

Если $k = 0,5$, то $x_{\omega_{\max}} = \frac{1}{8} = 4 \cdot 10^3$. Таким образом, для хранения величины $x_{\omega_{\max}}$ требуется количество двоичных разрядов $\kappa = 12$. Отсюда рассчитываем $m_{\omega} = k_{OC} = \frac{x_{\omega_{\max}}}{\omega_{\max}} \approx 12,7$. Из выражения (13) находим $N \geq \frac{2\pi}{\omega_{\min} \Delta t_D} = 6,28 : (3,14 \cdot 0,0005) = 4000$, при $N = 4000$ получим $f_0 \geq \frac{N\omega_{\max}}{2\pi} = 2 \cdot 10^5$ Гц.

ВЫВОДЫ

Применение импульсного датчика совместно с микроконтроллером требует согласованного выбора числа разрядов выходной величины, тактовой частоты и точности датчика, определяемой числом импульсов на оборот датчика.

Целесообразность применения способа контроля скорости при $\Delta t = \text{const}$ либо при $\Delta \varphi = \text{const}$ зависит от располагаемого диапазона частот тактовых импульсов в сравнении с возможными частотами импульсов от датчика при требуемых скоростях. Поэтому при высоких скоростях возможно применение первого способа, а при снижении скорости – переход ко второму способу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф а й н ш т е й н, В. Г. Микропроцессорные системы управления тиристорными электроприводами / В. Г. Файнштейн, Э. Г. Файнштейн; под ред. О. В. Слежановского. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 240 с.

Представлена кафедрой электропривода
и автоматизации промышленных установок
и технологических комплексов

Поступила 5.05.2006

УДК 621.313.333

УЧЕТ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБОБЩЕННОГО ПРИВОДА В АЛГОРИТМЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО САМОЗАПУСКА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Канд. техн. наук, доц. КУРГАНОВ В. В., канд. техн. наук КРЫШНЕВ Ю. В.,
канд. техн. наук, доц. **ВЕРИГА Б. А.**

Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого

Согласно статистическим данным в среднем каждый потребитель в смешанных воздушно-кабельных электрических сетях напряжением 6–10 кВ, имеющих устройства автоматического включения резервного питания (АВР) на всех распределительных подстанциях, в год испытывает

25–30 провалов напряжения при глубине провалов не менее 35 %. Во многих случаях это влечет за собой серьезные расстройства технологических процессов и повреждение оборудования на предприятиях химической, нефтехимической, газоперерабатывающей, металлургической промышленности, причем длительность простоя оборудования во много раз превышает длительность самого нарушения электроснабжения. Типовые схемы электроснабжения узлов промышленной нагрузки от двух независимых источников с использованием обычных схем АВР и автоматического повторного включения (АПВ) не обеспечивают надежного питания электроприемников с синхронными двигателями (СД) напряжением 6 (10) кВ. Это связано с тем, что к моменту срабатывания типовой автоматики двигателя выпадают из синхронизма, и для их ресинхронизации требуется специальное управление.

Эффективным способом сохранения в работе механизмов после кратковременных исчезновений или провалов питающего напряжения является быстродействующий самозапуск их электродвигателей [1–3] – автоматическое восстановление нормальной работы электропривода без потери возбуждения СД.

В общем случае самозапуск СД осуществляется в три этапа [4, 5]:

- 1) выбег двигателей при сниженном напряжении или его отсутствии;
- 2) разгон до угловой скорости, близкой к номинальной;
- 3) втягивание в синхронизм (ресинхронизация).

При реализации быстродействующего самозапуска СД отпадает необходимость в обеспечении разгона и ресинхронизации группы СД после гашения их магнитного поля. При этом обеспечивается динамическая либо результирующая устойчивость СД посредством быстродействующего АВР (БАВР) с контролем угла включения. Успешность быстродействующего самозапуска синхронных двигателей определяется временем, за которое выявляется режим потери питания, рассчитывается располагаемое время БАВР и срабатывают коммутационные аппараты.

Выбор характеристических параметров режима потери питания синхронных двигателей. Изменение амплитуды ЭДС синхронных двигателей на этапе выбега после потери питания не может рассматриваться в качестве информативного параметра, характеризующего режим потери питания нагрузки с синхронными двигателями 6 (10) кВ. В частности, ЭДС одиночного СД с вращающимся возбудителем (электромашинным или бесщеточным) при свободном выбеге нелинейно зависит от тока I_v возбуждения СД и угловой скорости ω_v возбудителя при выбеге [4, 6]. Величины же I_v и ω_v на начальном этапе выбега зависят от конструктивных особенностей СД (наличия или отсутствия пусковой обмотки), скорости срабатывания и глубины форсировки возбуждения, а также от типа возбудителя (отдельно стоящий или находящийся на одном валу с СД) [6]. Возможность различных сочетаний перечисленных факторов с учетом особенностей предшествовавшего технологического режима приводного механизма существенно затрудняет аналитическое определение ЭДС синхронного двигателя при выбеге. Для случая статического (тиристорного) возбудителя, функционирование которого зависит от уровня питающего напряжения,

закон изменения ЭДС синхронного двигателя зависит в первую очередь от того, подключен возбудитель к секции шин с синхронным двигателем или к резервной секции шин. С учетом того, что тиристорные возбудители обеспечивают автоматическое гашение поля СД инвертированием, в указанных случаях затухание ЭДС СД происходит с различной скоростью. В более распространенном случае, когда возбудитель получает питание от секции шин с СД, при глубоких провалах напряжения могут произойти срыв инвертирования в возбудителе и затягивание гашения поля на время до 1–2 с [1, 6].

Изменение ЭДС синхронных двигателей при групповом выбеге происходит по еще более сложным законам в зависимости от типа возбудительных устройств, а также вследствие возможного наличия на общих шинах питания, помимо синхронных двигателей, статической нагрузки и асинхронных двигателей. Аналитическое определение ЭДС при групповом выбеге в общем случае представляет значительную сложность и может быть выполнено только для некоторых частных случаев.

При внезапном исчезновении питающего напряжения или его автоматическом отключении защитами ряд электродвигателей, участвующих в групповом выбеге, переходит в генераторный режим. Поэтому в пусковые органы схем АВР синхронных двигателей вводят датчики угла рассогласования векторов напряжений на основной и резервной секциях шин, а также реле частоты и разности частот [6, 7]. Однако необходимо иметь в виду, что датчики, использующие и принцип измерения угловой скорости, и принцип измерения угла выбега, не отличают режим выбега СД от режимов общесистемных возмущений: дефицита активной мощности и качаний в энергосистеме, вследствие чего возможно неселективное отключение ответственных потребителей.

В режимах дефицита активной мощности и качаний в энергосистеме [8, т. 3, кн. 1] величина $\tau_{г-н}$ постоянной механической инерции эквивалентного агрегата с моментом инерции, равным сумме моментов инерции генераторов и нагрузки, составляет не менее 10 с. В отличие от этого в режиме группового выбега нагруженных синхронных двигателей (так называемого эквивалентного синхронного двигателя – ЭСД) величина электромеханической постоянной времени $\tau_{э}$ никогда не превышает 8 с [2, 6, 9]. В соответствии с указанным отличием в величинах электромеханических постоянных времени при различных видах возмущений в системе электроснабжения различным будет и угловое ускорение вектора напряжения (или ЭДС) на секции шин 6 (10) кВ с синхронными двигателями. С учетом изложенного можно сделать вывод о том, что в качестве наиболее универсального контролируемого параметра датчика потери питания ЭСД целесообразно использовать угловое ускорение ε выбега обобщенного агрегата, определяемое как вторая производная угла выбега ЭСД δ :

$$\varepsilon(t) = \frac{d^2\delta(t)}{dt^2}. \quad (1)$$

Большинство нарушений электроснабжения связано с короткими замыканиями (КЗ) в различных точках электрической сети. И если при незначи-

тельном удалении точки КЗ напряжение на выводах электродвигателей снижается существенно, то при удаленных КЗ значение остаточного напряжения может быть ненамного меньше номинального напряжения. При одно-, двух- и межфазных КЗ не только амплитуда ЭДС, но и угловая скорость СД, и динамика ее изменения не могут дать полной информации о нарушении электроснабжения [1, 5, 6]. Поэтому для запуска схемы БАВР целесообразно также осуществлять контроль за изменением направления мощности в питающей линии.

Таким образом, величина углового ускорения выбега эквивалентного СД, выбранная в качестве основного информативного параметра режима потери питания, характеризует совокупность следующих факторов:

- механическую инерцию обобщенного агрегата;
- предшествовавший технологический режим узла нагрузки (с учетом двигательной и статической нагрузки напряжением как 6 (10) кВ, так и 0,4 кВ);
- удаленность места возмущающего воздействия в питающей сети (при трехфазных КЗ).

Направление активной мощности в питающей линии и глубина провала напряжения на секции шин с СД могут рассматриваться в качестве вспомогательных режимных параметров, свидетельствующих о возникновении возмущений в питающей сети. Превышение вспомогательными режимными параметрами предельных уставок может быть использовано для управления системой возбуждения всех СД группы [4] с целью удержания их в синхронизме до момента отключения КЗ быстродействующими защитами или для быстрого отключения вводного выключателя секции шин во избежание интенсивного торможения СД.

Аналитическое определение критического времени перерыва питания по минимально допустимой угловой скорости приводного механизма. В условиях эксплуатации промышленных установок и технологических комплексов параметры технологической линии (напор, давление, производительность) существенно зависят от текущей скорости приводного механизма. При выбеге электродвигателей в условиях потери питания изменение угловой скорости определяется механической инерцией агрегата, нагрузкой приводного механизма и изменением момента сопротивления приводного механизма. Общепринятой характеристикой момента сопротивления $m_{\text{мех}}$ механизма является показатель степени γ зависимости этого момента от угловой скорости ω ротора двигателя $m_{\text{мех}}(\omega)$. По данным [5, 10], значение γ может находиться в диапазоне чисел от 0 до 6.

Для определения максимально допустимого времени перерыва электроснабжения технологических комплексов обычно пользуются методами [4]:

- 1) обработки данных эксплуатационных наблюдений;
- 2) теоретического расчета;
- 3) натурного эксперимента.

Поставим задачу получить аналитические соотношения, связывающие критическое время перерыва питания технологической линии $t_{\text{кр}}$ с мини-

мально допустимой угловой скоростью приводного механизма $\omega_{кр}$ для пространственных типов механизмов, описываемых различными механическими характеристиками. Для этого запишем дифференциальное уравнение движения одномассовой системы при отсутствии двигательного момента

$$m_{\text{мех}} = m_0 + (k_{\text{м.э}} - m_0) \sum_{i=1}^6 \beta_i \omega^i = -\tau_{j3} \frac{d\omega}{dt}, \quad (2)$$

где $m_{\text{мех}}$ – эквивалентный момент сопротивления обобщенного механизма; ω – угловая скорость ротора ЭСД; m_0 – эквивалентный начальный момент сопротивления обобщенного приводного механизма (ОПМ) в статическом положении; $k_{\text{м.э}}$ – эквивалентный коэффициент загрузки ЭСД по активной мощности при синхронной угловой скорости; i – показатели степени зависимости момента сопротивления обобщенного механизма от ω (зависимость представлена в виде аппроксимирующего ряда Тейлора с разложением до ω^6); β_i – весовые коэффициенты при разных степенях ω , причем $\sum \beta_i = 1$; τ_{j3} – эквивалентная электромеханическая постоянная времени системы ЭСД – ОПМ.

Уравнение (2) связывает момент сопротивления ОПМ с изменением угловой скорости ротора ЭСД на этапе выбега, при этом момент сопротивления ОПМ и угловая скорость ротора представлены в относительных единицах соответственно приведенного номинального момента $M_{\text{ном}}$ на валу ЭСД и синхронной угловой скорости ω_0 ЭСД. Закон изменения угловой скорости каждого отдельного двигателя на начальном этапе группового выбега несколько отличается от закона изменения угловой скорости ЭСД, однако данное отличие является заметным только в случае СД существенно разной мощности и при отношении электромеханических постоянных двигателей более 5. Учет тормозного момента $m_{\text{т}}$, обусловленного выбегом СД на КЗ, а также момента $m_{\text{р}}$, который учитывает потери в активных сопротивлениях двигателей, сопротивлениях сети и нагрузки, может быть выполнен увеличением механического момента $m_{\text{мех}}$ в уравнении (2) на некоторую эквивалентную постоянную величину [1, 6]:

$$\Delta m_{\text{мех}} = m_{\text{т}} + m_{\text{р}}.$$

Анализ, проведенный с учетом встречающихся на практике сочетаний приводных механизмов синхронных двигателей 6 (10) кВ, показал, что при асинхронном скольжении ЭСД $s \leq 0,25$ выражение (2) в абсолютном большинстве случаев может быть представлено уравнением, в котором момент сопротивления ОПМ зависит от угловой скорости ротора ЭСД в единственной (преобладающей либо усредненной) степени γ , находящейся в диапазоне действительных чисел от 0 до 6 [2, 3, 11]:

$$m_{\text{мех}} = m_0 + (k_{\text{м.э}} - m_0) \omega^\gamma = -\tau_{j3} \frac{d\omega}{dt}. \quad (3)$$

Следует отметить, что переход от выражения (2) к (3) невозможен для тех случаев, когда СД используется для привода механизмов с резкопеременной нагрузкой на валу (например, прокатные станы).

На рис. 1–4 приведены примеры аппроксимации степенной функцией угловой скорости моментов сопротивления различных механизмов при скольжении ЭСД $s \leq 0,25$ (1 – реальная зависимость момента сопротивления ОПМ от угловой скорости; 2 – аппроксимированная зависимость момента сопротивления ОПМ от угловой скорости).

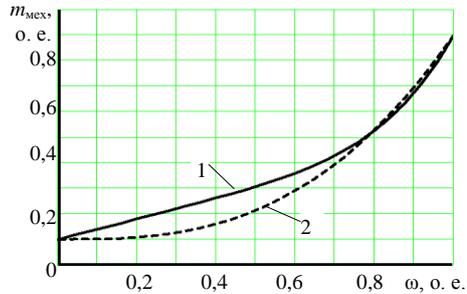


Рис. 1. Пример аппроксимации момента сопротивления вентилятора по данным [6] на начальном этапе выбега ЭСД степенной функцией угловой скорости, аппроксимация: $k_{м.э} = 0,9$; $m_0 = 0,1$; $\gamma = 2,8$

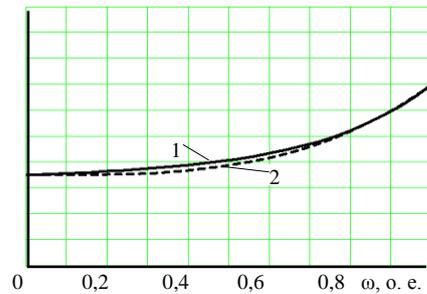


Рис. 2. Пример аппроксимации момента сопротивления турбокомпрессора по данным [6] на начальном этапе выбега ЭСД степенной функцией угловой скорости, аппроксимация: $k_{м.э} = 0,7$; $m_0 = 0,35$; $\gamma = 3,2$

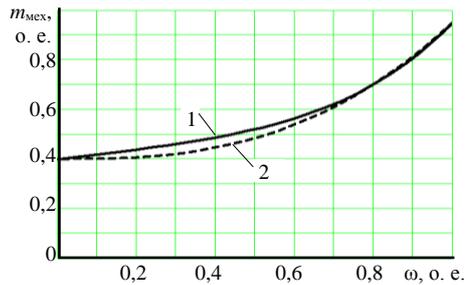


Рис. 3. Пример аппроксимации момента сопротивления вентилятора по данным [4] на начальном этапе выбега ЭСД степенной функцией угловой скорости, аппроксимация: $k_{м.э} = 0,95$; $m_0 = 0,4$; $\gamma = 2,7$

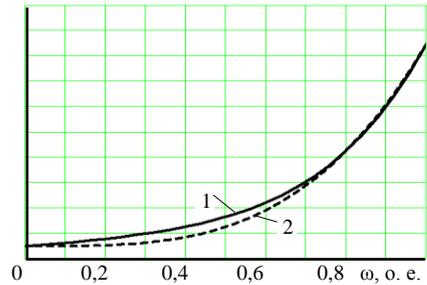


Рис. 4. Пример аппроксимации момента сопротивления питательного насоса по данным [4] на начальном этапе выбега ЭСД степенной функцией угловой скорости, аппроксимация: $k_{м.э} = 0,85$; $m_0 = 0,05$; $\gamma = 3,4$

Дифференциальное уравнение (3) группового выбега может быть решено относительно времени выбега t для всех целых γ в диапазоне 0–6. В результате этих частных решений получены соотношения, позволяющие по приведенной к валу ЭСД минимально допустимой угловой скорости $\omega_{кр.мех}$ механизма с известной механической характеристикой определять критическое время $t_{кр.мех}$ перерыва питания, приводящего к расстройству непрерывного технологического процесса [11]. Например, в случае, если значение параметра $\gamma = 6$, что характерно для некоторых механизмов насосной группы, зависимость времени перерыва питания от угловой скорости имеет вид

$$t(\omega) = \frac{\tau_{j3}}{k_{м.э} - m_0} \left(\ln \left(\frac{(1 + k_6\sqrt{3} + k_6^2)(\omega^2 - \omega k_6\sqrt{3} + k_6^2)}{(1 - k_6\sqrt{3} + k_6^2)(\omega^2 + \omega k_6\sqrt{3} + k_6^2)} \right)^{\frac{1}{4\sqrt{3}k_6^5}} + \frac{1}{6k_6^5} \left(2\operatorname{arctg} \frac{1}{k_6} + \operatorname{arctg} \frac{2 - k_6\sqrt{3}}{k_6} + \operatorname{arctg} \frac{2 + k_6\sqrt{3}}{k_6} - 2\operatorname{arctg} \frac{\omega}{k_6} - \operatorname{arctg} \frac{2\omega - k_6\sqrt{3}}{k_6} - \operatorname{arctg} \frac{2\omega + k_6\sqrt{3}}{k_6} \right) \right), \quad (4)$$

где $k_6 = \left(\frac{m_0}{k_{м.э} - m_0} \right)^{\frac{1}{6}}$ – коэффициент, зависящий от параметров m_0 и $k_{м.э}$.

На рис. 5 в качестве примера показаны зависимости времени перерыва питания от угловой скорости приводного механизма при коэффициенте загрузки, равном 1, и электромеханической постоянной времени агрегата, равной 2 с. Из графиков видно, что если, например, технологически допустимой является угловая скорость механизма, равная 90 % номинальной, то критическое время перерыва питания для агрегатов с различными механическими характеристиками может находиться в пределах от 0,2 до 0,53 с.

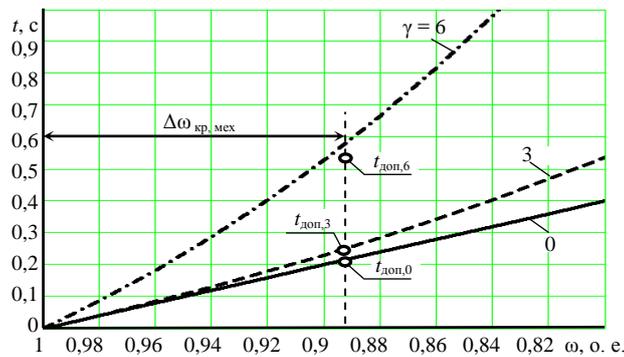


Рис. 5. Зависимости времени перерыва питания агрегатов различных типов от угловой скорости с указанием допустимых интервалов времени перерыва питания по условию сохранения непрерывного технологического процесса (для всех агрегатов принято: $k_{м.э} = 1$; $m_0 = 0,1$; $\tau_{j3} = 2$ с)

Аналитическое определение динамических характеристик выбега синхронных двигателей с приводными механизмами различных типов. Для возможности прогнозирования значений угловой скорости ω и угла выбега δ , эквивалентного СД во времени, решение дифференциального уравнения (3) группового выбега синхронных двигателей должно быть найдено относительно не текущего времени перерыва питания t , а угловой скорости ω .

Для механизмов, описываемых параметрами $\gamma = 0, 1$ и 2 , решение дифференциального уравнения (3) в аналитической форме относительно переменной ω может быть получено строго [2, 3]. Динамические характеристики выбега, полученные в результате данного решения, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Аналитические выражения, описывающие динамические характеристики ЭСД для обобщенных приводных механизмов с параметрами $\gamma = 0, 1$ и 2

Тип механизма	Динамическая характеристика ЭСД	Точная аналитическая формула
$\gamma = 0$	Угловая скорость	$\omega(t) = \omega_0 \left(1 - \frac{k_{м.э}}{\tau_{jэ}} t \right)$
	Угол выбега	$\delta(t) = \omega_0 \frac{k_{м.э}}{\tau_{jэ}} \frac{t^2}{2} + \delta_0$
	Угловое ускорение	$\varepsilon(t) = -\omega_0 \frac{k_{м.э}}{\tau_{jэ}}$

Окончание табл. 1

Тип механизма	Динамическая характеристика ЭСД	Точная аналитическая формула
$\gamma = 1$	Угловая скорость	$\omega(t) = \frac{\omega_0}{1-m'_0} \left(e^{\frac{t}{\tau'_{jэ}}} - m'_0 \right)$, где $\tau'_{jэ} = \frac{\tau_{jэ}}{k_{м.э}(1-m'_0)}$; $m'_0 = \frac{m_0}{k_{м.э}}$
	Угол выбега	$\delta(t) = \frac{\omega_0}{1-m'_0} \left(t + \tau'_{jэ} \left(e^{\frac{t}{\tau'_{jэ}}} - 1 \right) \right)$
	Угловое ускорение	$\varepsilon(t) = -\omega_0 \frac{k_{м.э}}{\tau_{jэ}} e^{-\frac{t}{\tau'_{jэ}}}$
$\gamma = 2$	Угловая скорость	$\omega(t) = \omega_0 \left(\frac{1 - \sqrt{\frac{m'_0}{1-m'_0}} \operatorname{tg} \frac{t}{\tau''_{jэ}}}{1 + \sqrt{\frac{1-m'_0}{m'_0}} \operatorname{tg} \frac{t}{\tau''_{jэ}}} \right)$, где $\tau''_{jэ} = \frac{\tau_{jэ}}{k_{м.э} \sqrt{m'_0(1-m'_0)}}$
	Угол выбега	$\delta(t) = \omega_0 t - \omega_0 \tau''_{jэ} \sqrt{\frac{m'_0}{1-m'_0}} \ln \left(\cos \frac{t}{\tau''_{jэ}} + \sqrt{\frac{1-m'_0}{m'_0}} \sin \frac{t}{\tau''_{jэ}} \right)$
	Угловое ускорение	$\varepsilon(t) = -\omega_0 \sqrt{\frac{m'_0}{1-m'_0}} \frac{1}{1-m'} \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{t}{\tau''_{jэ}}}{\left(\sqrt{\frac{m'_0}{1-m'_0}} + \operatorname{tg} \frac{t}{\tau''_{jэ}} \right)^2}$

В выражениях, представленных в табл. 1, зависимости угла выбега $\delta(t)$ и углового ускорения выбега $\varepsilon(t)$ определяются соответственно по выражениям:

$$\left. \begin{aligned} \delta(t) &= \omega_0 t - \int \omega(t) dt + \delta_0; \\ \delta_0 &= \frac{\sum_{i=1}^n \delta_{pi} P_{ном i}}{\sum_{i=1}^n P_{ном i}}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где δ_0 – начальный угол выбега ЭСД, определяемый величинами рабочих углов δ_p нагрузки в доаварийном режиме всех двигателей, участвующих в выбеге, с учетом соотношения их мощностей [6];

$$\varepsilon(t) = \frac{d\omega(t)}{dt}. \quad (6)$$

Через m'_0 обозначен относительный начальный момент сопротивления ОПМ

$$m'_0 = \frac{m_0}{k_{м.э}}. \quad (7)$$

Если момент сопротивления механизма описывается как функция разложения ω в степенной ряд со старшей степенью $n > 2$ (2) либо с преобладающей степенью $\gamma > 2$ (3), выражения для угловой скорости ω аналитически строго получены быть не могут. Поэтому были рассмотрены способы приближенного решения данных уравнений:

- способ 1 – разложения аналитических функций аргумента ω в ряд Тейлора в окрестности точки ω_0 , т. е. синхронной угловой скорости;
- способ 2 – последовательного нахождения коэффициентов аппроксимирующего полинома.

Способ разложения аналитических функций аргумента ω в ряд Тейлора в окрестности точки ω_0 . Суть способа 1 состоит в том, что все аналитические функции аргумента ω , содержащиеся в правой части зависимостей $t(\omega)$, раскладываются в ряд Тейлора до 2-й степени ω в окрестности точки ω_0 , а затем угловая скорость ЭСД ω выражается как корень квадратного уравнения [2, 11].

Например, для обобщенного приводного механизма, имеющего момент сопротивления, характеризуемый показателем степени $\gamma = 6$, из выражения (4) получим

$$\omega(t) = \frac{\omega_0}{6(1-m'_0)} \left(7 - 6m'_0 - \sqrt{1 + 12 \frac{k_{м.э}}{\tau_{jэ}} t(1-m'_0)} \right). \quad (8)$$

Находим закон изменения угла выбега

$$\delta(t) = \omega_0 t - \int \omega(t) dt + \delta_0 = \omega_0 t - \frac{\omega_0}{6(1-m'_0)} \times \left((7 - 6m'_0)t - \frac{\tau_{jэ}}{18(1-m'_0)k_{м.э}} \left(\left(1 + 12 \frac{k_{м.э}}{\tau_{jэ}} t(1-m'_0) \right)^{\frac{3}{2}} - 1 \right) \right) + \delta_0 \quad (9)$$

и углового ускорения выбега

$$\varepsilon(t) = \frac{d\omega(t)}{dt} = -\omega_0 \frac{k_{м.э}}{\tau_{jэ}} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{k_{м.э}}{\tau_{jэ}} t(1 - m'_0)}}. \quad (10)$$

Анализ выражений для $\omega(t)$, $\delta(t)$ и $\varepsilon(t)$, полученных с использованием способа 1, показал, что данные зависимости могут быть представлены в универсальном виде по отношению к любому γ из множества действительных чисел (0–6] (табл. 2).

Следует отметить, что для механизмов с постоянным моментом сопротивления исходное требование принять в выражениях табл. 2 значение $\gamma = 0$ невыполнимо, однако вычислительный эксперимент показал, что удовлетворительное приближение получается при подстановке любого значения $\gamma \leq 0,01$.

Таблица 2

**Аналитические выражения, полученные по способу 1
аппроксимации динамических характеристик ЭСД**

Динамическая характеристика ЭСД	Приближенная аналитическая формула
Угловая скорость	$\omega(t) = \frac{\omega_0}{\gamma(1 - m'_0)} \left(\gamma + 1 - \gamma m'_0 - \sqrt{1 + 2\gamma \frac{k_{м.э}}{\tau_{jэ}} t(1 - m'_0)} \right)$
Угол выбега	$\delta(t) = \omega_0 t - \frac{\omega_0}{\gamma(1 - m'_0)} \left[\left(\gamma + 1 - \gamma m'_0 \right) t - \frac{\tau_j}{3\gamma(1 - m'_0)k_{м.э}} \times \right. \\ \left. \times \left(\left(1 + 2\gamma \frac{k_{м.э}}{\tau_{jэ}} t(1 - m'_0) \right)^{\frac{3}{2}} - 1 \right) \right] + \delta_0$
Угловое ускорение	$\varepsilon(t) = -\omega_0 \frac{k_{м.э}}{\tau_{jэ}} \frac{1}{\sqrt{1 + 2\gamma \frac{k_{м.э}}{\tau_{jэ}} t(1 - m'_0)}}$

Способ последовательного нахождения коэффициентов аппроксимирующего полинома. По способу 2 может быть найдено приближенное решение как дифференциального уравнения (2), так и дифференциального уравнения (3). При этом изначально предполагается, что функция угловой скорости ω представима в виде следующего разложения в ряд по степеням t

$$\omega(t) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k t^k, \quad (11)$$

где a_k – некоторые числовые коэффициенты, зависящие от параметров обобщенного агрегата $k_{м.э}$, $\tau_{jэ}$, m'_0 , β_1 – β_6 .

Тогда исходное дифференциальное уравнение (2) может быть записано в виде

$$m_0 + (k_{м.э} - m_0) \sum_{i=1}^6 \beta_i \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k t^k \right)^i = -\tau_{j^3} \frac{d \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k t^k \right)}{dt}. \quad (12)$$

Для последовательного отыскания неизвестных коэффициентов a_k достаточно, предварительно ограничившись в выражении (11) конечным числом членов ряда, в уравнении (12) последовательно сравнивать коэффициенты при одинаковых степенях t в левой и правой частях, начиная с коэффициента при t в нулевой степени.

В общем случае как результат решения указанным способом уравнения (2) группового выбега СД с произвольным типом обобщенного механизма приближенные аналитические зависимости, получаемые аппроксимацией по способу 2, могут быть представлены в виде:

$$\left. \begin{aligned} \omega(t) &= \omega_0 \left(1 - \frac{k_{м.э}}{\tau_{j^3}} t \right) + \omega_0 \sum_{z=2}^n \lambda_z(\beta_i, m'_0) \left(\frac{k_{м.э}}{\tau_{j^3}} t \right)^z; \\ \delta(t) &= \omega_0 \frac{k_{м.э}}{\tau_{j^3}} \frac{t^2}{2} - \omega_0 \sum_{z=2}^n \frac{\lambda_z(\beta_i, m'_0)}{z+1} \left(\frac{k_{м.э}}{\tau_{j^3}} t \right)^{z+1} + \delta_0; \\ \varepsilon(t) &= -\omega_0 \frac{k_{м.э}}{\tau_{j^3}} + \omega_0 \sum_{z=2}^n z \lambda_z(\beta_i, m'_0) \left(\frac{k_{м.э}}{\tau_{j^3}} t \right)^{z-1}, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где $\lambda_z(\beta_i, m'_0)$ – числовые коэффициенты, знак и величина которых зависят от характера момента сопротивления ОПМ, т. е. от значений весовых коэффициентов β_i и начального момента сопротивления m'_0 , характеризующих тип механизма.

Поскольку весовые коэффициенты β_i находятся в числителе каждого из слагаемых, в сумме образующих коэффициенты $\lambda_z(\beta_i, m'_0)$, можно показать, что для постоянного момента сопротивления ОПМ (т. е. при $m_{мех} = k_{м.э}$) выражения (13) полностью совпадают с соответствующими выражениями, полученными строго аналитически.

С учетом допустимости аппроксимации момента сопротивления ОПМ степенной функцией согласно (3) при помощи способа 2 были найдены приближенные решения данного уравнения относительно угловой скорости ω для частных случаев целых γ . Выражения для угловой скорости, углового ускорения и угла выбега ЭСД будут иметь общий вид, приведенный в табл. 3.

Таблица 3

**Аналитические выражения, полученные по способу 2
аппроксимации динамических характеристик ЭСД**

Динамическая характеристика ЭСД	Приближенная аналитическая формула
---------------------------------	------------------------------------

Угловая скорость	$\omega(t) = \omega_0 \left(1 - \frac{k_{м.э}}{\tau_{jэ}} t + \frac{1}{2!} \left(\frac{k_{м.э}}{\tau_{jэ}} \right)^2 (1 - m'_0) \gamma t^2 - \frac{1}{3!} \left(\frac{k_{м.э}}{\tau_{jэ}} \right)^3 (1 - m'_0) (\gamma^2 (2 - m'_0) - \gamma) t^3 + \right. \\ \left. + \frac{1}{4!} \left(\frac{k_{м.э}}{\tau_{jэ}} \right)^4 (1 - m'_0) (\gamma^3 (m_0'^2 - 6m'_0 + 6) + \gamma^2 (4m'_0 - 7) + 2\gamma) t^4 - \dots \right)$
Угол выбега	$\delta(t) = \omega_0 \frac{k_{м.э}}{\tau_{jэ}} \frac{t^2}{2} - \omega_0 \left(\frac{1}{3 \cdot 2!} \left(\frac{k_{м.э}}{\tau_{jэ}} \right)^2 (1 - m'_0) \gamma t^3 - \frac{1}{4 \cdot 3!} \left(\frac{k_{м.э}}{\tau_{jэ}} \right)^3 (1 - m'_0) (\gamma^2 (2 - m'_0) - \gamma) t^4 + \right. \\ \left. + \frac{1}{5 \cdot 4!} \left(\frac{k_{м.э}}{\tau_{jэ}} \right)^4 (1 - m'_0) (\gamma^3 (m_0'^2 - 6m'_0 + 6) + \gamma^2 (4m'_0 - 7) + 2\gamma) t^5 - \dots \right)$
Угловое ускорение	$\varepsilon(t) = -\omega_0 \frac{k_{м.э}}{\tau_{jэ}} + \omega_0 \left(\frac{2}{2!} \left(\frac{k_{м.э}}{\tau_{jэ}} \right)^2 (1 - m'_0) \gamma t - \frac{3}{3!} \left(\frac{k_{м.э}}{\tau_{jэ}} \right)^3 (1 - m'_0) (\gamma^2 (2 - m'_0) - \gamma) t^2 + \right. \\ \left. + \frac{4}{4!} \left(\frac{k_{м.э}}{\tau_{jэ}} \right)^4 (1 - m'_0) (\gamma^3 (m_0'^2 - 6m'_0 + 6) + \gamma^2 (4m'_0 - 7) + 2\gamma) t^3 - \dots \right)$

Данные выражения так же, как и выражения из табл. 2, полученные по способу 1, могут быть использованы для аналитического описания выбега обобщенного агрегата, для которого усредненная или преобладающая степень γ зависимости момента сопротивления на валу от угловой скорости представлена в виде действительного числа в диапазоне $0 \leq \gamma \leq 6$.

Формулировка способа быстродействующего самозапуска ЭСД.

Анализ строгих и приближенных аналитических выражений для углового ускорения ЭСД $\varepsilon(t)$ (табл. 1–3) показывает, что в начальный момент времени после потери питания ЭСД угловое ускорение выбега ε_0 не зависит от типа механической характеристики приводного механизма γ [2, 3, 11] и определяется по формуле

$$\varepsilon_0 = \left. \frac{d\omega(t)}{dt} \right|_{t=0} = -\omega_0 \frac{k_{м.э}}{\tau_{jэ}}. \quad (14)$$

Все выражения для динамических параметров ЭСД, приведенные в табл. 1–3, могут быть представлены в параметрической зависимости от величины модуля начального углового ускорения выбега ε_0 посредством следующей замены:

$$\frac{k_{м.э}}{\tau_{jэ}} = \frac{\varepsilon_0}{\omega_0}. \quad (15)$$

Из (14) следует, что диапазон изменения величины начального углового ускорения при выбега ЭСД с различными электромеханическими постоянными времени $\tau_{jэ}$ агрегата двигатель – механизм составляет 40–400 рад/с².

Практический смысл представления динамических характеристик в параметрической зависимости от величины ε_0 состоит в том, что исходя из известных с определенной точностью величин ω_0 , γ , m'_0 и измеряемых величин ε_0 и δ_0 можно на стадии выбега ЭСД рассчитывать значения интервалов времени $\Delta t_{доп}$ до достижения соответствующих критических значений угловой скорости $\omega_{кр}$ и угла выбега $\delta_{кр}$ ЭСД. Таким образом, уже на начальном этапе выбега после потери питания ЭСД можно прогнозировать наличие и продолжительность временных зон допустимого включения ЭСД на питающее напряжение при быстродействующем самозапуске.

В результате анализа было установлено, что способ 2 аппроксимации даже при использовании разложения до 4-й степени t обеспечивает лучшее приближение к истинной характеристике $\omega(t)$ независимо от γ только при очень малых значениях $\varepsilon_0 = 40\text{--}55 \text{ рад/с}^2$, что соответствует довольно редким на практике случаям выбега разгруженного агрегата. При более высоких значениях ε_0 для прогнозирования на этапе выбега допустимых интервалов времени $\Delta t_{\text{доп}}$ включения питающего напряжения на ЭСД предпочтительнее оказывается приближенная формула, полученная по способу 1 аппроксимации зависимости $\omega(t)$. Среднеквадратическое отклонение расчетного времени достижения любой угловой скорости на этапе первых двух проворотов вектора $\underline{E}_{\text{лв}}$ относительно вектора \underline{U}_c , определяемой по аппроксимированной способом 1 зависимости, не превышает 43 мс (при наихудшем сочетании параметров выбега ЭСД: $\gamma = 6$; $m'_0 = 0,01$ и $\varepsilon_0 = 400 \text{ рад/с}^2$). Такая погрешность прогноза удовлетворительна с точки зрения прогнозирования значений времени выбега, при которых:

- частота вращения механизма достигает критического значения по условию сохранения непрерывного технологического процесса;
- скольжение ЭСД достигает критического значения по условию сохранения результирующей устойчивости ответственных двигателей.

Кроме проведенного сравнения приближенных выражений с точки зрения возможности прогнозирования угловой скорости ЭСД на этапе выбега, также представляет интерес сравнение приближенных выражений для угла выбега $\delta(t)$, аппроксимированных с использованием способов 1 и 2 (табл. 2, 3). В этом отношении основным критерием является точность прогноза допустимых интервалов времени $\Delta t_{\text{доп.вкл}}$ включения ЭСД на резервное питание, на которых угол $\delta_{\text{вкл}}$ между векторами \underline{U}_c и $\underline{E}_{\text{лв}}$ не выходит за рамки предельно допустимого значения $\delta_{\text{доп}}$. Следует отметить, что угол между векторами \underline{U}_c и $\underline{E}_{\text{лв}}$ связан с углом выбега δ одиночного СД коэффициентом пропорциональности, равным числу пар полюсов p электродвигателя. Для упрощения при рассмотрении модели выбега обобщенного агрегата примем $p = 1$, тогда угол выбега δ будет совпадать с углом между векторами \underline{U}_c и $\underline{E}_{\text{лв}}$.

Способ быстродействующего самозапуска синхронных двигателей предусматривает обеспечение устойчивости СД в одном из двух следующих режимов (рис. 6) [1–3, 11].

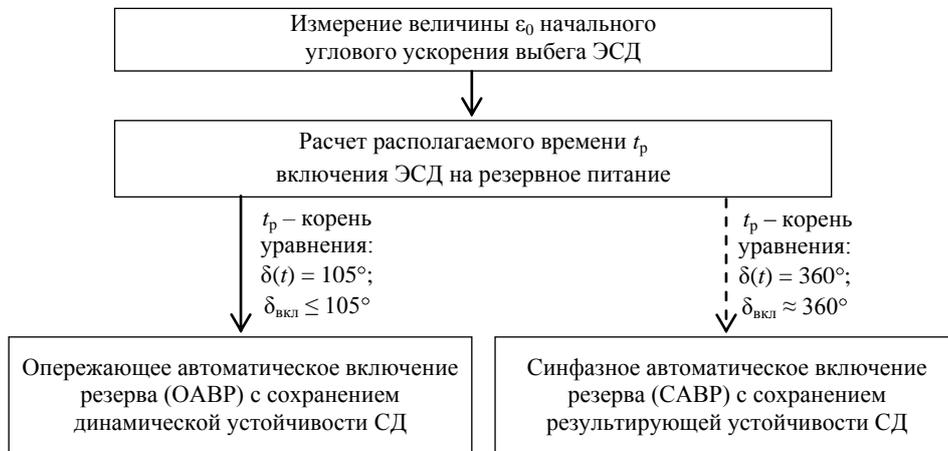


Рис. 6. Последовательность действий, предусматриваемая способом быстроедействующего самозапуска СД

1. В режиме опережающего АВР (ОАВР). В этом случае включение двигателей на резервное питание производится на интервале времени до первой противофазы векторов \underline{U}_c и $\underline{E}_{дв}$, когда угол между этими векторами еще не превышает значения 105° . Таким образом обеспечивается сохранение динамической устойчивости эквивалентного СД.

2. В режиме синфазного АВР (САВР). В этом случае включение двигателей на резервное питание производится на интервале времени, соответствующем одному полному провороту вектора $\underline{E}_{дв}$ относительно вектора \underline{U}_c (т. е. в момент синфазности этих векторов), когда угол включения близок к 360° . Таким образом обеспечивается сохранение результирующей устойчивости эквивалентного СД.

Согласно способу быстроедействующего самозапуска СД после измерения величины ϵ_0 сначала проверяется возможность осуществления ОАВР как более предпочтительного варианта самозапуска, а затем, если проведение ОАВР невозможно по причине большой скорости изменения угла выбега, проверяется возможность осуществления САВР.

Так как угол выбега δ и угловая скорость ω ЭСД связаны интегральной зависимостью, накопление ошибки прогноза по углу включения происходит по мере увеличения времени выбега, следовательно, максимальная ошибка по углу включения в случае быстроедействующего адаптивного самозапуска СД будет наблюдаться при прогнозировании времени САВР (т. е. момента времени 1-й синфазности векторов \underline{U}_c и $\underline{E}_{дв}$). С учетом того, что максимальная погрешность аппроксимации зависимости $\omega(t)$ способами 1 и 2 наблюдается при максимально возможном угловом ускорении выбега ЭСД $\epsilon_0 = 400 \text{ рад/с}^2$, был проведен анализ точности прогноза угла выбега $\delta = 360^\circ$ для различных типов приводных механизмов, описываемых целыми значениями γ , именно при значении $\epsilon_0 = 400 \text{ рад/с}^2$. Результаты определения времени САВР из приближенных формул в сравнении с истинными значениями времени первой синфазности приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты определения времени САВР

Тип ОПМ	Время САВР, с								
	ИЗ			Сп. 1			Сп. 2		
$\gamma = 0$	ИЗ			Сп. 1			Сп. 2		
	0,1772			0,1773			0,1772		
$\gamma = 1$	$m'_0 = 0,01$			$m'_0 = 0,3$			$m'_0 = 0,6$		
	ИЗ	Сп. 1	Сп. 2	ИЗ	Сп. 1	Сп. 2	ИЗ	Сп. 1	Сп. 2
	0,1841	0,1834	0,1841	0,1820	0,1817	0,1820	0,1800	0,1798	0,1800
$\gamma = 2$	$m'_0 = 0,01$			$m'_0 = 0,3$			$m'_0 = 0,6$		
	ИЗ	Сп. 1	Сп. 2	ИЗ	Сп. 1	Сп. 2	ИЗ	Сп. 1	Сп. 2
	0,1907	0,1889	0,1908	0,1865	0,1858	0,1866	0,1824	0,1823	0,1824
$\gamma = 3$	$m'_0 = 0,01$			$m'_0 = 0,3$			$m'_0 = 0,6$		
	ИЗ	Сп. 1	Сп. 2	ИЗ	Сп. 1	Сп. 2	ИЗ	Сп. 1	Сп. 2
	0,1970	0,1939	0,1980	0,1908	0,1895	0,1911	0,1847	0,1846	0,1848
$\gamma = 4$	$m'_0 = 0,01$			$m'_0 = 0,3$			$m'_0 = 0,6$		
	ИЗ	Сп. 1	Сп. 2	ИЗ	Сп. 1	Сп. 2	ИЗ	Сп. 1	Сп. 2
	0,2032	0,1985	0,2079	0,1948	0,1931	0,1961	0,1868	0,1869	0,1871

$\gamma = 5$	$m'_0 = 0,01$			$m'_0 = 0,3$			$m'_0 = 0,6$		
	ИЗ	Сп. 1	Сп. 2	ИЗ	Сп. 1	Сп. 2	ИЗ	Сп. 1	Сп. 2
	0,2091	0,2028	0,2301	0,1985	0,1964	0,2028	0,1887	0,1890	0,1895
$\gamma = 6$	$m'_0 = 0,01$			$m'_0 = 0,3$			$m'_0 = 0,6$		
	ИЗ	Сп. 1	Сп. 2	ИЗ	Сп. 1	Сп. 2	ИЗ	Сп. 1	Сп. 2
	0,2150	0,2068	0,2276	0,2022	0,1996	0,2141	0,1906	0,1911	0,1923

Примечания.

1. Все значения рассчитаны для случая: $\varepsilon_0 = 400 \text{ рад/с}^2$; $\delta_0 = 0^\circ$.
2. ИЗ – истинное значение времени первой синфазности векторов \underline{U}_c и $\underline{E}_{дв}$, определенное с использованием строгих аналитических формул (для $\gamma \leq 2$) или путем численного интегрирования (для $\gamma > 2$).
3. Для аппроксимации зависимости $\delta(t)$ механизма с постоянным моментом сопротивления по способу 1 принято $\gamma = 0,01$.
4. Для аппроксимации зависимости $\delta(t)$ по способу 2 использовано разложение до 5-й степени t .

Максимальные погрешности прогноза по углу включения $\Delta\delta_{\text{вкл}}$, соответствующие расчетным данным табл. 4, приведены в табл. 5.

Таблица 5

Погрешности прогноза по углу включения $\Delta\delta_{\text{вкл}}$ при синфазном АВР

Тип ОПМ	Погрешность прогноза по углу включения, град					
$\gamma = 0$	Сп. 1			Сп. 2		
	+0,108			0		
$\gamma = 1$	$m'_0 = 0,01$		$m'_0 = 0,3$		$m'_0 = 0,6$	
	Сп. 1	Сп. 2	Сп. 1	Сп. 2	Сп. 1	Сп. 2
	-2,568	$+3 \cdot 10^{-3}$	-1,341	$+7,2 \cdot 10^{-4}$	-0,458	$+8,1 \cdot 10^{-5}$
$\gamma = 2$	$m'_0 = 0,01$		$m'_0 = 0,3$		$m'_0 = 0,6$	
	Сп. 1	Сп. 2	Сп. 1	Сп. 2	Сп. 1	Сп. 2
	-6,213	+0,388	-2,834	+0,127	-0,538	+0,024
$\gamma = 3$	$m'_0 = 0,01$		$m'_0 = 0,3$		$m'_0 = 0,6$	
	Сп. 1	Сп. 2	Сп. 1	Сп. 2	Сп. 1	Сп. 2
	-10,314	+3,310	-4,331	+0,968	-0,302	+0,262
$\gamma = 4$	$m'_0 = 0,01$		$m'_0 = 0,3$		$m'_0 = 0,6$	
	Сп. 1	Сп. 2	Сп. 1	Сп. 2	Сп. 1	Сп. 2
	-14,623	+13,118	-5,750	+4,308	+0,210	+0,972
$\gamma = 5$	$m'_0 = 0,01$		$m'_0 = 0,3$		$m'_0 = 0,6$	
	Сп. 1	Сп. 2	Сп. 1	Сп. 2	Сп. 1	Сп. 2
	-18,901	+38,208	-7,088	+12,651	+1,122	+2,823
$\gamma = 6$	$m'_0 = 0,01$		$m'_0 = 0,3$		$m'_0 = 0,6$	
	Сп. 1	Сп. 2	Сп. 1	Сп. 2	Сп. 1	Сп. 2
	-23,107	+89,721	-8,288	+28,439	+1,687	+5,797

Анализ данных, приведенных в табл. 4 и 5, не позволяет сделать однозначный вывод о том, какой из способов аппроксимации динамических характеристик выбега предпочтительнее использовать для прогнозирования угла выбега ЭСД во времени. Если для большинства типов механизмов использование способа 2 позволяет определять время САВР ближе к истинному значению, то, с точки зрения предельно возможного значения ошибки по углу включения при произвольном γ , а также отрицательного

знака этой ошибки в большинстве случаев, способ 1 оказывается предпочтительнее. С учетом того, что интерес представляет точность прогноза допустимых интервалов времени включения ЭСД на резервное питание и по углу выбега, и по угловой скорости, более универсальными являются приближенные формулы, полученные по способу 1. В целом же выбор зависимостей для прогнозирования динамики выбега ЭСД должен производиться индивидуально для каждого конкретного случая обобщенного агрегата в зависимости от известного с определенной точностью диапазона значений γ и m'_0 .

Наибольшую трудность выбор оптимальных расчетных формул, описывающих групповой выбег СД, а также уставок γ , m'_0 , представляет в случаях переменной загрузки разнотипных агрегатов 6 (10) кВ, входящих в состав обобщенного приводного механизма. В этих случаях показатель степени γ и относительный начальный момент сопротивления m'_0 должны быть заданы в некотором усредненном виде, причем эти величины выбираются по условию минимизации модуля возможной ошибки прогноза по углу включения во всем возможном диапазоне изменения γ и m'_0 . При необходимости механизмы, приводимые наиболее мощными СД, должны быть сгруппированы по критерию «показатель степени механической характеристики». В этом случае отдельно должны рассматриваться, например, коэффициенты загрузки механизмов компрессорной и насосной групп, и в зависимости от соотношения этих коэффициентов загрузки вручную или при помощи дистанционного управления следует корректировать уставки γ и m'_0 . Возможный пример такой группировки механизмов с выбором уставок для случаев технологической загрузки определенной группы механизмов и указанием границ погрешности по углу включения приведен в табл. 6.

Таблица 6

Пример группировки механизмов по виду механической характеристики

Диапазон возможных значений параметров ОПМ		Значения, принимаемые в качестве уставок системы быстрого запуска		Диапазон возможных ошибок прогноза по углу включения, град	
γ	m'_0	γ	m'_0	ОАВР	САВР
0–3	0,01–0,4	1,38	0,15	(–5,92)–(+4,81)	(–31,93)–(+29,78)
3–6	0,01–0,4	4,1	0,15	(–6,55)–(+5,71)	(–32,14)–(+31,15)

Примечание. Для расчета использовались зависимости $\delta(t)$, аппроксимированные способом 1; максимумы ошибок прогноза соответствуют случаю: $\varepsilon_0 = 400 \text{ рад/с}^2$; $m'_0 = 0,01$.

Таким образом, как показал анализ, оба рассмотренных способа аппроксимации характеристик угловой скорости выбега ЭСД могут быть использованы для аналитического описания динамических характеристик выбега промышленных агрегатов с различными типами приводных механизмов, причем возможен вариант совместного использования зависимостей, аппроксимированных способами 1 и 2. При этом устройство быстродействующего АВР синхронных двигателей должно быть встроено в качестве отдельного блока в типовой комплект цифровых защит (например, Seram 2000). Оператор автоматизированной системы управления техноло-

гическим процессом (АСУТП) промышленного объекта, анализируя состав и текущую загрузку двигателей привода различных механизмов, может с помощью дистанционного управления изменять расчетную формулу, используемую для прогнозирования оптимального времени включения резервного питания.

ВЫВОДЫ

1. В качестве основного информативного параметра потери питания эквивалентного синхронного двигателя целесообразно использовать начальное угловое ускорение выбега, которое характеризует загрузку и электро-механическую постоянную времени агрегата независимо от типа его механической характеристики.

2. Получены аналитические соотношения, позволяющие определять критическое время перерыва питания синхронных двигателей 6 (10) кВ по условию сохранения непрерывного технологического процесса. В условиях потери питания требования к быстродействию устройств противоаварийной автоматики синхронных двигателей по условию сохранения непрерывного технологического процесса определяются не только загрузкой и механической инерцией обобщенного агрегата, но и видом механической характеристики ОПМ.

3. На основании предложенной математической модели выбега обобщенного агрегата двигатель – механизм получены в аналитической форме динамические характеристики выбега синхронных двигателей с различными типами обобщенного приводного механизма. Это позволяет прогнозировать допустимые интервалы времени включения эквивалентного СД на питающее напряжение по начальным параметрам аварийного режима.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гамазин, С. И. Переходные процессы в системах электроснабжения с электродвигательной нагрузкой / С. И. Гамазин, Т. А. Садыкбеков. – Алма-Ата: Гылым, 1991. – 301 с.
2. Крышнев, Ю. В. Система адаптивного быстродействующего самозапуска синхронных двигателей на основе измерения углового ускорения: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Ю. В. Крышнев // ГГТУ им. П. О. Сухого. – Гомель, 2003. – 208 с.
3. Курганов, В. В. Быстродействующий самозапуск синхронной двигательной нагрузки / В. В. Курганов, Ю. В. Крышнев // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2003. – № 1. – С. 28–43.
4. Носов, К. Б. Способы и средства самозапуска электродвигателей / К. Б. Носов, Н. М. Дворак. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 144 с.
5. Сыромятников, И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И. А. Сыромятников. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 369 с.
6. Слодарж, М. И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей / М. И. Слодарж. – М.: Энергия, 1977. – 215 с.
7. Бороденко, В. А. О выборе принципа действия пусковых органов АВР / В. А. Бороденко, В. Е. Поляков // Промышленная энергетика. – 1981. – № 5. – С. 34–37.
8. Электротехнический справочник: в 3 т. / под общ. ред. проф. МЭИ (гл. ред. И. Н. Орлов). – 7-е изд., испр. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – Т. 1–3.
9. Устройство для выявления потери питания электродвигателей: а. с. 17376624 СССР А1, МКИ³ Н 02 Р 1/58 / В. В. Курганов, В. В. Прокопчик. – № 4411502/24-07; заявл. 16.04.90; опубл. 15.08.92 // Бюл. изобр. – 1992. – № 20.
10. Раух, Я. Я. Учет нагрузки при выбега электродвигателей 6–10 кВ / Я. Я. Раух, А. И. Хитров, В. В. Кабанов // Промышленная энергетика. – 1981. – № 10. – С. 24–26.

11. Крышнев, Ю. В. Исследование динамики выбега синхронных двигателей с учетом характеристик приводных механизмов / Ю. В. Крышнев // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2002. – № 3–4. – С. 74–81.

Представлена кафедрой
промышленной электроники

Поступила 7.07.2006

УДК 621.385.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА РЕЗОНАНСНОГО ТИПА В КРИТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Канд. тех. наук, доц. МОРОЗ В. К., канд. физ.-мат. наук, доц. ПОЛИЩУК А. А.,
инженеры МИХАЛЬЦЕВИЧ Г. А., САЦУКЕВИЧ Е. М.

*Белорусский государственный технологический университет,
Белорусский национальный технический университет*

В генераторах резонансного типа энергия источников преобразуется в переменный ток высокой частоты путем периодического изменения плотности потока электронов в вакууме.

Колебательные системы в резонансных генераторах выполнены в виде объемных резонаторов. В двухрезонаторном генераторе (рис. 1) электронный поток, создаваемый катодом 1, регулируется управляющей сеткой 2, на которую подается небольшое напряжение E_c , отрицательное по отношению к катоду. Изменяя это напряжение, можно управлять электронным потоком. Под действием ускоряющего поля анода 3 электроны удаляются от катода и попадают в электрическое поле первого резонатора P_1 , который с двумя сетками C_1 и C_2 образует группирователь.

