

обслуживания. Этим требованиям наиболее полно отвечает привод переменного тока с АД и микропроцессорной СУ. Поэтому часто основным тендерным условием является наличие на троллейбусе привода переменного тока. Россия пока ориентируется на более дешевые модели с реостатно-контакторным приводом. Но и в России, и в Беларуси наметились тенденции развития более экономичных систем тягового привода, соответствующие европейским требованиям.

## ВЫВОД

Устойчивая тенденция – применение электроприводов переменного тока с АД, которые, хотя и являются дорогостоящими, но в целом более экономичны за счет низких эксплуатационных расходов и потребления энергии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Б е л о р у с с к и й троллейбус: Концепция создания. – Мн., 1993.
2. Б о г д а н Н. В., А т а м а н о в Ю. Е., С а ф о н о в А. И. Троллейбус: Теория, конструирование, расчет. – Мн.: Ураджай, 1999.
3. Т е о р и я и расчет тягового привода электромобилей / Под ред. И. С. Ефремова. – М.: Высш. шк., 1984.

Представлена кафедрой  
электропривода и автоматизации  
промышленных установок  
и технологических комплексов

Поступила 3.06.2002

УДК 621.313.333

## **БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ САМОЗАПУСК СИНХРОННОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ**

**Канд. техн. наук, доц. КУРГАНОВ В. В.,  
инж. КРЫШНЕВ Ю. В.**

*Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»*

Работоспособность технологических линий многих промышленных объектов напрямую связана с обеспечением их бесперебойного электрообеспечения при различных видах коротких замыканий и ошибочных отключений в питающих сетях. Это, к примеру, технологические комплексы химических и нефтехимических заводов, предприятия добычи и транспорта нефти, сетевые насосы городских котельных, компрессорные станции промышленных предприятий и др. Распространенная причина срыва ответственных технологических процессов – нарушение динамической устойчивости мощных электродвигателей напряжением выше 1 кВ.

Одним из способов обеспечения бесперебойного функционирования технологических линий является самозапуск электродвигателей – восстановление нормальной работы электропривода с сохранением работоспособности технологической линии без вмешательства персонала после кратковременного перерыва электроснабжения или глубокого провала напряжения. Самозапуск считается обеспеченным, если после восстановления напряжения агрегат разогнался до номинальной частоты вращения и продолжает работать с нормальной производительностью приводимого механизма и загрузкой электродвигателя без превышения допустимой температуры его обмоток [3].

Если мощность системы электроснабжения достаточна, в одновременном самозапуске могут участвовать те электродвигатели, которые без предварительной разгрузки способны втянуться в синхронизм. Если же ограниченная мощность системы электроснабжения этого не допускает, то предусматриваются несколько ступеней самозапуска, т. е. поочередный самозапуск нескольких подгрупп двигателей [2, 3, 6]. Указанный алгоритм самозапуска может потребоваться, когда общее время провала напряжения и бестоковой паузы превысит  $0,5 \dots 0,6$  с, т. е. когда двигатели снизят частоту вращения настолько, что потребляемые ими в процессе самозапуска токи значительно возрастут и уменьшат восстановившееся напряжение до значения, при котором групповой самозапуск станет невозможным. Во избежание этого нежелательного явления в схемы релейной защиты и автоматики вводится защита минимального напряжения, отключающая неотчетственные механизмы, чтобы уровень остаточного напряжения на шинах питания электродвигателей удовлетворял требованиям самозапуска ответственных механизмов.

Обеспечение самозапуска высоковольтной электродвигательной нагрузки требует комплексного решения вопросов, связанных с работой электродвигателей и их систем управления, конфигурацией электрической сети, а также с режимами работы приводимых механизмов. При этом задача усложняется, если в состав узла нагрузки входит один или несколько синхронных двигателей (СД). Наиболее распространенный способ самозапуска мощных синхронных двигателей предусматривает отключение потерявшей питание секции шин, гашение магнитного поля СД до величины  $(0,3 \dots 0,4)U_{ном}$ , а затем включение СД на резервный источник питания с последующей ресинхронизацией при полной загрузке агрегата. Этот способ недостаточно эффективен и не всегда приемлем по условиям технологии производства из-за существенного снижения угловой частоты вращения двигателей, необходимости согласования уставок технологической и системной автоматики, а также интенсивного износа оборудования на этапе разгона двигателей.

Нагрузка большинства технологических установок имеет переменный характер в зависимости от числа и типа одновременно работающих электродвигателей с учетом изменения загрузки каждого из них. Поэтому использовать способы АПВ и АВР без контроля угла включения синхронных двигателей недопустимо, так как могут произойти включение их в проти-

вофазу и последующее повреждение. Наиболее эффективным способом самозапуска СД является быстродействующее АВР без снятия возбуждения двигателя и с сохранением его динамической устойчивости. Типовых устройств, реализующих данный способ, в настоящее время не существует, поскольку применение быстродействующего АВР на конкретном предприятии требует решения научно-технических задач, связанных с разработкой специальных пусковых и блокирующих устройств, адаптированных к системе электроснабжения предприятия и ее противоаварийной автоматике.

Все это свидетельствует об актуальности разработки устройства быстродействующего самозапуска электродвигателей узла промышленной нагрузки, т. е. устройства, адаптирующегося к степени загруженности и инерционным свойствам системы эквивалентный двигатель–эквивалентный приводной механизм.

При нарушении связи СД с питающей сетью (неоперативное отключение вводного выключателя либо короткое замыкание со стороны питающей линии) происходит выбег СД – плавное снижение угловой скорости по закону, зависящему от момента инерции двигателя и привода, от загрузки привода и удаленности места повреждения питающей линии. В том случае, если к общим шинам, потерявшим питание, подключены несколько синхронных двигателей, как правило, происходит так называемый групповой выбег электродвигателей, и происходит он в том случае, если электромагнитный момент каждого двигателя группы, обусловленный обменом электромагнитной мощностью между ними, достаточен для поддержания синхронной частоты выбега [2, 3, 6, 7]. На общих шинах имеется напряжение, частота которого уменьшается по мере уменьшения угловой скорости вращения двигателей. Если при этом сопротивление сети, соединяющей двигатели, невелико (между двигателями нет реакторов и трансформаторов), то происходит синхронный выбег всех агрегатов вплоть до момента времени, когда амплитуда напряжения снижается до  $(0,3...0,4)U_{ном}$  [2, 3, 6]. На данной промежуток времени можно рассматривать группу выбегающих двигателей как один эквивалентный синхронный двигатель (ЭСД) с обобщенными динамическими параметрами. По истечении указанного времени выбег протекает как индивидуальный для каждого двигателя.

Существует ряд вариантов группового выбега. Наиболее простой из них – выбег одинаковых двигателей с одинаковыми механизмами: в этом случае групповой выбег протекает так же, как и при индивидуальном выбеге каждого агрегата. Несколько сложнее групповой выбег  $n$  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 выбег ЭСД описывается эквивалентными значениями коэффициента загрузки  $k_{з,э}$  и электромеханической постоянной времени  $\tau_э$ :

$$\left. \begin{aligned} k_{3.3} &= \frac{\sum_{i=1}^n k_{3i} P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}; \\ \tau_3 &= \frac{\sum_{i=1}^n \tau_{ji} P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $k_{3i}$  – коэффициент загрузки  $i$ -го двигателя из группы  $n$  двигателей;  $P_i$  – номинальная мощность  $i$ -го двигателя из той же группы;  $\tau_{ji}$  – эквивалентная электромеханическая постоянная времени  $i$ -го двигателя из той же группы.

В том случае, если группа выбегающих двигателей состоит из механизмов с различными механическими характеристиками, но значительно преобладают (по установленной мощности) механизмы с каким-то одним ее видом (например, с вентиляторным моментом сопротивления), можно принять допущение, что выбегает ЭСД с механизмом преобладающего типа (в данном случае вентиляторного).

Следует отметить, что при нарушениях внешнего электроснабжения амплитуда напряжения на секции шин, к которым подключен ЭСД, длительное время может изменяться незначительно, причем не обязательно в сторону уменьшения. В случае, когда по каким-либо причинам произошло отключение питающей линии, амплитуда напряжения на общих выводах ЭСД за счет действия устройств форсировки возбуждения в первый момент времени может даже увеличиться. В связи с этим изменение угловой скорости вращения эквивалентного СД, а следовательно, и частоты ЭДС на потерявшей питание секции шин можно считать наиболее информативным признаком потери питания.

Групповой выбег синхронной двигательной нагрузки описывается системой дифференциальных уравнений электромеханических переходных процессов [1, 2]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\theta_i}{dt} &= 2\pi f_0 s_i; \\ \tau_{ji} \frac{ds_i}{dt} &= M_{\text{мех}i} - M_{эi}; \\ \frac{dE_{qi}''}{dt} &= E_{Ti}; \\ T_{di}' T_{di}'' \frac{dE_{Ti}'}{dt} + (T_{di}' + T_{di}'') E_{Ti}' &= -E_{qi}'' + (T_{di}' + T_{di}'') \frac{x_{di}' - x_{di}''}{x_{di}'} \frac{dU_{qi}}{dt} + \\ &+ U_{qi} \frac{x_{di} - x_{di}''}{x_{di}'} + \frac{x_{di}''}{x_{di}'} E_{q\text{ном}i}^* \omega_i \left( U_{fi} + T_{\sigma di} \frac{dU_{fi}}{dt} \right); \\ T_{\lambda qi}' \frac{dE_{di}''}{dt} + E_{di}'' &= -U_{di} \frac{x_{qi} - x_{qi}''}{x_{qi}}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где

$$M_{3i} = \frac{E''_{qi} U_{di}}{x_{di}} + \frac{E''_{di} U_{qi}}{x_{qi}} + U_{di} U_{qi} \left( \frac{1}{x_{qi}} - \frac{1}{x_{di}} \right);$$

$$M_{\text{мех}i} = M_{\text{тр}i} + (k_{3i} - M_{\text{тр}i}) \omega_i^{\gamma_i};$$

$\theta_i$  – угол между вектором ЭДС электрической системы и поперечной осью ротора  $i$ -го СД;  $s_i$  – скольжение  $i$ -го СД;  $\tau_{ji}$  – электромеханическая постоянная времени  $i$ -го агрегата «двигатель–механизм»;  $E''_{qi}$ ,  $E''_{di}$  – составляющие сверхпереходной ЭДС по поперечной и продольной осям ротора  $i$ -го СД;  $E'_{\tau i}$  – первая производная по времени составляющей  $E''_{qi}$ ;  $E^*_{\text{qном}i}$  – эквивалентная ЭДС  $i$ -го СД, о. е.;  $T'_{di}$ ,  $T''_{di}$  – постоянные времени переходного и сверхпереходного процессов по продольной оси ротора  $i$ -го СД;  $T_{\sigma 1 di}$  – постоянная времени рассеяния эквивалентного демпферного контура по продольной оси ротора  $i$ -го СД;  $T'_{1qi}$  – то же демпферной обмотки по поперечной оси ротора  $i$ -го СД при короткозамкнутой статорной обмотке;  $U_{qi}$ ,  $U_{di}$  – составляющие напряжения на выводах  $i$ -го СД по поперечной и продольной оси ротора;  $x_{di}$ ,  $x'_{di}$ ,  $x''_{di}$  – синхронное, переходное и сверхпереходное сопротивления по продольной оси ротора  $i$ -го СД;  $x_{qi}$ ,  $x''_{qi}$  – синхронное и сверхпереходное сопротивления по поперечной оси ротора  $i$ -го СД;  $U_{ji}$  – напряжение на обмотке возбуждения  $i$ -го СД;  $M_{\text{тр}i}$  – начальный момент сопротивления  $i$ -го механизма, обычно определяемый силами трения;  $\omega_i$  – частота вращения ротора  $i$ -го СД, о. е.;  $\gamma_i$  – степень зависимости момента сопротивления  $i$ -го механизма от частоты вращения.

Принимая за базовые величины номинальный момент на валу  $M_{\text{ном}}$  и синхронную угловую скорость двигателя  $\omega_0$ , можно записать дифференциальное уравнение, являющееся исходным для определения угловой скорости  $\omega$  ЭСД в условиях свободного выбега:

$$-m_{\text{мех}} = -m_{\text{мех}} - (k_{3.э} - m_{\text{тр}}) \omega^\gamma = \tau_3 \frac{d\omega}{dt}, \quad (3)$$

где  $m_{\text{мех}}$  – эквивалентный начальный момент сопротивления обобщенного механизма;  $k_{3.э}$  – эквивалентный коэффициент загрузки ЭСД при синхронной угловой скорости.

Решая (3) для разных  $\gamma$ , можно найти закон изменения угловой скорости ЭСД  $\omega(t)$  для того или иного преобладающего типа приводимых механизмов. Затем, зная закон изменения угловой скорости ЭСД, можно определить закон изменения угла  $\delta$  между векторами напряжения сети  $U_c$  и ЭДС группы выбегающих двигателей  $E_{\text{дв}}$ :

$$\delta(t) = \omega_0 t - \int \omega(t) dt + \delta_0, \quad (4)$$

где  $\delta_0$  – начальный угол рассогласования векторов  $U_c$  и  $E_{\text{дв}}$ .

Выражения, полученные для  $\omega(t)$  и  $\delta(t)$  при условии  $\delta_0 = 0$ , приведены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость угловой скорости и угла выбега ЭСД от времени для разных типов приводимых механизмов

Тип приводимого механизма	Практические примеры	Закон изменения угловой скорости $\omega(t)$ , рад/с	Закон изменения угла выбега $\delta(t)$ , рад
Постоянный момент сопротивления ( $\gamma = 0$ )	Транспортеры, дробилки, шаровые мельницы, поршневые компрессоры	$\omega(t) = \omega_0 \left( 1 - \frac{k_{3.3}}{\tau_3} t \right)$	$\delta(t) = \omega_0 \frac{k_{3.3}}{2\tau_3} t^2$
Момент сопротивления, пропорциональный угловой скорости ( $\gamma = 1$ )	Генератор постоянного тока, работающий на постоянное сопротивление	$\omega(t) = \omega_0 \left( \left( 1 + \frac{m'_{тр}}{1 - m'_{тр}} \right) e^{-\frac{t}{\tau_3}} - \frac{m'_{тр}}{1 - m'_{тр}} \right)$	$\delta(t) = \frac{\omega_0}{1 - m'_{тр}} \left( t + \tau_3 \left( e^{-\frac{t}{\tau_3}} - 1 \right) \right)$
Момент сопротивления, пропорциональный квадрату угловой скорости ( $\gamma = 2$ )	Центробежные насосы, турбокомпрессоры, газодувки, вентиляторы, дымососы	$\omega(t) = \omega_0 \frac{\left( 1 - \sqrt{\frac{m'_{тр}}{1 - m'_{тр}}} \operatorname{tg} \frac{t}{\tau_3} \right)}{\left( 1 + \sqrt{\frac{1 - m'_{тр}}{m'_{тр}}} \operatorname{tg} \frac{t}{\tau_3} \right)}$	$\delta(t) = \omega_0 t - \omega_0 \tau_3 \sqrt{\frac{m'_{тр}}{1 - m'_{тр}}} \times \ln \left( \cos \frac{t}{\tau_3} + \sqrt{\frac{1 - m'_{тр}}{m'_{тр}}} \sin \frac{t}{\tau_3} \right)$

В формулах табл. 1 использованы следующие условные обозначения:

$m'_{тр} = \frac{m_{тр}}{k_{3.3}}$  – относительный начальный момент сопротивления обобщенного механизма;

$\tau_3 = \frac{\tau_3}{k_{3.3}(1 - m'_{тр})}$  – эквивалентная электромеханическая постоянная времени агрегата

с  $\gamma = 1$ ;  $\tau_3^* = \frac{\tau_3}{k_{3.3} \sqrt{m'_{тр}}(1 - m'_{тр})}$  – то же с  $\gamma = 2$ .

Для удобства анализа динамики выбега ЭСД при «плавающих» составе нагрузки и загрузке приводимых механизмов представляет интерес угловое ускорение выбега, определяемое как производная угловой скорости ЭСД на этапе выбега:

$$\varepsilon(t) = \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (5)$$

Угловые ускорения выбега ЭСД, определенные для разных типов приводимых механизмов, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость углового ускорения ЭСД от времени для разных типов приводимых механизмов

Тип приводимого механизма	Закон изменения модуля углового ускорения $\varepsilon(t)$ , рад/с <sup>2</sup>	Начальное угловое ускорение $\varepsilon_0$ , рад/с <sup>2</sup>
$\gamma = 0$	$\varepsilon(t) = \omega_0 \frac{k_{з.э}}{\tau_3}$	$\varepsilon_0 = \omega_0 \frac{k_{з.э}}{\tau_3}$
$\gamma = 1$	$\varepsilon(t) = \omega_0 \frac{k_{з.э}}{\tau_3} e^{-\frac{t}{\tau_3}}$	$\varepsilon_0 = \omega_0 \frac{k_{з.э}}{\tau_3}$
$\gamma = 2$	$\varepsilon(t) = \omega_0 \left( \frac{1 + \frac{m'_{тр}}{1 - m'_{тр}} \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{t}{\tau_3}}{\tau_3}}{\sqrt{1 - m'_{тр}} \left( \sqrt{\frac{m'_{тр}}{1 - m'_{тр}} + \operatorname{tg} \frac{t}{\tau_3}} \right)^2} \right)$	$\varepsilon_0 = \omega_0 \frac{k_{з.э}}{\tau_3}$

Как видно из таблицы, в начальный момент выбега ЭСД ( $t \rightarrow 0$ ) его угловое ускорение  $\varepsilon_0$  независимо от характера обобщенного приводимого механизма определяется отношением эквивалентных коэффициента загрузки и электромеханической постоянной времени.

Рассмотрим процесс самозапуска синхронной двигательной нагрузки, осуществляемый по алгоритму БАВР без гашения магнитного поля СД, с точки зрения безопасности для самих двигателей. Наиболее тяжелым по условию возможного тока включения является случай, когда на секции шин присутствует только один СД. Опасный режим по току включения может возникнуть также и в том случае, когда происходит одновременный самозапуск нескольких СД, один из которых значительно превосходит остальные по номинальной мощности.

При обеспечении самозапуска под допустимыми величинами угла включения СД  $\delta_{\text{вкл. доп}}$  понимаются такие значения угла  $\delta$ , при которых сверхпереходной ток включения, а также электромагнитный момент вращения не вызовут разрушения изоляции статорной обмотки СД и механических повреждений вала СД.

В соответствии с инструктивными материалами, допустимый ток включения  $I_{\text{вкл. доп}}$  СД мощностью до 2000 кВт составляет  $1,7I_{\text{пуск}}$ , а для двигателей большей мощности регламентируется заводами-изготовителями [3].

Для мощных двигателей, не допускающих прямой пуск от полного напряжения сети,  $I_{\text{вкл. доп}}$  принимается равным  $I_{\text{пуск}}$  [6].

Ток включения синхронного двигателя (рис. 1) в зависимости от угла  $\delta$  рассчитывается по выражению

$$I_{\text{вкл}} = \frac{\sqrt{U_c^2 + E_{\text{дв}}^2 - 2U_c E_{\text{дв}} \cos \delta}}{x_c + x_d(s)}, \quad (6)$$

где  $U_c$  и  $E_{\text{дв}}$  – соответственно фазные напряжения сети и ЭДС эквивалентного СД в начальный момент выбега (при БАВР принимается  $U_c = E_{\text{дв}}$ );  $x_c$  – сопротивление питающей системы, включающее сопротивление силового трансформатора и кабельных линий;  $x_d(s)$  – то же ЭСД, зависящее от скольжения.

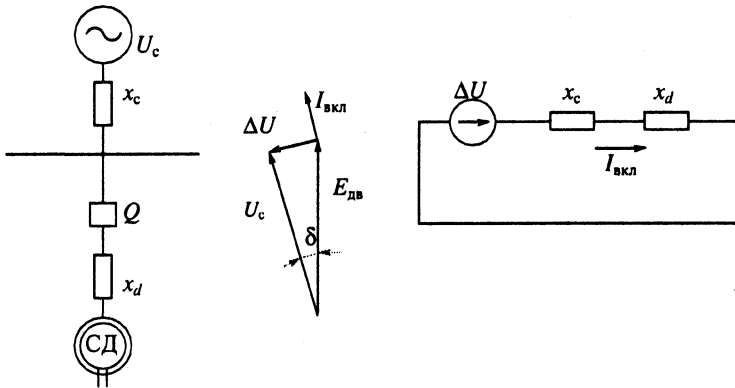


Рис. 1. Эквивалентная схема, поясняющая величину тока включения эквивалентного синхронного двигателя

При анализе допустимого тока включения в режиме самозапуска представляет интерес рассмотрение наиболее тяжелых внешних условий: на шинах питания присутствует только один СД; сопротивление системы минимально ( $x_c \ll x_d$ );  $U_c$  и  $E_{\text{дв}}$  имеют максимально возможные уровни, равные около  $1,05U_{\text{ном}}$ ; значение  $E_{\text{дв}}$  продолжительное время поддерживается на уровне  $1,05U_{\text{ном}}$  за счет действия форсировки возбуждения. В этом случае (6) запишется в виде

$$I_{\text{вкл}}^* = 1,05 \frac{1}{x_d(s)} \sqrt{2(1 - \cos \delta)} = 1,05 I^*(s) I^*(\delta), \quad (7)$$

где  $I_{\text{вкл}}^*$  – ток включения СД, о. е.;  $I^*(s)$  – кратность тока включения СД в зависимости от скольжения;  $I^*(\delta)$  – зависимость тока включения от угла выбега СД, о. е.



Видно, что зависимость  $I^*(\delta)$  является периодической функцией, достигающей максимума, равного 2, в моменты противофазы векторов  $U_c$  и  $E_{дв}$ . Что касается зависимости  $I^*(s)$ , на паспортах двигателей и в [6, 7] приводятся только таблицы кратностей пусковых токов ( $I_{пуск}/I_{ном}$ ) для конкретного ряда скольжений. Анализ показал, что для всех двигателей серии СТД номинальной мощностью 1000...8000 кВт усредненные табличные значения  $I_{пуск}/I_{ном}$  могут быть со среднеквадратической погрешностью  $0,257I_{ном}$  описаны аналитической формулой

$$I^*(s) = 7,173\sqrt{s} - 0,065 \ln s. \quad (8)$$

Графики изменения величин  $I^*(\delta)$  и  $I^*(s)$  изображены на рис. 2.

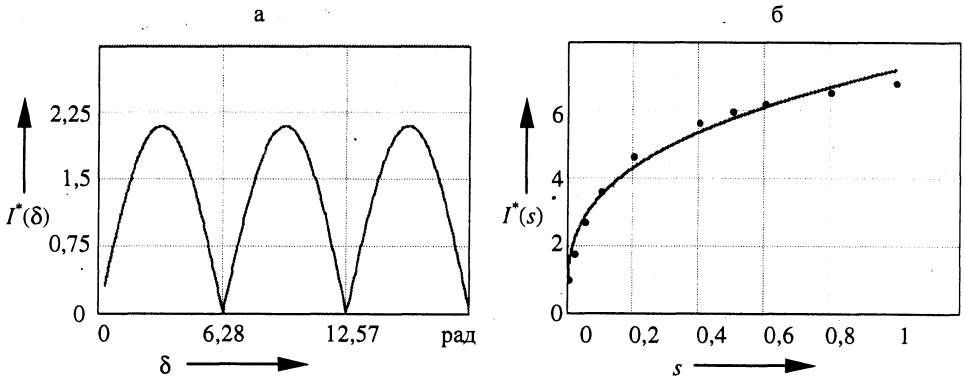


Рис. 2. Графики изменения величин: а –  $I^*(\delta)$ ; б –  $I^*(s)$ ;  $\dots$  – усредненные табличные данные; — — аналитическая зависимость

Для того чтобы найти закон изменения тока включения от времени вы бега  $I^*_{вкл}(t)$ , необходимо выполнить подстановку в выражение  $I^*(\delta)$  значения угла  $\delta(t)$  из табл. 1 в соответствии с типом приводимого механизма ( $\gamma$ ), а в выражение  $I^*(s)$  – значения скольжения, определяемого как:

$$s(t) = 1 - \frac{\omega(t)}{\omega_0},$$

причем  $\omega(t)$  также выбирается из табл. 1 в зависимости от  $\gamma$ .

К примеру, для самого простого случая  $\gamma = 0$  получаем

$$I^*_{вкл}(t) = 1,05 \left( 7,173 \sqrt{k_3 \frac{t}{\tau_j}} - 0,065 \ln k_3 \frac{t}{\tau_j} \right) \sqrt{2 \left( 1 - \cos \omega_0 k_3 \frac{t^2}{2\tau_j} \right)} =$$

$$= 1,05 \left( 7,173 \sqrt{\frac{\epsilon_0 t}{\omega_0}} - 0,065 \ln \frac{\epsilon_0 t}{\omega_0} \right) \sqrt{2 \left( 1 - \cos \frac{\epsilon_0}{2} t^2 \right)}. \quad (9)$$

Для оценки допустимой величины тока включения от времени при самозапуске целесообразно представлять  $I_{\text{вкл}}$  в единицах пускового тока СД (средний пусковой ток двигателей серии СТД со среднеквадратической погрешностью  $0,835 I_{\text{ном}}$  может быть принят равным  $6,785 I_{\text{ном}}$ )

$$\frac{I_{\text{вкл}}}{I_{\text{пуск}}}(t) = \frac{1,05}{6,785} \left( 7,173 \sqrt{\frac{\epsilon_0 t}{\omega_0}} - 0,065 \ln \frac{\epsilon_0 t}{\omega_0} \right) \sqrt{2 \left( 1 - \cos \frac{\epsilon_0}{2} t^2 \right)}. \quad (10)$$

На рис. 3 изображены характеристики  $I_{\text{вкл}}/I_{\text{пуск}}(t)$  для разных значений начального углового ускорения выбега СД  $\epsilon_0$ . Из представленных графиков видно, что в течение первого проворота ротора СД относительно вектора напряжения сети (т. е. в промежутке времени, когда следует осуществить быстродействующее АВР) максимальный ток включения СД составляет от  $0,884 I_{\text{пуск}}$  (при  $\epsilon_0 = 40 \text{ рад/с}^2$ ) до  $1,246 I_{\text{пуск}}$  (при  $\epsilon_0 = 400 \text{ рад/с}^2$ ).

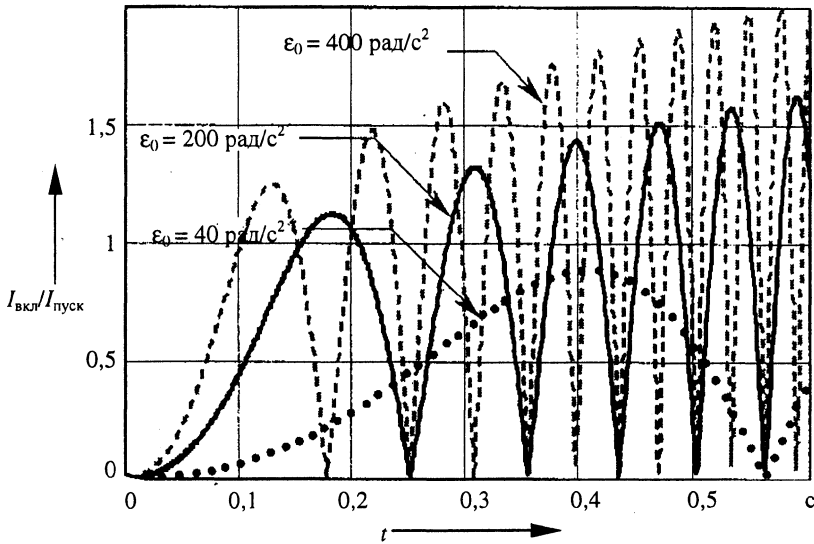


Рис. 3. График изменения величины тока включения СД  $I_{\text{вкл}}/I_{\text{пуск}}$  от времени выбега

Решение (10) численными методами позволяет определить величину углового ускорения  $\epsilon_{0 \text{ крит}} = 93,4 \text{ рад/с}^2$ , при выбеге с которым максимальный ток включения СД достигает значения  $I_{\text{пуск}}$ , опасного для изоляции его обмоток. Очевидно, что чем существеннее  $\epsilon_0$  превышает  $\epsilon_{0 \text{ крит}}$ , тем продолжительнее промежуток времени в течение первого проворота ротора СД, когда переключение на резервный источник питания недопустимо. Расчеты показали, что для выбега с  $\epsilon_0 = 100 \text{ рад/с}^2$  недопустимо включение резерва сети по условию величины тока при углах выбега  $\delta = 174 \dots 206^\circ$ , для выбега с  $\epsilon_0 = 200 \text{ рад/с}^2$  – при  $\delta = 138 \dots 242^\circ$ , для выбега с  $\epsilon_0 = 400 \text{ рад/с}^2$  – при  $\delta = 118 \dots 261^\circ$ .

Условием допустимости несинхронного включения СД по величине электромагнитного момента вращения является соблюдение условия [6]

$$m_{\text{нс}} \leq k_m m_{\text{к.з.м}},$$

где  $m_{\text{нс}}$  – момент вращения при несинхронном включении СД;  $m_{\text{к.з.м}}$  – то же, возникающий в двигателе при трехфазном КЗ на выводах двигателя;  $k_m$  – коэффициент, характеризующий допустимое превышение момента  $m_{\text{нс}}$  над моментом  $m_{\text{к.з.м}}$ .

Для мощных двигателей, не допускающих прямой пуск от полного напряжения сети, принимается  $k_m = 1$ , а для двигателей мощностью менее 2000 кВт, допускающих пуск от полного напряжения сети, можно принять  $k_m = 1,2$ , поскольку такие двигатели имеют значительный запас прочности и рассчитываются на максимальный момент при двухфазном КЗ, который на 30 % больше, чем при трехфазном КЗ [6].

Подставляя расчетные индуктивные сопротивления и постоянные времени реальных СД в аналитическое выражение для определения электромагнитного момента несинхронного включения, приведенное в [3, 6], можно сделать вывод, что максимальное значение момента несинхронного включения  $m_{\text{нс}} > m_{\text{к.з.м}}$  для всех мощных СД возникает внутри диапазона углов включения  $\delta = 105 \dots 135^\circ$ . Таким образом, «запрещенная зона» угла  $\delta$  в течение первого проворота ротора СД по условию момента несинхронного включения –  $105 \dots 135^\circ, 225 \dots 255^\circ$ .

Сопоставляя значения угла выбега  $\delta$ , когда несинхронное включение СД недопустимо по условиям тока включения и момента включения, а также принимая во внимание зависимость максимального тока включения от начального углового ускорения выбега  $\epsilon_0$ , можно сделать вывод, что с целью обеспечения полной безопасности режима самозапуска следует исключить возможность подачи резервного питания на СД в диапазоне углов  $\delta = 105 \dots 261^\circ$  (рис. 4).

В результате разного рода возмущений в энергосистеме на шинах питания СД могут возникать колебания частоты питающего напряжения. Это, в частности, характерно для режима качаний в энергосистеме или режима дефицита (избытка) активной мощности. В этих случаях угловое ускорение вектора напряжения сети определяется постоянной механической инерции  $\tau_{j \text{ г-н}}$  эквивалентного агрегата с моментом инерции, равным сумме моментов инерции генераторов и нагрузки. По опытным данным [8], величина  $\tau_{j \text{ г-н}}$  находится в пределах  $10 \dots 16$  с, следовательно, угловое ускорение вектора  $U_c$  в данном режиме находится в диапазоне  $20 \dots 32 \text{ рад/с}^2$ . В случае же выбега нагруженного СД угловое ускорение вектора ЭДС двигателя  $E_{\text{дв}}$  всегда превышает  $40 \text{ рад/с}^2$ . Этот факт позволяет использовать величину

углового ускорения вектора  $E_{дв}$  как входное воздействие для датчика потери питания (ДПП) ЭСД. Для повышения селективности ДПП ЭСД необходимо реализовывать в комплексном виде: помимо величины  $\epsilon_0$ , воздействующим фактором должно быть направление (величина) активной мощности в узле электродвигательной нагрузки (в нормальном режиме активная мощность передается от линии к шинам, а при выбеге ЭСД на КЗ – от шин в линию).

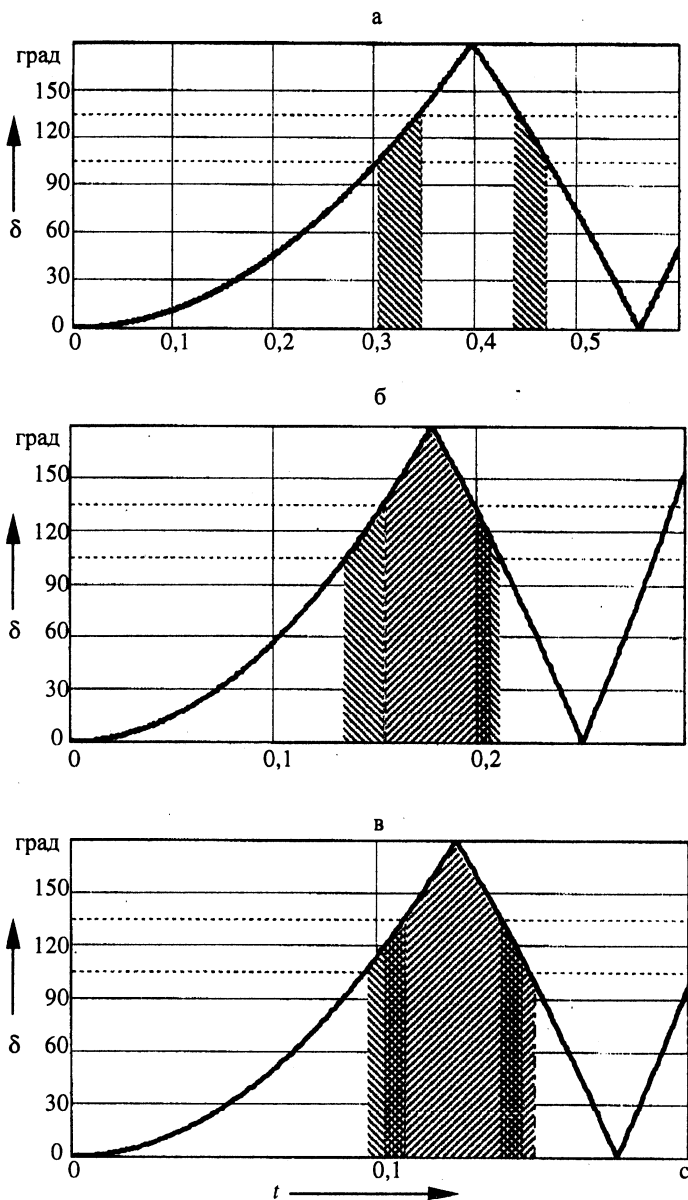


Рис. 4. Угол выбега ЭСД с указанием недопустимых зон несинхронного включения: а –  $\epsilon_0 = 40 \text{ рад/с}^2$ ; б – 200; в –  $400 \text{ рад/с}^2$ ;  $\text{▨}$  – по условию величины тока включения;  $\text{▩}$  – электромагнитного момента

С учетом того, что электронный датчик потери питания ЭСД должен быть подключен к выводам измерительного трансформатора напряжения секции шин – 6/10 кВ, удобно производить измерение величины скорости снижения частоты (ССЧ) ЭДС двигателя –  $\varepsilon_{e0}$ , пропорциональной угловому ускорению выбега  $\varepsilon_0$ :

$$\varepsilon_{e0} = \frac{\varepsilon_0}{2\pi}.$$

Диапазон возможных значений  $\varepsilon_{e0}$  при выбеге ЭСД – 6...65 Гц/с [4]. Величина  $\varepsilon_{e0}$  может быть определена при помощи импульсного метода (по приращением трех смежных полупериодов напряжения  $E_{дв}$ ) или при помощи метода ортогональных составляющих (по трем эквидистантным отсчетам мгновенных значений ортогональных составляющих векторов  $U_c$  и  $E_{дв}$ ) [5].

Формулы для угла выбега  $\delta(t)$ , приведенные в табл. 1, могут быть представлены в параметрической зависимости от величины  $\varepsilon_{e0}$  путем подстановки в них значений постоянных времени:

$$\left. \begin{aligned} \tau_3 &= \frac{f_0 k_{3.3}}{\varepsilon_{e0}}; \\ \tau_3' &= \frac{f_0}{\varepsilon_{e0}(1 - m'_{тр})}; \\ \tau_3'' &= \frac{f_0}{\varepsilon_{e0} \sqrt{m'_{тр}(1 - m'_{тр})}}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Иными словами, измеренное датчиком потери питания СД значение  $\varepsilon_{e0}$  может быть использовано для прогнозирования интервала времени, когда угол выбега  $\delta$  еще не достигнет величины, опасной для обмоток и конструкции СД при самозапуске. Произведенный в п. 3 анализ показал, что переключение на резервный источник питания необходимо производить в моменты времени, когда угол  $\delta$  между векторами  $U_c$  и  $E_{дв}$  равен:

- 1) 0...105° – опережающее АВР (ОАВР);
- 2) 261...465° – синфазное АВР (САВР; угол 360° соответствует синфазной сходимости векторов  $U_c$  и  $E_{дв}$  и минимальному броску тока включения).

Переключение на резервное питание в моменты времени, когда угол выбега достигает значений, больших 620°, трудноосуществимо из-за увеличения асинхронного скольжения ЭСД, уменьшения среднего асинхронного момента двигателей, а также из-за большой скорости изменения угла  $\delta$ .

Электронное устройство, осуществляющее прогнозирование времени включения, должно по величине  $\epsilon_{e0}$ , измеренной датчиком потери питания, в темпе процесса рассчитать располагаемые времена ОАВР и САВР, сравнить их с временем срабатывания используемых коммутационных аппаратов и сформировать сигнал переключения ЭСД на резервный источник питания в случае благоприятного прогноза (сначала проверяется возможность ОАВР, а затем, если значения  $\epsilon_{e0}$  и  $\delta_0$  оказываются большими, ОАВР запрещается и осуществляется САВР). Устройство, работающее по данному принципу, будет обладать свойством адаптации к изменяющимся режимам работы узла промышленной нагрузки с электродвигателями и скоростным характеристикам высоковольтных выключателей.

Принимая в формулах табл. 1 и формулах (11) для угла выбега  $\delta(t)$  значения промышленной частоты  $f_0 = 50$  Гц и относительного начального момента сопротивления  $m'_{тр} = 0,1$ , получаем приближенные формулы для определения угла выбега механизмов различных типов при условии нулевого начального угла выбега (табл. 3).

Таблица 3

**Формулы для определения угла выбега СД,  
представленные в параметрической зависимости от ССЧ**

Тип приво- димого меха- низма	Закон изменения угла выбега $\delta(t)$ , рад	
	точная формула	приближенная формула
$\gamma = 0$	$\delta(t) = \pi \epsilon_{e0} t^2$	$\delta(t) = \pi \epsilon_{e0} t^2$
$\gamma = 1$	$\delta(t) = \frac{2\pi f_0}{1 - m'_{тр}} \left( t + \frac{f_0}{\epsilon_{e0}(1 - m'_{тр})} \left( e^{\frac{\epsilon_{e0} t (1 - m'_{тр})}{f_0}} - 1 \right) \right)$	$\delta(t) = 2\pi \cdot 55,556 \left( t + \frac{55,556}{\epsilon_{e0}} \left( e^{-0,018 \epsilon_{e0} t} - 1 \right) \right)$
$\gamma = 2$	$\delta(t) = 2\pi f_0 t - \frac{2\pi f_0^2}{\epsilon_{e0}(1 - m'_{тр})} \times \ln \left( \frac{\cos \frac{\epsilon_{e0} t \sqrt{m'_{тр}(1 - m'_{тр})}}{f_0} + \sqrt{\frac{1 - m'_{тр}}{m'_{тр}} \sin \frac{\epsilon_{e0} t \sqrt{m'_{тр}(1 - m'_{тр})}}{f_0}}}{\cos 0,006 \epsilon_{e0} t + 3 \sin 0,006 \epsilon_{e0} t} \right)$	$\delta(t) = 2\pi \left( 50t - \frac{2778}{\epsilon_{e0}} \ln \times (\cos 0,006 \epsilon_{e0} t + 3 \sin 0,006 \epsilon_{e0} t) \right)$

Погрешность расчета угла  $\delta(t)$  по приближенным формулам для  $\gamma=1$  и 2 определяется отклонением значений  $m'_{тр}$  и  $f_0$  от принятых (соответственно 0,1 и 50) в реально возможных режимах работы приводимых механизмов и

при отклонениях частоты питающего напряжения от номинальной. Значение  $m'_{тр}$  даже отдельно взятого СД меняется в зависимости от конкретных эксплуатационных условий, а для ЭСД  $m'_{тр}$  может изменяться от 0,05 до 0,5. Анализ показал, что погрешность приближенных формул для  $\delta(t)$ , вносимая изменением  $m'_{тр}$ , незначительна и растет с увеличением значения  $\epsilon_{e0}$ . Максимальная погрешность прогнозирования момента времени САВР возникает при  $\epsilon_{e0} = 65$  Гц/с;  $m'_{тр} = 0,5$  и составляет: для  $\gamma = 1 - 11,24^\circ$ , а для  $\gamma = 2 - 17,86^\circ$ . Максимальная погрешность прогнозирования момента САВР по приближенным формулам для  $\delta(t)$ , вносимая отклонениями промышленной частоты от номинальной в диапазоне 49...50,5 Гц, составляет: для  $\gamma = 1 - 7,32^\circ$ , для  $\gamma = 2 - 7,1^\circ$  (оба значения – при  $\epsilon_{e0} = 6,5$  Гц/с;  $f_0 = 49$  Гц). Принимая во внимание независимость друг от друга источников погрешностей приближенной формулы для угла выбега, можно просуммировать эти погрешности и получить: для  $\gamma = 1 \Delta\delta_{САВР \max} = 18,56^\circ$ ; для  $\gamma = 2 \Delta\delta_{САВР \max} = 24,96^\circ$ .

Таким образом, даже при допущении идеальной точности срабатывания высоковольтных выключателей (вводного и секционного) для компенсации максимально возможной погрешности данного метода БАВР ЭСД необходимо ограничить диапазон допустимых углов включения значениями для:

ОАВР: 0...80°;

САВР: 236...440°.

По причине достаточной сложности алгоритмов работы ДПП и вычисления времени включения ЭСД электронное устройство, осуществляющее адаптивное управление самозапуском электродвигательной нагрузки по угловому ускорению выбега, целесообразно реализовать на базе программируемого микроконтроллера.

## ВЫВОДЫ

1. Эффективным решением проблемы обеспечения самозапуска узла промышленной нагрузки с синхронными двигателями является разработка устройства БАВР, адаптирующегося к степени загруженности и инерционным свойствам ЭСД.

2. Фиксация потери питания узла синхронной двигательной нагрузки, а также расчет располагаемого времени подачи резервного питания на группу выбегающих двигателей по условию допустимого угла включения  $\delta_{вкл. доп}$  могут быть реализованы, исходя из величины скорости снижения частоты  $\epsilon_{e0}$ , измеренной в начале выбега ЭСД.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Быстродействующее АВР для промышленных подстанций с синхронной двигательной нагрузкой / С. И. Гамазин, С. А. Цырук и др. // Промышленная энергетика. – 1990. – № 10. – С. 26–31.

2. Гамазин С. И., Садыкбеков Т. А. Переходные процессы в системах электроснабжения с электродвигательной нагрузкой. – Алма-Ата: Гылым, 1991.
3. Голоднов Ю. М. Самозапуск электродвигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. Курганов В. В., Крышнев Ю. В. Исследование условий обеспечения самозапуска синхронных электродвигателей при быстродействующем АВР // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 2. – С. 40–43.
5. Романюк Ф. А. Определение фазовых сдвигов в микроконтроллерных системах защиты и автоматики электроустановок // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2000. – № 2. – С. 3–6.
6. Слодарж М. И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей. – М.: Энергия, 1977.
7. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
8. Электротехнический справочник: В 3 т. / Гл. ред. И. Н. Орлов. – 7-е изд., испр. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – Т. 3.

Представлена кафедрой  
электроснабжения

Поступила 27.04.2002