она устанавливается для отключения агрегата после его полной остановки. Выдержка времени этой защиты должна быть больше времени выбега агрегата до полной остановки $t_{выб}$ и одновременно больше выдержки времени любых устройств релейной защиты в сети, локализующих КЗ, а также устройств автоматики, восстанавливающих электроснабжение данного двигателя $t_{РЗА}$:

$$t_{з,U1} > t_{выб}; \; t_{з,U1} > t_{РЗА}. \qquad (101)$$

Если самозапуск ответственного агрегата возможен лишь в том случае, когда время нарушения электроснабжения не превысит допустимого $t_{доп}$ (см. § 16, табл. 1), выдержка времени защиты минимального напряжения должна быть

$$t_{з,U1} \leqslant k_н (t_{доп} - t_в), \qquad (101а)$$

где $k_н$ — коэффициент надежности, равный 0,8—0,9; $t_в$ — собственное время отключения выключателя.

Уставка защиты минимального напряжения наиболее ответственных электродвигателей принимается, как правило, $U_{з,U1} \approx 0{,}25$. Выключатели всех остальных электродвигателей оборудуются защитой минимального напряжения в обязательном порядке. Уставка по времени защиты минимального напряжения двигателей, участвующих в самозапуске второй ступени, $t_{з,U2}$ должна быть не больше значения, когда они еще не создают помех для разгона двигателей первой ступени после восстановления напряжения. Тогда при малых перерывах электроснабжения, после которых снижение напряжения невелико, двигатели первой и второй ступеней участвуют в самозапуске совместно, а при более длительных двигатели второй ступени отключаются. Этот принцип используется для выбора уставок за-

щиты минимального напряжения двигателей, участвующих в последующих стадиях самозапуска (если они есть) или вообще не участвующих в самозапуске.

Первая ступень срабатывания защиты минимального напряжения устанавливается для двигателей, участвующих в последней ступени самозапуска либо вообще не участвующих в нем. Обычно она выполняется с уставкой по напряжению 0,65—0,8 (для собственных нужд тепловых электростанций — 0,65—0,7) и по времени не более 0,5 с. Наоборот, последняя ступень защиты минимального напряжения устанавливается для двигателей, участвующих в первой ступени самозапуска. Для этих двигателей защита минимального напряжения может отсутствовать. Отключение электродвигателей второй и последующих ступеней самозапуска, как и не участвующих в самозапуске, может осуществляться непосредственно от пускового устройства АВР.

Защита минимального напряжения выключателя, установленного на линии, питающей данную секцию шин, не должна срабатывать при КЗ на отходящей линии за реактором. Поэтому ее уставка по напряжению $U_{з,ш} \leqslant U_{к,внеш}$, где $U_{к,внеш}$ — напряжение на шинах, к которым подключен трансформатор напряжения, при внешнем КЗ. От этого же реле напряжения осуществляется пуск устройства АВР (§ 23).

Реле минимального напряжения не должны срабатывать в процессе самозапуска электродвигателей после восстановления питания. Это относится ко всем видам защиты минимального напряжения. Поэтому $U_{з,ш} \leqslant U_{восст,ш}$ и $U_{з,д} \leqslant U_{д}$, где $U_{з,ш}$ и $U_{з,д}$ — уставки защит вводного выключателя шин и двигателя; $U_{восст,ш}$ — восстановившееся напряжение на шинах или напряжение на шинах подстанции в неповрежденной части системы электроснабжения при самозапуске в каком-либо узле схемы. Для шин, как и для наиболее ответственных электродвигателей, обычно принимается $U_{з,ш} \approx 0{,}25$.

На некоторых промышленных предприятиях традиционные методы обеспечения селективности релейной защиты не обеспечивают требований, предъявляемых к системе электроснабжения. Рассмотрим это явление на примере схемы электроснабжения предприятия промышленности минеральных удобрений, изображенной на рис. 41.

Уставка по времени защиты от КЗ на выключателях *Q51* производства *Аммиак-2* и *Q33* в цехе *Олеум* выбирается минимальной t_0. Для последующих ступеней вводится ступень выдержки времени Δt. Для защиты выключателя *Q13* выдержка времени должна быть не менее $t_0+\Delta t$, а для *Q11* — не менее $t_0+2\Delta t$. Фактически выдержка времени защиты от КЗ на включателях 6 кВ ГПП составляет не менее 1 с. В то же время на производствах аммиака имеются компрессоры с синхронными двигателями, которые при напряжении ниже 5 кВ на время более 0,2—0,5 с могут потерять устойчивость, выпасть из синхронизма и остановиться. Следовательно, если произойдет КЗ на шинах 6 кВ РП цеха *Олеум*, то кратковременное снижение напряжения (1—1,2 с) вызовет остановку компрессоров и соответствующих технологических линий производств *Аммиак-1* и *Аммиак-2*.

Эффективным средством, обеспечивающим избирательное отключение поврежденного участка системы внутризаводского электроснабжения за время меньше допустимого, является применение дифференциальной защиты или других видов избирательной быстродействующей защиты [29]. Однако такое решение связано с повышенными капитальными затратами и эксплуатационными расходами. В данном случае (см. рис. 41), когда на производстве с непрерывным технологическим процессом остановка одного механизма приводит к остановке всей технологической линии, а принцип блочности питания полностью соблюдается, в целях сохранения в работе производств, не имеющих повреждений в системе электроснабжения, релейная защита выполняется неселективной, т. е. время действия релейной защиты выключателя *Q13* не отличается от времени действия защиты выключателя *Q33*, а также совпадает время действия защиты выключателя *Q11*, *Q31* и даже *Q51*. Если остановка двигателя, питающегося от *Q51*, вызывает остановку всей первой линии производства *Аммиак-1*, то не имеет значения, каким из выключателей — *Q11*, *Q31* или *Q51* — отключится короткое замыкание, возникшее в зоне этого двигателя. В любом случае производство остановится.

Практически на этих выключателях устанавливается защита без выдержки времени. Тогда любое КЗ на подстанции или питающих линиях (например, в цехе *Олеум*) отключится выключателем *Q13* за время, равное собственному времени отключения выключателя, т. е. за 0,1—0,2 с. Быстрое отключение поврежденного участка позволяет сохранить в работе все остальные производства.

Следует подчеркнуть, что неселективной можно выполнять только защиту от КЗ, вызывающих недопустимую по-

садку напряжения, и только при условии полного соблюдения принципа блочности питания. Защита от других повреждений выполняется селективной.

Применение самозапуска предъявляет дополнительные требования к выполнению и устройств автоматики. Если в самозапуске участвуют только асинхронные и невозбужденные (с разрядным сопротивлением в роторе или с развозбужденным возбудителем) синхронные двигатели, то устройства АПВ выполняются обычным образом. При наличии возбужденных синхронных двигателей, если ток включения выше допустимого, следует применить одну из схем гашения поля либо увеличить выдержку времени действия АПВ. Схемы с улавливанием синхронизма в сетях 0,4—10 кВ применять не рекомендуется. Время срабатывания АПВ на выключателях электродвигателей, участвующих в самозапуске второй и последующих ступеней, должно быть достаточным для обеспечения разгона двигателей, участвующих в самозапуске предыдущей ступени.

Наиболее важным звеном автоматизации электроснабжения с точки зрения обеспечения самозапуска электродвигателей являются устройства АВР.

23. СХЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЗЕРВНОГО ПИТАНИЯ

Большинство распределительных пунктов (РП) напряжением до 10 кВ выполняется с одной системой шин, разделенной на две секции с раздельной работой (см. рис. 40,*а*). Каждая секция имеет ввод, способный обеспечить в послеаварийном режиме питание двух секций. Между секциями установлен секционный выключатель (СВ), который в нормальном режиме отключен и оборудован устройством автоматического ввода резерва. При выполнении РП по схеме рис. 40,*в* устройство АВР воздействует на секционный выключатель, шунтирующий реактор, а в выключателе в цепи реактора устанавливается защита, отключающая его при КЗ на одной из секций шин. Эта защита при КЗ за выключателем отходящей или питающей линии не должна сработать раньше защиты соответствующего выключателя, что достигается схемными решениями или выбором уставок. В схеме рис. 40,*б* АВР не требуется, а на секционном выключателе устанавливается такая же защита.

Основными способами пуска устройств АВР являются пуск при несоответствии положений выключателя на вводе и его ключа управления (выключатель отключился, в то время как ключ остался включенным) и пуск от реле минимального напряжения. При отсутствии возбужденных синхронных двигателей напряжение на отключившихся шинах снижается до 0,25 достаточно быстро (в пределах 0,5—1 с) и реле напряжения может выполнять функции пускового органа АВР. При наличии возбужденных синхронных двигателей их ЭДС снижается до 0,25 медленно (§ 5, 6) и время срабатывания АВР неоправданно увеличивается. Тогда помимо пуска от несоответствия положения используются различные специальные пусковые органы АВР.

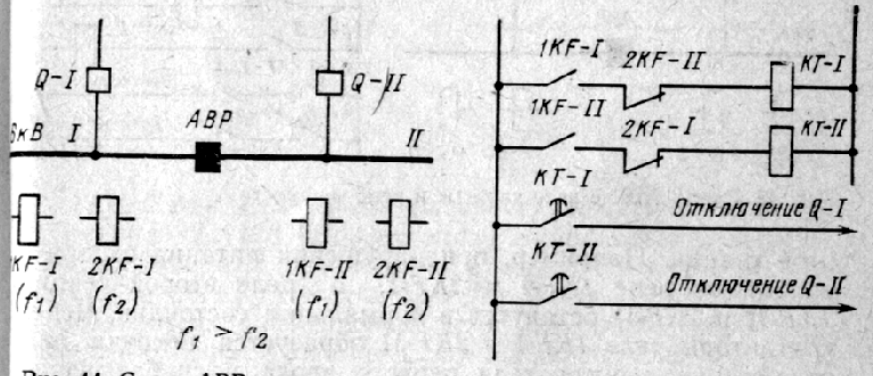


Рис. 44. Схема АВР с реле частоты

Одним из способов индикации прекращения питания секции является применение реле частоты. Включение устройства АВР производится при снижении частоты на 0,5—1 Гц, что соответствует снижению угловой скорости двигателей на 1—2%. При общем снижении частоты в питающей сети срабатывают реле частоты на обеих секциях и АВР не действует. Если исчезает напряжение на одном из вводов, то частота снизится лишь на одной секции, отключится выключатель поврежденного ввода и сработает устройство АВР. Однако схемы, имеющие по одному реле частоты на каждой секции, могут срабатывать ложно за счет естественного разброса фактической частоты срабатывания реле при одинаковой уставке (при снижении частоты в энергосистеме одно из реле срабатывает раньше другого, в результате чего подается ложный сигнал).

Указанный недостаток устраняется при установке на каждой секции двух реле частоты с разными уставками (рис. 44). В одну цепь пускового органа АВР включают контакты двух реле, расположенных на разных секциях

и имеющих различные уставки (реле *1KF*-I и *2KF*-II). Применение отличающихся уставок реагирующего *2KF* и контрольного *1KF* реле исключает возможность ложного пуска АВР, так как при снижении частоты в энергосистеме срабатывает контрольное реле и разрывает цепь пускового органа. При повреждении одного из вводов снижается частота только одной секции и срабатывает реле только

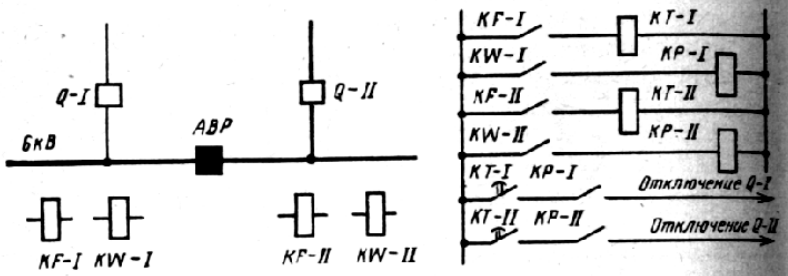


Рис. 45. Схема АВР с реле частоты и реле мощности

этой секции. Например, при нарушении питания секции *I* сработают реле *1KF*-I и *2KF*-I, а реле второй секции *1KF*-II и *2KF*-II останутся в нормальном состоянии. Через контакторы реле *1KF*-I и *2KF*-II образуется цепочка для отключения выключателя первого ввода и срабатывания АВР.

Быстродействие описанной схемы также может быть недостаточным. При КЗ в цепи ввода или при исчезновении напряжения на нем более быстрое срабатывание устройства АВР достигается при использовании реле частоты совместно с реле мощности (рис. 45). Устройство АВР срабатывает, если одновременно со снижением частоты изменяется направление мощности (в зависимости от конкретных условий — реактивной или активной) на одном из вводов либо по нему перестает поступать мощность, что может быть при КЗ в цепи ввода или при исчезновении напряжения на нем.

В последнее время все большее распространение получает наиболее эффективный способ АВР с пусковым органом, реагирующим на угол сдвига между векторами напряжения на двух секциях. Если режим работы энергосистемы предусматривает возможность колебания угла сдвига векторов напряжения на двух вводах, то в дополнение к измерителю угла *KC* следует установить реле мощности. Устройство АВР включается, если на одном из вводов меняется направление или прекращается подача мощно-

сти и одновременно увеличивается угол между векторами напряжения на обеих секциях (рис. 46). В простейшем случае на изменение угла может реагировать реле напряжения, включенное на разность напряжений одноименных фаз. Схема может быть выполнена как с использованием традиционной релейной техники, так и на полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах [30, 31].

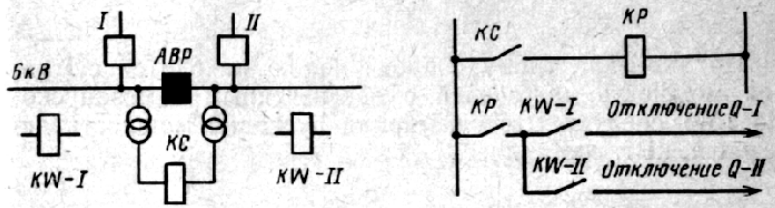


Рис. 46. Схема АВР с пусковым органом, реагирующим на угол между векторами напряжения

Устройства АВР очень распространены и в сетях напряжением до 1000 В. Они могут выполняться с выдержкой времени как превышающей выдержку времени АВР в сети 6—10 кВ, так и меньше ее. Пуск устройства АВР производится, как правило, при отпадании контактора или отключении автоматического выключателя на вводе, потерявшем питание, с последующим включением секционного контактора или автоматического выключателя, предназначенного для дистанционного включения.

24. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ НЕОТКЛЮЧАЕМЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО УСЛОВИЯМ САМОЗАПУСКА

На практике часто требуется определение наибольшей суммарной мощности двигателей, которые могут одновременно участвовать в самозапуске.

Сначала определяется скольжение $s_з$, до которого затормаживаются двигатели за время перерыва питания. Затем, исходя из характеристик момента сопротивления механизма и вращающего момента двигателя, определяют напряжение, при котором в начале разгона момент двигателя будет превышать момент сопротивления:

$$U_д = \sqrt{m_{ас,\,U}/m_{ас,\,з}} \geqslant \sqrt{m_с/m_{ас,\,з}}, \qquad (102)$$

где $m_{ас,U}$ — требуемый момент двигателя при скольжении $s_з$; $m_{ас,з}$ — момент двигателя при номинальном напряжении и скольжении $s_з$.

Для простоты считают, что двигатель успевает остановиться. Тогда $m_с = m_{тр}$, $m_{ас,э} = m_п$ и (102) принимает вид (63).

Определяется эквивалентное сопротивление двигателей, при котором будет обеспечено это напряжение. Из (56) определяется

$$x_э = x_с \frac{U_д}{U_с - U_д}.$$

По эквивалентному сопротивлению находится суммарная мощность двигателей с обеспеченным самозапуском. Из (57) следует, что суммарная пусковая мощность двигателей, кВт, составляет

$$S_{п,э} = \frac{S_б U_{ном}^2}{x_э U_б^2},$$

где $S_б$, $U_{ном}$ и $U_б$ — мощность, кВ·А, и напряжение, кВ; $x_э$ — сопротивление, отн. ед.

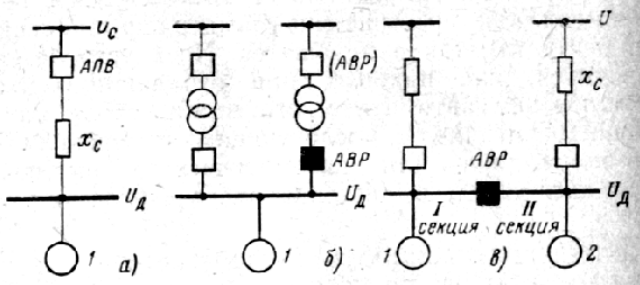


Рис. 47. Варианты самозапуска электродвигателей:
а — АПВ в энергосистеме; *б* — АВР трансформатора; *в* — АВР на секционном выключателе; *1* — двигатели, участвующие в самозапуске; *2* — нагрузка II секции при самозапуске двигателей I секции

В пределах найденной мощности выбираются двигатели наиболее ответственных механизмов. Остальные потребители должны быть автоматически отключены. Отключившиеся двигатели могут либо участвовать в самозапуске второй ступени, либо включаться персоналом.

Если в самозапуске участвуют все двигатели, т. е. отсутствует секция шин, на которой электроснабжение не нарушалось (рис. 47,*а*, *б*), то максимальная неотключаемая мощность двигателей, кВт, равна

$$P_{д,max} = \frac{\eta_{ном} \cos\varphi_{ном} S_б}{k x_с}\left(\frac{U_с}{U_д} - 1\right), \qquad (103)$$

где $\eta_{ном}$; $\cos\varphi_{ном}$ — средние номинальные КПД и коэффициент мощности двигателей; $U_д$ — требуемое напряжение двигателя; k — кратность тока согласно (53) или в соответствии с рис. 19.

Формулы (102) и (103) справедливы для асинхронных и невозбужденных синхронных двигателей, участвующих в самозапуске.

Если отключившаяся секция *I* (рис. 47,*в*) с помощью АВР на секционном выключателе подключается к секции *II*, уже несущей нагрузку, то неотключаемая мощность на секции *I* составит, кВт,

$$P_{д,max} = \frac{\eta_{ном} \cos\varphi_{ном}}{k}\left[\left(\frac{U_с}{U_д} - 1\right)\frac{S_б}{x_с} - Q_н\right], \qquad (103а)$$

где $Q_н$ — реактивная мощность, потребляемая нагрузкой, квар.

Из (103а) следует, что если на неотключающейся секции *II* имеются синхронные двигатели, целесообразно использовать их форсировку возбуждения. При опережающем коэффициенте мощности $Q_н$ отрицательно, а при увеличении его абсолютного значения $P_{д,max}$ увеличивается. Наличие на неотключавшейся секции конденсаторной батареи также облегчает условия самозапуска. Однако выработка реактивной мощности неблагоприятно влияет на ток включения.

Кратность тока k для явнополюсных синхронных двигателей при наличии разрядного сопротивления в цепи ротора с достаточной для практических расчетов точностью может учитываться аналогично (53). Однако в каталогах для них приводится не максимальный асинхронный момент, а указываются моменты при скольжении 0,05 («входной») $m_{вх}$ и пусковой $m_п$. Тогда из (61) при $U_д = 1$ имеем

$$s_{пл} \approx \sqrt{\frac{0{,}05(m_п - 0{,}05 m_{вх})}{m_{вх} - 0{,}05 m_п}}.$$

25. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА АВР СЕКЦИИ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Определим параметры устройства автоматического включения резервного питания секции собственных нужд тепловой электростанции через реактор на примере схемы, изображенной на рис. 48.

В нормальном режиме секция *СН* питается от шин *А* генераторного напряжения. Выключатель *Q3* отключен. На рис. 48,*б* положение всех контактов показано для отключенного состояния соответствующих аппаратов. В нормальном режиме реле напряжения $KV1_a$, $KV1_c$ и *KV2* притянуты. Реле однократности действия *КРТ* также притянуто (выключатель *Q2* включен).

При исчезновении напряжения на шинах *СН* реле напряжения $KV1_a$ и $KV1_c$ отпадут и, если реле *KV2* притянуто (при наличии достаточного напряжения на шинах *Б*), получает питание реле времени *КТ*. Если за время действия реле *КТ* напряжение на шинах *СН* не восстановится, получит питание катушка отключения *УО2* выключателя

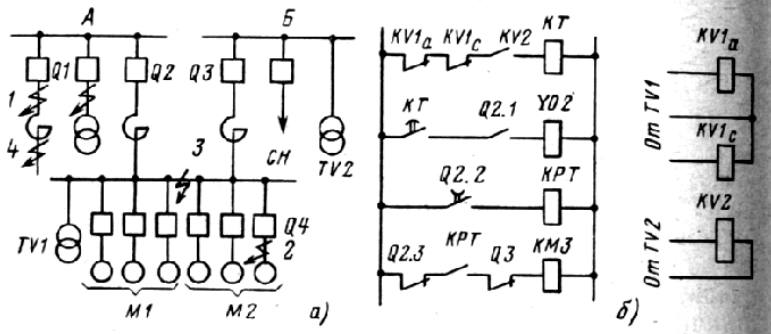


Рис. 48. Схема питания секции собственных нужд тепловой электростанции:
а — первичные цепи; *б* — вторичные цепи устройства АВР

Q2 и этот выключатель отключится. При отключении выключателя *Q2* обесточится катушка реле однократности действия *КРТ* и получит питание контактор включения *КМ3* выключателя *Q3*. Реле *КРТ* разомкнет свои контакты непосредственно после включения выключателя *Q3*, подающего питание на шины *СН* от шин *Б* генераторного напряжения. Если причиной исчезновения напряжения на шинах *СН* было устойчивое *КЗ* в точке *3*, выключатель *Q3* отключится своей защитой и повторно не включится, что обеспечивается размыканием контакта реле *КРТ*.

Если выбрана принципиальная схема устройства АВР, то при расчете требуется проверить возможность самозапуска двигателей, питающихся от секции собственных нужд; выбрать уставки АВР; выбрать уставку токовой защиты цепи резервного питания (выключатель *Q3*).

В целях упрощения расчет самозапуска двигателей можно выполнить с допущениями: в качестве расчетного можно принять режим, соответствующий полной остановке; напряжение на шинах *Б* генераторного напряжения (или на шинах высокого напряжения, к которым

подключен трансформатор резервного ввода секции собственных нужд) можно принять неизменным; активные сопротивления можно не учитывать.

В большинстве случаев достаточно определить напряжение на шинах. При перерывах питания, указанных в § 17, самозапуск двигателей собственных нужд тепловых электростанций возможен, если напряжение на зажимах двигателей в начале самозапуска не менее 0,55—0,65.

Расчет удобнее вести в относительных единицах, приняв за базовые номинальные данные реактора или трансформатора. Начальное восстанавливающееся напряжение на зажимах двигателей (см. § 11)

$$U_д = \frac{x_э}{x_э + x_р} U_с, \qquad (104)$$

где $x_э$ — эквивалентное сопротивление всех параллельно подключенных двигателей (57); $x_р$ — сопротивление реактора (50).

Ток срабатывания максимальной токовой защиты резервной цепи питания (для схемы на рис. 48 — выключателя *Q3*) определяется в соответствии с условиями, изложенными в § 22. Пусковой ток, А, группы двигателей, подключенных к шинам *СН*, при номинальном напряжении равен

$$I_п = \frac{S_п}{\sqrt{3}\, U_{д.ном}}, \qquad (105)$$

где $S_п$ — пусковая мощность группы, кВ·А, по (52).

Ток самозапуска, А, при $U_д$, отн. ед., определяемом по (104), составит

$$I_д = U_д I_п. \qquad (106)$$

Реле напряжения *KV2* не должно быть притянутым в том случае, если напряжение неповредившегося источника опустилось ниже минимально допустимого предела. Если под уставкой реле напряжения понимается минимальное значение напряжения, при котором реле притягивается, $U_{пр,KV2}$, то

$$U_{с.р} = U_{пр,KV2} \leqslant \frac{U_{раб,min}}{k_н}, \qquad (107)$$

где $k_н$ — коэффициент надежности, равный примерно 1,1—1,2.

Если под уставкой реле понимается максимальное значение напряжения, при котором реле отпадает, $U_{от,KV2}$, то

$$U_{с.р} = U_{от,KV2} \leqslant \frac{k_в U_{раб,min}}{k_н}, \qquad (107а)$$

где $k_в$ — коэффициент возврата реле (0,8—0,9).

Реле $KV2$ должно отпадать при напряжении не ниже 0,6. Уставка реле напряжения $KV1_a$ и $KV1_c$ определяется в соответствии с условиями, указанными в § 22. Выдержка времени реле времени KT должна быть несколько больше времени действия релейной защиты от КЗ (обычно выполняемой в виде токовой отсечки) на отходящих линиях (т. е. в точках *1* и *2*):

$$t_{KT} \geqslant t_{з,отх} + \Delta t. \qquad (108)$$

Замедление в отпадании якоря реле однократности действия KPT выбирается из условия обеспечения надежного включения выключателя резервного ввода:

$$t_{KPT} = t_{вкл} + t_{зап}, \qquad (109)$$

где $t_{вкл}$ — время включения выключателя с учетом привода, с; $t_{зап}$ — запас надежности, равный примерно 0,3 с.

Пример расчета описанной схемы приведен в приложении 3.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Пример расчета ЭДС синхронного двигателя при свободном выбеге с различными системами возбуждения

Выполним расчет ЭДС при выбеге синхронного двигателя с номинальными параметрами 1350 кВт, 6 кВ, 171 А, 1000 об/мин, $\cos\varphi = 0{,}85$ (опережающий), работающего с механизмом, имеющим вентиляторную характеристику момента сопротивления. При токе ротора $I_{f1} = 169$ А и напряжении на кольцах $U_{f1} = 28{,}8$ В ЭДС двигателя по характеристике холостого хода равна номинальному напряжению статора (6 кВ). В соответствии с каталожными данными $\tau_{d0} = 2{,}65$ с, $x''_d = 0{,}24$, $wk_{об}/w_f p = 0{,}39$, $k_{a,d} = 0{,}85$, $\eta = 0{,}94$. Постоянная времени выбега при номинальной нагрузке (т. е. двигателя с полностью нагруженным агрегатом) $\tau_{j,ном} = 2{,}25$ с, момент трения агрегата $m_{тр} = 0{,}051 m_{ном}$.

Наиболее длительно процесс выбега продолжается при полностью разгруженном агрегате. Рассмотрим ЭДС именно для этого случая. В рабочем режиме до отключения двигатель имеет следующие показатели: ток статора 79 А, или $I_{ст} = 79 : 171 = 0{,}464$ отн. ед.; ток ротора 210 А, или $i_{f,р} = 210 : 169 = 1{,}24$ отн. ед. (за базис принято I_{f1}); напряжение в сети 6,02 кВ, или $U = 1{,}02$ отн. ед.; потребляемая мощность $P_с = 774$ кВт; угол между ЭДС и напряжением $\delta_р = 15{,}5°$.

При нагрузке, близкой к 0,5, КПД двигателя составляет 0,89. Тогда при угловой скорости $\omega = 1$ нагрузка, отн. ед., составит

$$k_з = \frac{774 \cdot 0{,}89}{1350} = 0{,}51.$$

Постоянная времени выбега при такой нагрузке (8)

$$\tau_j = \frac{2{,}55}{0{,}51} = 5\text{с},$$

что соответствует результатам испытаний.

Найдем также $\cos\varphi = \dfrac{774}{\sqrt{3} \cdot 6{,}12 \cdot 79} = 0{,}924$; $\varphi = 22{,}5°$; $\psi = \varphi + \delta_р = 38°$; $\sin\psi = 0{,}616$.

При любой системе возбуждения в момент отключения двигателя от сети в обмотке ротора возникает одинаковая свободная составляющая тока, равная (12)

$$\Delta i_f = -0{,}417 \cdot 1{,}24 \cdot 0{,}462 \cdot 0{,}616 = -0{,}16 \text{ отн. ед.}$$

Поскольку механизм имеет вентиляторную механическую характеристику, т. е. в (5) $\gamma=2$, его выбег без учета сил трения будет происходить по (10а):

$$\omega = \frac{1}{1+t/5},$$

а с учетом сил трения — по (10), где $m'_{тр}=m_{тр}/k_з=0{,}051:0{,}51=0{,}1$. Зависимость угла поворота ЭДС выбегающего двигателя выразится по (25) или (25а).

Рассмотрим выбег двигателя для следующих вариантов:

1) электромашинный возбудитель с самовозбуждением находится на одном валу с двигателем и глухо подключен к обмотке ротора;

2) обмотка ротора замыкается накоротко;

3) обмотка ротора замыкается на разрядное сопротивление. Возбудитель при этом может быть как вращающимся, так и статическим;

4) статический возбудитель со всеми управляемыми вентилями переключается в инверторный режим, на обмотку ротора подается отрицательное напряжение, остающееся неизменным до полного гашения поля ЭДС двигателя. Такой вариант соответствует питанию возбудителя от трансформатора, подключенного к другой секции шин по сравнению с двигателем.

Вариант 1 соответствует рис. 7. Вращающийся возбудитель имеет номинальные параметры 23,4 кВт, 65 В, 360 А, 1000 об/мин. Постоянная времени обмотки возбуждения $\tau_{в,в}=0{,}15$ с, сопротивление цепи якоря $r_я=0{,}00432$ Ом. Этими двумя величинами в последующем пренебрегаем ($\tau_{в,в}\approx 0$). Пересчетные коэффициенты, учитывающие неодинаковость номинальных параметров возбудителя и тех значений тока и напряжения ротора двигателя, при которых ЭДС последнего равна нулю, составят

$$\frac{U_{в,ном}}{U_{f1}} = \frac{65}{28{,}8} = 2{,}225; \qquad \frac{I_{в,ном}}{I_{f1}} = \frac{360}{169} = 2{,}13.$$

В рабочем режиме перед отключением напряжение возбудителя составляло $U_{в,р}=35{,}7$ В $=0{,}55U_{в\,ном}$. Сопротивление цепи возбуждения возбудителя 0,213 Ом, или $r_{в,в}=1{,}18$ отн. ед. (за базовое значение для сопротивления принимается отношение номинальных значений тока и напряжения, в данном случае $U_{в,ном}/I_{в,ном}=65:360=0{,}18$ Ом).

По (18) определяем время, в течение которого напряжение $U_в$ снизится до нуля:

$$t_1 = -5 \ln |(0{,}71 \cdot 1{,}18)| = 0{,}89 \text{ с.}$$

В течение времени от 0 до 0,89 с составляющая тока ротора, определяемая возбудителем, будет изменяться в соответствии с (19), где

$$F = \frac{3{,}5 \cdot 5}{5-2{,}65}\,2{,}225 = 16{,}46;$$

$$G = 1{,}24 - \left(\frac{3{,}5 \cdot 5}{5-2{,}65} - 2{,}5 \cdot 1{,}18\right) 2{,}225 = -8{,}79;$$

$$H = 2{,}5 \cdot 1{,}18 \cdot 2{,}225 = 6{,}56,$$

и тогда

$$i_{f,в}\Big|_{t=0}^{t=0{,}89} = 16{,}46e^{-\frac{t}{5}} - 8{,}79e^{-\frac{t}{2{,}65}} - 6{,}56.$$

В момент времени $t_1=0{,}89$ с этот ток составит $i_{f,в1}=1{,}03$, и далее его изменение будет происходить по закону (20)

$$i_{f,в}\,|_{t=0{,}89} = 1{,}03e^{-\frac{t-0{,}89}{2{,}65}}.$$

Полный ток ротора согласно (13) составит

$$i_f = i_{f,в} - 0{,}16e^{-\frac{t}{2{,}65}}.$$

Электродвижущая сила синхронного двигателя, приведенная к синхронной угловой скорости (см. § 9), равна

$$E_{д,пр} = \frac{0{,}03 + 0{,}21 i_f + 6{,}5 i_f^2}{1 + 2{,}03 i_f + 3{,}7 i_f^2}.$$

(Эта величина потребуется в приложении 2).

При изменении угловой скорости согласно (10а) получим по формуле (21)

$$E_д = \frac{E_{д,пр}}{1+t/5}.$$

Таблица П1

Время с момента отключения, с	Опытные величины, отн. ед.		Расчетные величины, отн. ед.				
	ω	$E_д$	$U_в$	$i_{f,в}$	i_f	$E_{д,пр}$	$E_д$
0	1	1,04	0,55	1,24	1,08	1,04	1,04
0,2	0,96	1,02	0,41	1,24	1,1	1,05	1,01
0,5	0,9	0,96	0,21	1,17	1,05	1,03	0,93
0,89	0,83	0,87	0	1,03	0,94	0,99	0,82
1	0,82	0,82	—	0,99	0,9	0,98	0,8
2	0,71	0,58	—	0,7	0,66	0,76	0,54
3	0,62	0,39	—	0,5	0,48	0,56	0,35
4	0,54	0,25	—	0,37	0,36	0,43	0,23

Напряжение, приложенное к обмотке возбуждения, за время $t_1 = 0{,}89$ с снижается практически до нуля согласно выражению

$$U_в = 3{,}5e^{-\frac{t}{5}} - 2{,}5 \cdot 1{,}8.$$

Результаты расчета приведены в табл. П1 и на рис. 11. Там же приведены значения угловой скорости и ЭДС двигателя, полученные экспериментально (по осциллограмме выбега).

Как видно из результатов, ошибка в определении $E_д$ не превышает 0,04, т. е. находится в пределах точности эксперимента.

Проверим, как влияет на результат степень точности аналитического выражения изменения угловой скорости при выбеге агрегата. Для механизма с вентиляторным моментом сопротивления выбег более точно описывается уравнением (10):

$$\omega = \frac{0{,}377}{0{,}334 + \operatorname{tg}\frac{t}{16{,}65}}.$$

В уравнении (19) принималось, что изменение угловой скорости при выбеге может быть выражено согласно (9а), т. е. $\omega = e^{-t/5}$, причем, как видно из результатов, формула (19) в нашем примере действует только до $t_1 = 0{,}89$ с. Результаты определения скорости по уравнениям (10а), (10) и (9а) приведены в табл. П2.

Таблица П2

Время с момента отключения, с	Угловая скорость, отн. ед.			
	Опытное значение	Расчетные значения		
		(по 10)	по (10а)	по (9а)
0	1	1	1	1
0,2	0,96	0,96	0,95	0,96
0,5	0,9	0,91	0,91	0,94
0,89	0,83	0,84	0,85	0,84
1	0,82	0,83	0,84	0,82
2	0,71	0,71	0,71	0,67
3	0,62	0,61	0,62	—
4	0,54	0,52	0,55	—

Как видно из результатов, формулы (10), (10а) обеспечивают совпадение в пределах точности эксперимента в значительном интервале времени (более 4 с). Формула (9а) справедлива в интервале времени от 0 до 1,5 с, т. е. в 2 раза большем того, в течение которого напряжение возбудителя падает до нуля.

Из этой же таблицы следует, что учет момента трения существенно не влияет на расчет угловой скорости и ЭДС при выбеге синхронного двигателя.

Вариант 2. При закорачивании обмотки ротора в соответствии с (27)

$$i_{f,в} = 1{,}24e^{-\frac{t}{2{,}65}}, \quad i_f = (1{,}24 - 0{,}16)\,e^{-\frac{t}{2{,}65}} = 1{,}08e^{-\frac{t}{2{,}65}}.$$

Величины i_f, $E_{д,пр}$ и $E_д$ определяются, как и в предыдущем случае. Результаты расчета приведены в табл. П3.

Таблица П3

Время с момента отключения, с	Расчетные величины при закороченном роторе, отн. ед.		
	i_f	$E_{д,пр}$	$E_д$
0	1,08	1,04	1,04
0,2	1	1	0,96
0,5	0,89	0,93	0,84
1	0,74	0,83	0,68
2	0,51	0,61	0,43
3	0,35	0,41	0,26
4	0,24	0,21	0,13

Вариант 3. При замыкании ротора на разрядное сопротивление кратностью $k_R = 5{,}8$ (рис. 9,*а*) постоянная времени затухания потока ротора при разомкнутом статоре в соответствии с (28) станет равной $\tau_{d0R} = 2{,}65 : (1 + 5{,}8) = 0{,}39$ с. Тогда согласно (26) и (27)

$$i_{f,в} = 1{,}24e^{-\frac{t}{0{,}39}} \quad и \quad i_f - (1{,}24 - 0{,}16)\,e^{-\frac{t}{0{,}39}} = 1{,}08e^{-\frac{t}{0{,}39}}.$$

Результаты расчета приведены в табл. П4.

Таблица П4

Время с момента отключения, с	Расчетные величины при разрядном сопротивлении, отн. ед.		
	i_f	$E_{д,пр}$	$E_д$
0	1,08	1,04	1,04
0,2	0,655	0,76	0,73
0,5	0,3	0,32	0,29
1	0,08	0,08	0,07
2	0,01	0,04	0,03
3	0	0,03	0,02

Вариант 4. При подаче на ротор выбегающего двигателя неизменного напряжения обратного знака (рис. 10,*а*) вынужденная составляющая тока ротора (31) будет

$$i_{f.в} = 1{,}24e^{-t/2{,}65} - \frac{65}{28{,}8}(1 - e^{-t/2{,}65});$$

$$i_f = (1{,}24 - 0{,}16 + 2{,}225)e^{-t/2{,}65} - 2{,}225 = 3{,}305e^{-t/2{,}65} - 2{,}225.$$

Результаты расчета приведены в табл. П5.

Таблица П5

Время с момента отключения, с	Расчетные величины при неизменном напряжении возбуждения обратного знака, отн. ед.		
	i_f	$E_{д,пр}$	$E_д$
0	1,08	1,04	1,04
0,2	0,84	0,92	0,88
0,5	0,52	0,62	0,56
1	0,04	0,07	0,06
1,05	0	0	0

Приложение 2. Пример расчета тока включения синхронного двигателя

Выполним расчет тока включения для того же синхронного двигателя, что и в приложении 1. Рассмотрим схему подстанции на рис. 17, на которой имеются четыре синхронных двигателя (1350 кВт, 6 кВ, 171 А, $x''_d = 0{,}24$, кратность пускового тока 4,16), два трансформатора *Т3* и *Т4* 6/0,4 кВ по 1000 кВ·А ($u_к = 5{,}5$ %, нагрузка 70 % при $\cos\varphi = 0{,}6$) и два питающих трансформатора *Т1* и *Т2* 35/6,3 кВ по 4000 кВ·А ($u_к = 7{,}6$ %).

В качестве базовых величин принимаются номинальные мощность и напряжение двигателя:

$$S_б = \sqrt{3}\cdot 6\cdot 171 = 1780 \text{ кВ·А}; \quad U_б = 6 \text{ кВ}.$$

Допустимый ток включения двигателя по формуле (37) составит

$$I''_{доп} = 1{,}7/0{,}24 = 7{,}08 \text{ отн. ед., или } 1210 \text{ А}.$$

Случай 1. Выключатели *Q5—Q7* отключены, срабатывает АПВ на выключателе *Q1*, происходит одиночный самозапуск двигателя *М1*.

Сопротивление трансформатора *Т1*, приведенное к мощности двигателя (49),

$$x_1 = \frac{7{,}6\cdot 1780}{100\cdot 4000} = 0{,}034 \text{ отн. ед.}$$

Ток включения двигателя по (40)

$$I'' = \frac{1{,}02 + E_{д,пр}}{0{,}034 + 0{,}24} = \frac{1{,}02 + E_{д,пр}}{0{,}274}.$$

Случай 2. Выключатели *Q6* и *Q7* не были отключены. При срабатывании АПВ на *Q1* происходит одиночный самозапуск двигателя *М1* при наличии нагрузки трансформаторов *Т3* и *Т4*.

Сопротивление нагрузки (*Т3* и *Т4*) согласно формуле (42) составит

$$x_н = \frac{1780}{2\cdot 0{,}7\cdot 1000\sqrt{1 - 0{,}6^2}} = 1{,}59 \text{ отн. ед.}$$

Ток включения двигателя определяется согласно выражению (41):

$$I''_д = \frac{1{,}02\cdot 1{,}59 + E_{д,пр}(1{,}59 + 0{,}034)}{0{,}034\cdot 0{,}24 + 0{,}24\cdot 1{,}59 + 0{,}034\cdot 1{,}59} = \frac{1{,}62 + 1{,}624E_{д,пр}}{0{,}444}.$$

Случай 3. Работает АПВ на выключателе *Q2*, происходит групповой самозапуск двух двигателей *М2* и *М3*. Двигатель *М4* находится в резерве.

Ток включения одного двигателя по (46)

$$I''_д = \frac{1{,}02 + E_{д,пр}}{2\cdot 0{,}034 + 0{,}24} = \frac{1{,}02 + E_{д,пр}}{0{,}308}.$$

Полученные выражения можно использовать для любой системы возбуждения синхронного двигателя и для любого времени перерыва питания. Для этого нужно подставлять в них значения $E_{д,пр}$, определенные в примере расчета приложения 1.

В табл. П6 и на рис. 18 приведены результаты расчета для варианта глухоподключенного вращающегося возбудителя. Приведенные значения ЭДС взяты из табл. П1.

Таблица П6. **Ток включения синхронного двигателя при самозапуске с разгруженным водяным насосом**

Время перерыва электроснабжения, с	Ток включения, отн. ед.		
	при одиночном самозапуске		при групповом самозапуске двух двигателей (случай 3)
	после свободного выбега (случай 1)	с наличием посторонней нагрузки (случай 2)	
0,2	7,56	7,51	6,72
0,5	7,48	7,4	6,66
1	7,3	7,24	6,49
2	6,5	6,42	5,79
3	5,77	5,7	5,13

Приложение 3. Пример расчета параметров устройства АВР секции собственных нужд электростанции

В секции шин *СН*, изображенной на рис. 48,*а*, подключено шесть асинхронных электродвигателей, три из которых имеют номинальные данные 850 кВт, 6 кВ, коэффициент мощности 0,89, КПД 0,95, кратность пускового тока 5,3, а остальные три — 360 кВт, 6 кВ, коэффициент мощности 0,87, КПД 0,93, кратность пускового тока 4,5.

Используются реакторы типа РБА-6-500-8 с параметрами 6 кВ, 500 А, реактивность 8 %. Номинальное напряжение на шинах *А* и *Б* 6,3 кВ. При КЗ за реактором отходящей линии (в точке *4*) на шинах *А* напряжение не менее 0,7 отн. ед. Время срабатывания токовой отсечки и отключения выключателя *Q1* при КЗ в точке 1—0,15 с, а выключателя *Q4*, отключающего КЗ в точке 2, — 0,12 с. Время включения выключателя *Q3* с учетом привода — 0,25 с.

Требуется рассчитать параметры устройства АВР.

Расчет ведем в относительных единицах, принимая $U_б=6$ кВ, $I_б=500$ А (номинальные данные реактора). Тогда базовая мощность $S_б=\sqrt{3}\cdot 6\cdot 500=5200$ кВ·А.

Пусковая мощность одного двигателя 850 кВт по (52)

$$S_{п1}=\frac{850\cdot 5,3}{0,89\cdot 0,95}=5320 \text{ кВ·А},$$

пусковая мощность двигателя 360 кВт

$$S_{п2}=\frac{360\cdot 4,5}{0,87\cdot 0,93}=2000 \text{ кВ·А}.$$

Суммарная пусковая мощность группы из шести двигателей

$$S_п=3\cdot 5320+3\cdot 2000=21\,960 \text{ кВ·А}.$$

Эквивалентное пусковое сопротивление группы по (57)

$$x_{д,э}\approx z_{д,э}=\frac{5200}{21\,960}=0,24 \text{ отн. ед.}$$

Сопротивление реактора $x_р=0,08$ отн. ед. Напряжение, восстанавливающееся на секции при самозапуске после срабатывания АВР (104),

$$U_д=\frac{0,24}{0,24+0,08}1,05=0,79 \text{ отн. ед.}$$

Полученное напряжение больше требуемого $(0,55—0,65)U_{ном}$, и, следовательно, самозапуск двигателей произойдет.

Напряжение срабатывания минимального реле напряжения $KV1_a$ и $KV1_c$ должно быть (см. § 22) меньше напряжения на шинах *А* или *Б* при КЗ в точке *4* (по условию оно равно 0,7), меньше напряжения на секции при самозапуске $0,79U_{ном}$ и не более $0,25U_{ном}$. Принимается уставка 0,25 отн. ед.

Уставка реле напряжения *KV2*, контролирующего наличие напряжения на источнике питания резервного ввода, должна быть не выше (107)

$$U_{пр,KV2}\leqslant\frac{0,9}{1,1}=0,818 \text{ отн. ед.}$$

(минимально допустимое напряжение на шинах — $0,9U_{ном}$).

В некоторых случаях под напряжением срабатывания реле напряжения понимают не минимальное напряжение притягивания, а максимальное напряжение отпадания. Тогда из (107а)

$$U_{от,KV2}\leqslant 0,818\cdot 0,85=0,695 \text{ отн. ед.}$$

(коэффициент возврата реле равен 0,85), что более 0,6. Следовательно, полученная уставка реле *KV2* может быть принята (притягивание при 0,82 отн. ед., отпадание при 0,7 отн. ед.).

Выдержка времени реле времени *KT*, если ступень выдержки времени 0,3 с, должна быть (108)

$$t_{KT}\geqslant 0,15+0,3=0,45 \text{ с}.$$

Принимаем 0,5 с.

Выдержка времени при отпадании реле *KPT* (109)

$$t_{KPT}=0,25+0,3=0,55 \text{ с}.$$

Принимаем 0,5 с.

Определение тока срабатывания токовой защиты выключателя *Q3* лучше выполнять в именованных единицах.

Пусковой ток группы при известной пусковой мощности равен (105)

$$I_п=\frac{21\,960}{\sqrt{3}\cdot 6}=2110 \text{ А}.$$

Ток при групповом самозапуске и фактическом напряжении (106)

$$I_з=0,79\cdot 2110\approx 1680 \text{ А}.$$

Принимая коэффициент надежности равным 1,2, а коэффициент возврата защиты 0,85, получаем ток срабатывания защиты (99)

$$I_{с,з,Q3}=\frac{1,2}{0,85}1680=2370 \text{ А}.$$

Приложение 4. Экспериментально-расчетное определение основных параметров синхронной машины

1. Синхронные индуктивные сопротивления x_d и x_q.

а) Метод холостого хода и трехфазного КЗ. По точкам характеристики холостого хода и трехфазного КЗ, соответствующим одним и тем же токам возбуждения, определяется сопротивление, Ом,

$$x_d \approx z_d = \frac{U_x}{\sqrt{3}\, I_к},$$

или, отн. ед.,

$$x_d = \frac{U_x I_{ном}}{I_к U_{ном}},$$

где $U_{ном}$, $I_{ном}$ — номинальные линейное сопротивление, В, и фазный ток машины, А.

По мере насыщения машины x_d уменьшается. По характеристикам может быть найдено как насыщенное значение $x_{d\mu}$ (по точке характеристики холостого хода, соответствующей $U=1$), так и ненасыщенное x_d (в прямолинейной части характеристики).

б) Метод скольжения. Машина с разомкнутой обмоткой возбуждения переводится во вращение со скоростью, близкой к синхронной. К статору прикладывается сильно пониженное напряжение. Измеряются минимальное значение тока I_1 и максимальное I_2 и соответствующие им линейные напряжения. Сопротивления, отн. ед., будут:

$$x_d = \frac{U_2 I_{ном}}{I_1 U_{ном}}; \quad x_q = \frac{U_1 I_{ном}}{I_2 U_{ном}}.$$

Точность тем выше, чем меньше скольжение. Ток и напряжение могут быть измерены стрелочными приборами либо с помощью осциллографа.

2. Сверхпереходные индуктивные сопротивления x''_d и x''_q могут быть определены при неподвижном роторе.

Обмотка возбуждения замыкается накоротко или через возбудитель. К статору подводится однофазное пониженное напряжение поочередно ко всем трем парам фаз. Измеряются мощность, напряжение и ток. Для каждого измерения определяется значение сопротивления, Ом,

$$x = \frac{\sqrt{U^2 I^2 - P^2}}{2I^2},$$

или, отн. ед.,

$$x = \frac{\sqrt{U^2 I^2 - P^2}}{2I^2} \frac{I_{ном}\sqrt{3}}{U_{ном}}.$$

По измеренным величинам определяются параметры машины

$$x''_d = x_{ср} - \Delta x; \quad x''_q = x_{ср} + \Delta x_1,$$

где $x_{ср} = \frac{x_{ab} + x_{bc} + x_{ca}}{3}$ — среднее значение измеренного сопротивления в трех фазах;

$$|\Delta x| = \frac{2}{3}\sqrt{x_{ab}(x_{ab} - x_{bc}) + x_{bc}(x_{bc} - x_{ca}) + x_{ca}(x_{ca} - x_{ab})}.$$

Обычно $x''_q \approx 1{,}1 x''_d$, но есть машины, у которых $x''_q < x''_d$. Для уточнения знака поправки Δx в цепь возбуждения включается амперметр. Если наибольшему из измеренных сопротивлений x соответствует наименьшее значение тока возбуждения, то $x''_d < x''_q$, и наоборот.

Индуктивное сопротивление x'_d может быть определено из опыта внезапного КЗ или опыта восстановления напряжения при отключении КЗ. Выполнение обоих этих опытов для двигателей в условиях эксплуатации чрезвычайно затруднено.

Для приближенных расчетов можно воспользоваться данными табл. П7.

Таблица П7. **Примерные соотношения между параметрами синхронных двигателей**

Параметр	Для неявнополюсных турбодвигателей	Для явнополюсных двигателей	Параметр	Для неявнополюсных турбодвигателей	Для явнополюсных двигателей
x_d'	$1{,}4\, x_d''$	$1{,}3\, x_d''$	x_q	x_d	$0{,}6\, x_d$
x_q''	x_d''	$1{,}1\, x_d''$	x_0	$0{,}5\, x_d''$	$0{,}6\, x_d''$
x_q'	x_d'	x_q	x_2	x_d''	$\frac{x_d'' + x_q''}{2}$

Примечание. x_0 и x_2 — индуктивные сопротивления нулевой и обратной последовательности.

Примерные значения параметров синхронных двигателей приведены в табл. П8.

Таблица П8. **Типичные параметры синхронных двигателей, отн. ед., и постоянные времени, с**

Параметр	В неявнополюсных турбодвигателях	В явнополюсных двигателях	Параметр	В неявнополюсных турбодвигателях	В явнополюсных двигателях
x_d''	0,09 / 0,07—0,14	0,24 / 0,13—0,35	x_0	0,045 / 0,01—0,08	0,14 / 0,02—0,2
x'_d	0,13 / 0,12—0,21	0,37 / 0,2—0,45	τ_{d0}	5,0 / 2,8—10,0	2,7 / 1,5—9,5
x_d	1,3 / 0,95—1,9	1,15 / 0,6—1,45	τ_d''	0,035 / 0,02—0,05	0,01 / 0,002—0,05
x_q	1,3 / 0,92—1,9	0,7 / 0,45—1,0	τ_d'	0,45 / 0,3—0,9	0,51 / 0,4—1,4
x_2	x_d''	0,25 / 0,13—0,35			

Примечание. В числителе даны средние значения, в знаменателе — пределы изменений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Голоднов Ю. М., Хоренян А. Х.** Самозапуск электродвигателей. — М.: Энергия, 1974. — 144 с.
2. **Сыромятников И. А.** Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 240 с.
3. **Гольдманн Д., Солоненкин А. А.** Несинхронное повторное включение мощных асинхронных двигателей. — Изв. вузов. Сер. Энергетика, 1981, № 6, с. 8—12.
4. **Skierski J., Wawszczac A.** Wybieg grupowy silników potreb własnych bloku energetycznego w czasie działania SZR. — Energetyka, 1976, 30, № 4, p. 114—117.
5. **Исследование** динамических характеристик группового синхронного выбега/ С. И. Гамазин, В. Н. Серебров, Ю. М. Голоднов и др.— Электричество, 1977, № 2, с. 28—32.
6. **Линдорф Л. С.** Повышение надежности работы синхронных двигателей/ Информационные материалы ВНИИЭ, № 50. — М.: Госэнергоиздат, 1960. — 120 с.
7. **Хачатуров А. А.** Несинхронные включения и ресинхронизация в энергосистемах. — М.: Энергия, 1977. — 176 с.
8. **Слодарж М. И.** Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей. — М.: Энергия, 1977. — 216 с.
9. **Схема** самозапуска электродвигателей с фазным ротором/ В. П. Кайгородов, Н. В. Нестеров, В. Е. Поляков и др. — Промышленная энергетика, 1975, № 8, с. 33—35.
10. **Ващенко А. П., Королев А. А.** Расчет динамических режимов в электроприводах с асинхронным двигателем. — Инструктивные указания по проектированию электротехнических промышленных установок, 1981, № 1, с. 21—24.
11. **Sterik O.** Maximale Zuschaltleistungen von Asynchronmoteren mit Kurzschlußlaufern in Kraftwerken. — Elecktrotechnische Zeitschrift, 1976, № 2, S. 108—113.
12. **Мамиконянц Л. Г.** Токи и моменты синхронных и асинхронных машин при изменении скорости их вращения. — Электричество, 1958, № 8, с. 54—64.
13. **Копылов И. П., Мамедов Ф. А., Васильева Л. Н.** Электромеханические переходные процессы при асинхронном пуске синхронного двигателя. — Электротехника, 1977, № 1, с. 6—8.
14. **Миллер Г. Р.** Автоматизация в системах электроснабжения промышленных предприятий. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1961. — 176 с.
15. **Поведение** электродвигателей циркуляционных насосов с тяжелыми условиями пуска/ Н. Я. Храмов, И. П. Лескив, Я. Д. Ружевич и др. — Электрические станции, 1978, № 4, с. 42—45.
16. **Исследование** самозапуска синхронных приводов поршневых компрессоров/ В. И. Старостин, А. Н. Котов, В. В. Голов и др. — Промышленная энергетика, 1978, № 5, с. 36—38.

17. **Малеко В. А., Халилулина И. А.** Минимально допустимая величина перерыва электроснабжения. — Инструктивные указания по проектированию промышленных электротехнических установок, 1975, № 2, с. 3—6.

18. **Голоднов Ю. М.** Повышение надежности электроснабжения предприятий химической промышленности/ Общеотраслевые вопросы развития химической промышленности. — М.: НИИТЭХИМ, 1979, вып. 1 (151). — 35 с.

19. **Сборник** директивных материалов по эксплуатации энергосистем (электротехническая часть). — М.: Энергоиздат, 1981. — 632 с.

20. **Храмов Н. Я., Солонарь Е. А., Ружевич М. Д.** О самозапуске двигателей с. н. блоков 300 МВт. — Электрические станции, 1977, № 3, с. 23—25.

21. **Перевод** питания на пускорезервный трансформатор при системных авариях и повреждениях в технологической части АЭС/ А. П. Еперин, С. Ф. Макеев, Г. В. Меркурьев и др. — Электрические станции, 1978, № 9, с. 9—15.

22. **Adverill E. L.** Fast transfer test of power station auxilares. — IEEE Trans. Power Apparats and Systems, 1977, vol. 96, № 3, p. 1004—1008.

23. **А. с. 714602 (СССР).** Устройство для возбуждения синхронного двигателя/ Ю. И. Гольмаков. Опубл. в Б. И., 1980, № 5.

24. **Мамаев В. Ф.** К вопросу возбуждения синхронных машин. — Промышленная энергетика, 1983, № 7, с. 36—38.

25. **Рогов Л. Д., Файбисович В. А.** Повышение надежности электроснабжения предприятий с непрерывным циклом. — Промышленная энергетика, 1976, № 12, с. 32—34.

26. **Баласанян В. С.** Схема управления выключателем синхронного двигателя 6—10 кВ. — Промышленная энергетика, 1981, № 7, с. 26—27.

27. **Шаин А. Д., Ибрагимов И. Г., Менакер Б. Я.** Опыт разработки и внедрения устройств АПВ асинхронных двигателей напряжением до 1000 В. — Промышленная энергетика, 1978, № 1, с. 12—14.

28. **Haselier P., Zimmerman W.** Wiederanlauf von Asinchronmotoren nach Netztehlern — Einfluß auf die Netzgestaltung. — Fachber. Huttenprax. — Metallweiterverarbeit, 1981, 19, № 4, S. 291—294.

29. **Барзам А. Б.** Быстродействующая защита в сетях 6—10 кВ промышленных предприятий. — Промышленная энергетика, 1980, № 9, с. 26—29.

30. **Бороденко В. А., Поляков В. Е.** О выборе принципа действия пусковых органов АВР. — Промышленная энергетика, 1981, № 5, с. 34—37.

31. **Watters C. V.** A simplified procedure for determining the auxiliary bus voltage and angle during — bus transfer. — IEEE Trans. Power Apparats and Systems, 1981, vol. 100, № 6, p. 3066—3074.

32. **Лютер Р. А.** Моменты вращения синхронной машины в асинхронном режиме. — Вестник электропромышленности, 1948, № 10, с. 1—11.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3

Глава первая. **Общая характеристика самозапуска** . . . 5

1. Применение самозапуска 5
2. Основные процессы, происходящие при самозапуске . . 8

Глава вторая. **Выбег электродвигателей** 11

3. Свободный выбег различных механизмов 11
4. Электродвижущая сила асинхронного двигателя при свободном выбеге 15
5. Электродвижущая сила синхронного двигателя с глухоподключенным возбудителем при свободном выбеге . . 17
6. Электродвижущая сила синхронного двигателя с различными системами возбуждения при свободном выбеге . . 24
7. Групповой выбег и выбег при подпитке короткого замыкания 32

Глава третья. **Ток включения при самозапуске электродвигателей** 34

8. Допустимый ток включения 34
9. Ток включения при одиночном самозапуске синхронных двигателей 37
10. Ток включения при наличии посторонней нагрузки и в случае группового самозапуска 42

Глава четвертая. **Разгон электродвигателей при самозапуске** 46

11. Определение напряжения при самозапуске 46
12. Разгон асинхронных двигателей при самозапуске . . 52
13. Разгон синхронных двигателей до подсинхронной угловой скорости 58
14. Определение успешности ресинхронизации синхронных двигателей 66
15. Способы ресинхронизации синхронных двигателей . . 71

Глава пятая. **Обеспечение самозапуска различных двигателей и механизмов** 75

16. Самозапуск различных механизмов 75
17. Самозапуск механизмов собственных нужд электростанций 80
18. Определение возможности и способа самозапуска двигателей, находящихся в эксплуатации 85

19. Схемы для обеспечения самозапуска синхронных двигателей 87
20. Схемы для обеспечения самозапуска асинхронных двигателей 96

Глава шестая. **Влияние самозапуска на систему электроснабжения** 101

21. Требования к схемам электроснабжения 101
22. Влияние самозапуска на релейную защиту и автоматику 107
23. Схемы автоматического включения резервного питания 112
24. Определение мощности неотключаемых электродвигателей по условиям самозапуска 115
25. Расчет параметров устройства АВР секции собственных нужд электростанций 117

Приложения 121
Список литературы 133

ЮРИЙ МИХАЙЛОВИЧ ГОЛОДНОВ

Самозапуск электродвигателей

Редактор **В. Б. Куинджи**
Редактор издательства **Н. В. Ольшанская**
Обложка художника **Е. Н. Волкова**
Художественный редактор **В. А. Гозак-Хозак**
Технический редактор **О. Д. Кузнецова**
Корректор **Н. А. Смирнова**
ИБ № 259

Сдано в набор 23.11.84 Подписано в печать 22.02.85 Т-06659
Формат 84 X 108 1/32 Бумага типографская № 2 Гарнитура литературная
Печать высокая Усл. печ. л. 7,14 Усл. кр.-отт. 7,35 Уч.-изд. л. 8,02
Тираж 13000 экз. Заказ 150 Цена 40 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО «Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова» Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, 113054, Москва, Валовая, 28