

УДК 621.313.333

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЫБЕГА СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВОДНЫХ МЕХАНИЗМОВ

**Ю.В. КРЫШНЕВ**

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

Эффективным способом сохранения бесперебойной работы предприятий с непрерывным технологическим процессом при нарушениях электроснабжения является обеспечение быстродействующего самозапуска синхронных двигателей (СД). К промышленным объектам, на которых перерыв электроснабжения может повлечь за собой частичный или полный срыв сложных технологических процессов (а как следствие, выпуск массового брака или длительный последующий простой установок и механизмов), можно отнести технологические комплексы химических и нефтехимических заводов, предприятия добычи и транспорта нефти, сетевые насосы городских котельных, компрессорные станции промышленных предприятий и др.

Обеспечение самозапуска высоковольтной электродвигательной нагрузки требует комплексного решения вопросов, связанных с работой электродвигателей и их систем управления, а также учета характера изменения момента сопротивления приводных механизмов [2, 3, 6, 7].

Указанный системный подход в алгоритме самозапуска СД предусматривает разработку устройства быстродействующего АВР синхронных двигателей, адаптирующегося к инерционным механическим свойствам агрегата при его произвольной загрузке.

В случаях нарушения связи СД с питающей сетью (неоперативное отключение вводного выключателя либо КЗ со стороны питающей линии) происходит выбег СД с приводным механизмом – плавное снижение угловой скорости агрегата. Выбег может быть групповым, когда к общим шинам, потерявшим питание, подключено несколько СД. За счет обмена электромагнитной энергией между двигателями группы вплоть до момента времени, когда амплитуда питающего напряжения снизится до  $0,4U_{ном}$ , группу двигателей можно рассматривать как один эквивалентный синхронный двигатель (ЭСД) с обобщенными динамическими параметрами [1, 2]. Метод расчета режима группового выбега основан на допущении, что результирующий электромагнитный вращающий момент ЭСД равен нулю, а момент сопротивления обобщенного механизма рассчитывается по формуле:

$$m_c = m_{mp} + (k_{зг} - m_{mp})\omega^\gamma, \quad (1)$$

где  $m_{mp}$  – начальный момент сопротивления обобщенного механизма, в отн. ед.;  $k_{зг}$  – коэффициент загрузки обобщенного механизма по активной мощности;  $\omega$  – средняя угловая скорость группы двигателей, в отн. ед. синхронной угловой скорости СД;  $\gamma$  – показатель степени, характеризующий обобщенный механизм.

Показатель степени  $\gamma$  в формуле (1), в зависимости от типа механизма, изменяется от 0 до 6 [2, 7].

Изменение угловой скорости ЭСД на этапе выбега описывается уравнением движения ротора:

$$-m_c = -\tau_j \frac{ds}{dt}, \tag{2}$$

где  $\tau_j$  – эквивалентная электромеханическая постоянная времени системы «ЭСД – обобщенный приводной механизм»;  $s$  – скольжение ЭСД.

Решая (2) для разных  $\gamma$ , можно определить связь между угловой скоростью выбега агрегата того или иного типа и временем перерыва питания ЭСД (см. табл. 1).

Таблица 1

**Связь угловой скорости выбега механизмов с временем перерыва питания ЭСД**

Тип механизма, практические примеры	Зависимость $t$ (с) от $\omega$ (отн. ед.)
$\gamma = 0$ (транспортёры, дробилки, шаровые мельницы, поршневые компрессоры)	$t = \frac{\tau_j}{k_{32}} (1 - \omega)$
$\gamma = 1$ (генератор постоянного тока, работающий на постоянное сопротивление)	$t = \frac{\tau_j}{k_{32} - m_{mp}} \ln \frac{k_{32}}{(k_{32} - m_{mp}) \omega + m_{mp}}$
$\gamma = 2$ (центробежные насосы с очень низким статическим противодавлением на выходе, турбокомпрессоры, газодувки, вентиляторы, дымососы)	$t = \frac{\tau_j}{k_2(k_{32} - m_{mp})} \left( \operatorname{arctg} \frac{1}{k_2} - \operatorname{arctg} \frac{\omega}{k_2} \right); \quad k_2 = \left( \frac{m_{mp}}{k_{32} - m_{mp}} \right)^{\frac{1}{2}}$
$\gamma = 3$ (конденсатные насосы; центробежные насосы с низким статическим противодавлением на выходе)	$t = \frac{\tau_j}{k_{32} - m_{mp}} \left( \frac{1}{6k_3^2} \ln \frac{(1+k_3)^2(\omega^2 - \omega k_3 + k_3^2)}{(\omega+k_3)^2(1-k_3+k_3^2)} + \frac{1}{k_3^2\sqrt{3}} \left( \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{2}-k_3}{k_3\sqrt{3}} - \operatorname{arctg} \frac{2\omega-k_3}{k_3\sqrt{3}} \right) \right);$ $k_3 = \left( \frac{m_{mp}}{k_{32} - m_{mp}} \right)^{\frac{1}{3}}$
$\gamma = 4$ (центробежные насосы со средним статическим противодавлением на выходе; питательные насосы)	$t = \frac{\tau_j}{k_{32} - m_{mp}} \frac{1}{2\sqrt{2}k_4^2} \times \left( \frac{1}{2} \ln \frac{(1+k_4\sqrt{2}+k_4^2)(\omega^2 - \omega k_4\sqrt{2} + k_4^2)}{(1-k_4\sqrt{2}+k_4^2)(\omega^2 + \omega k_4\sqrt{2} + k_4^2)} + \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{2}+k_4}{k_4} + \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{2}-k_4}{k_4} - \operatorname{arctg} \frac{\omega\sqrt{2}+k_4}{k_4} - \operatorname{arctg} \frac{\omega\sqrt{2}-k_4}{k_4} \right);$ $k_4 = \left( \frac{m_{mp}}{k_{32} - m_{mp}} \right)^{\frac{1}{4}}$

Продолжение табл. 1

Тип механизма, практические примеры	Зависимость $t$ (с) от $\omega$ (отн. ед.)
$\gamma = 4$ (центробежные насосы со средним статическим противодавлением на выходе; питательные насосы)	$t = \frac{\tau_j}{k_{32} - m_{mp}} \frac{1}{2\sqrt{2}k_4^2} \times \left( \frac{1}{2} \ln \frac{(1 + k_4\sqrt{2} + k_4^2)(\omega^2 - \omega k_4\sqrt{2} + k_4^2)}{(1 - k_4\sqrt{2} + k_4^2)(\omega^2 + \omega k_4\sqrt{2} + k_4^2)} + \right. \\ \left. + \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{2} + k_4}{k_4} + \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{2} - k_4}{k_4} - \right. \\ \left. - \operatorname{arctg} \frac{\omega\sqrt{2} + k_4}{k_4} - \operatorname{arctg} \frac{\omega\sqrt{2} - k_4}{k_4} \right);$ $k_4 = \left( \frac{m_{mp}}{k_{3r} - m_{mp}} \right)^{\frac{1}{4}}$
$\gamma = 5$ (центробежные насосы с высоким статическим противодавлением на выходе; питательные насосы)	$t = \frac{\tau_j}{k_{32} - m_{mp}} \left( \ln \left( \left( \frac{1 + k_5}{\omega + k_5} \right)^{\frac{1}{5k_5^4}} \left( \frac{\alpha_1}{2\omega^2 + \omega k_5(\sqrt{5} - 1) + 2k_5^2} \right)^{\alpha_2} \right) \times \left( \frac{2\omega^2 - \omega k_5(\sqrt{5} + 1) + 2k_5^2}{\alpha_3} \right)^{\alpha_4} \right) + \\ + \alpha_5 \left( \alpha_6 - \operatorname{arctg} \frac{4\omega + k_5(\sqrt{5} - 1)}{k_5\sqrt{10 + 2\sqrt{5}}} \right) + \\ + \alpha_7 \left( \alpha_8 - \operatorname{arctg} \frac{4\omega - k_5(\sqrt{5} + 1)}{k_5\sqrt{10 - 2\sqrt{5}}} \right);$ $k_5 = \left( \frac{m_{mp}}{k_{3r} - m_{mp}} \right)^{\frac{1}{5}}; \quad \alpha_1 = 2 + k_5(\sqrt{5} - 1) + 2k_5^2;$ $\alpha_2 = \frac{\sqrt{5} - 1}{20k_5^4}; \quad \alpha_3 = 2 - k_5(\sqrt{5} + 1) + 2k_5^2; \quad \alpha_4 = \frac{\sqrt{5} + 1}{20k_5^4};$ $\alpha_5 = \frac{\sqrt{5} + 1}{k_5^4\sqrt{10(5 + \sqrt{5})}}; \quad \alpha_6 = \operatorname{arctg} \frac{4 + k_5(\sqrt{5} - 1)}{k_5\sqrt{10 + 2\sqrt{5}}};$ $\alpha_7 = \frac{\sqrt{5} - 1}{k_5^4\sqrt{10(5 - \sqrt{5})}}; \quad \alpha_8 = \operatorname{arctg} \frac{4 - k_5(\sqrt{5} + 1)}{k_5\sqrt{10 - 2\sqrt{5}}}$

Окончание табл. 1

Тип механизма, практические примеры	Зависимость $t$ (с) от $\omega$ (отн. ед.)
$\gamma = 6$ (центробежные насосы с очень высоким статическим противодавлением на выходе; питательные насосы)	$t = \frac{\tau_j}{k_{3z} - m_{mp}} \left( \ln \left( \frac{(1 + k_6\sqrt{3} + k_6^2)(\omega^2 - \omega k_6\sqrt{3} + k_6^2)}{(1 - k_6\sqrt{3} + k_6^2)(\omega^2 + \omega k_6\sqrt{3} + k_6^2)} \right)^{\frac{1}{4\sqrt{3}k_6^5}} + \right. \\ \left. + \frac{1}{6k_6^5} (2\text{arctg} \frac{1}{k_6} + \text{arctg} \frac{2 - k_6\sqrt{3}}{k_6} + \right. \\ \left. + \text{arctg} \frac{2 + k_6\sqrt{3}}{k_6} - 2\text{arctg} \frac{\omega}{k_6} - \right. \\ \left. - \text{arctg} \frac{2\omega - k_6\sqrt{3}}{k_6} - \text{arctg} \frac{2\omega + k_6\sqrt{3}}{k_6} \right) \\ k_6 = \left( \frac{m_{mp}}{k_{3z} - m_{mp}} \right)^{\frac{1}{6}}$

Способ адаптивного управления быстродействующим самозапуском синхронной двигательной нагрузки по угловому ускорению [4, 5] предусматривает определение для каждого типа приводного механизма аналитической зависимости угла выбега от времени  $\delta(t)$ . Угол  $\delta$  отыскивается в параметрической зависимости от величины начального углового ускорения агрегата  $\varepsilon_0$ , измеряемой быстродействующим датчиком потери питания СД.

Например, для широко распространенного в промышленности вентиляторного типа приводных механизмов ( $\gamma = 2$ ) угловая скорость агрегата в абсолютных единицах будет определяться по выражению:

$$\omega(t) = \omega_0 \left( \frac{1 - \sqrt{1 - m'_{mp}} \text{tg} \frac{t}{\tau_j''}}{1 + \sqrt{1 - m'_{mp}} \text{tg} \frac{t}{\tau_j''}} \right), \tag{3}$$

где  $m'_{mp} = \frac{m_{mp}}{k_{3z}}$  – относительный начальный момент сопротивления механизма;

$\tau_j'' = \frac{\tau_j}{k_{3z} \sqrt{m'_{mp}(1 - m'_{mp})}}$  – электромеханическая постоянная времени агрегата с  $\gamma = 2$ .

Угол выбега механизма определяется как угол рассогласования между векторами напряжения сети  $U_c$  и ЭДС группы выбегающих двигателей  $E_{\delta e}$ :

$$\delta(t) = \omega_0 t - \int \omega(t) dt = \omega_0 t - \omega_0 \tau_j'' \sqrt{\frac{m'_{mp}}{1 - m'_{mp}}} \ln \left( \cos \frac{t}{\tau_j''} + \sqrt{\frac{1 - m'_{mp}}{m'_{mp}}} \sin \frac{t}{\tau_j''} \right) + \delta_0. \tag{4}$$

Переключение на резервный источник питания необходимо производить в моменты времени, когда угол  $\delta$  между векторами  $U_c$  и  $E_{\delta e}$  равен [4, 5]:

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

Начальное угловое ускорение выбега (рад/с) определяется как производная угловой скорости агрегата в момент времени  $t = 0$ :

$$\varepsilon_0 = \omega'(t)|_{t=0} = \omega_0 \frac{k_{32}}{\tau_j} = \frac{\omega_0}{\tau_j \sqrt{m'_{mp}(1-m'_{mp})}}. \quad (5)$$

С учетом (5) и принимая  $m'_{mp} = 0,1$ ,  $\omega_0 = 314$  рад/с и  $\delta_0 = 0$ , (4) можно представить в виде:

$$\delta(t) = 2\pi \left( 50t - \frac{17455}{\varepsilon_0} \ln(\cos 0,000955 \varepsilon_0 t + 3 \sin 0,000955 \varepsilon_0 t) \right).$$

Таким образом, измеренное датчиком потери питания СД значение  $\varepsilon_0$  может быть использовано для прогнозирования моментов времени ОАВР и САВР.

Отметим, что для механизмов с  $\gamma > 2$  аналитические зависимости  $\omega(t)$  могут приближенно быть получены путем разложения функций  $arctg$  и  $\ln$  из правой части уравнений табл. 1 в ряд Тейлора в окрестности точки  $\omega_0 = 314$  рад/с.

В случае, когда относительный начальный момент сопротивления пренебрежимо мал, решение дифференциальных уравнений (2) упрощается, и для всех  $\gamma$  могут быть получены точные аналитические зависимости  $\omega(t)$  и  $\delta(t)$  (см. табл. 2, рис. 1).

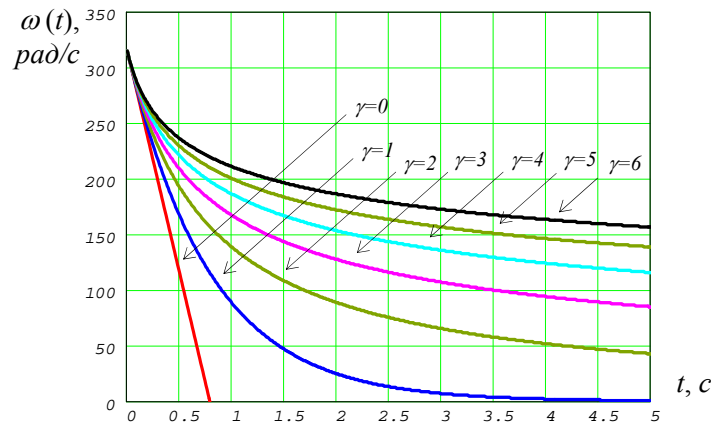
Таблица 2

Аналитические зависимости  $\omega(t)$  и  $\delta(t)$  при  $m'_{mp} = 0$ 

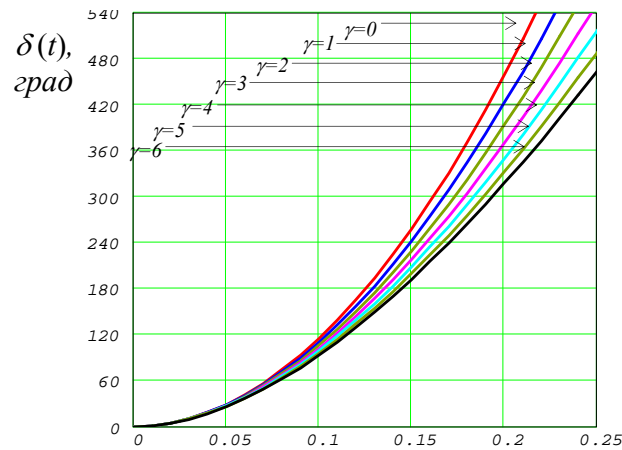
Тип механизма	Закон изменения угловой скорости $\omega(t)$ , рад/с	Закон изменения угла выбега $\delta(t)$ , рад
$\gamma = 0$	$\omega(t) = \omega_0 \left( 1 - \frac{k_{32}}{\tau_j} t \right)$	$\delta(t) = \omega_0 \frac{k_{32}}{2\tau_j} t^2 + \delta_0$
$\gamma = 1$	$\omega(t) = \omega_0 e^{-\frac{k_{32}t}{\tau_j}}$	$\delta(t) = \omega_0 t + \omega_0 \frac{\tau_j}{k_{32}} \left( e^{-\frac{k_{32}t}{\tau_j}} - 1 \right) + \delta_0$
$\gamma = 2$	$\omega(t) = \frac{\omega_0}{1 + \frac{k_{32}}{\tau_j} t}$	$\delta(t) = \omega_0 t - \omega_0 \frac{\tau_j}{k_{32}} \ln \left( 1 + \frac{k_{32}}{\tau_j} t \right) + \delta_0$
$\gamma = 3$	$\omega(t) = \frac{\omega_0}{\left( 1 + 2 \frac{k_{32}}{\tau_j} t \right)^{\frac{1}{2}}}$	$\delta(t) = \omega_0 t + \omega_0 \frac{\tau_j}{k_{32}} \left( 1 - \left( 1 + 2 \frac{k_{32}}{\tau_j} t \right)^{\frac{1}{2}} \right) + \delta_0$
$\gamma = 4$	$\omega(t) = \frac{\omega_0}{\left( 1 + 3 \frac{k_{32}}{\tau_j} t \right)^{\frac{1}{3}}}$	$\delta(t) = \omega_0 t + \omega_0 \frac{\tau_j}{2k_{32}} \left( 1 - \left( 1 + 3 \frac{k_{32}}{\tau_j} t \right)^{\frac{2}{3}} \right) + \delta_0$

Окончание табл. 2

Тип механизма	Закон изменения угловой скорости $\omega(t)$ , рад/с	Закон изменения угла выбега $\delta(t)$ , рад
$\gamma = 5$	$\omega(t) = \frac{\omega_0}{\left(1 + 4 \frac{k_{32}}{\tau_j} t\right)^{\frac{1}{4}}}$	$\delta(t) = \omega_0 t + \omega_0 \frac{\tau_j}{3k_{32}} \left(1 - \left(1 + 4 \frac{k_{32}}{\tau_j} t\right)^{\frac{3}{4}}\right) + \delta_0$
$\gamma = 6$	$\omega(t) = \frac{\omega_0}{\left(1 + 5 \frac{k_{32}}{\tau_j} t\right)^{\frac{1}{5}}}$	$\delta(t) = \omega_0 t + \omega_0 \frac{\tau_j}{4k_{32}} \left(1 - \left(1 + 5 \frac{k_{32}}{\tau_j} t\right)^{\frac{4}{5}}\right) + \delta_0$



а)



б)

Рис. 1. Графики зависимостей: а) – угловой скорости выбега  $\omega(t)$  различных механизмов для случая  $m'_{mp} = 0$ ; б) – угла выбега  $\delta(t)$  различных механизмов для случая  $m'_{mp} = 0$

Путем решения уравнений из табл. 2, приняв  $\delta(t) = 360^\circ$  и  $\delta_0 = 0^\circ$ , можно определить моменты времени первого проворота вектора  $E_{\delta_0}$  относительно вектора  $U_c$  для механизмов различных типов при  $m'_{mp} = 0$ . Результаты расчета представлены в таблице 3.

Таблица 3

**Время САВР для выбега механизмов различных типов при  $m'_{mp} = 0$**

Тип механизма	Время САВР (с) при начальном угловом ускорении выбега механизма (рад/с <sup>2</sup> )					
	$\varepsilon_0 = 40$	$\varepsilon_0 = 120$	$\varepsilon_0 = 180$	$\varepsilon_0 = 250$	$\varepsilon_0 = 320$	$\varepsilon_0 = 400$
$\gamma = 0$	0,5605	0,3236	0,2642	0,2242	0,1982	0,1772
$\gamma = 1$	0,5673	0,3304	0,2711	0,2311	0,2051	0,1842
$\gamma = 2$	0,5739	0,3371	0,2777	0,2377	0,2117	0,1908
$\gamma = 3$	0,5805	0,3436	0,2842	0,2442	0,2182	0,1972
$\gamma = 4$	0,5870	0,3500	0,2906	0,2505	0,2244	0,2035
$\gamma = 5$	0,5935	0,3563	0,2968	0,2567	0,2305	0,2095
$\gamma = 6$	0,5998	0,3625	0,3029	0,2627	0,2365	0,2154

Как видно из табл. 3, если не учитывать тип приводного механизма, рассчитанный момент времени синфазного АВР может содержать существенную погрешность (разброс угла несинхронного включения СД максимален при  $\varepsilon_0 = 400$  рад/с<sup>2</sup> и находится в диапазоне  $-172^\circ \dots +103^\circ$ ). Если учесть возможное неблагоприятное отклонение времени срабатывания секционного выключателя, угол включения СД на резервный источник питания с большой вероятностью может выйти за пределы допустимой зоны. Кроме того, как показал анализ, недопустимо пренебрегать значением начального момента сопротивления механизма  $m'_{mp}$ , особенно для агрегатов с  $\gamma > 2$ . Приблизительно тип  $\gamma$  механической характеристики агрегата может быть определен по информационным отсчетам изменения частоты ЭДС группы двигателей на этапе выбега, а методика определения величины  $m'_{mp}$  для отдельного СД приведена в [7]. Таким образом, можно сделать вывод о том, что на этапе внедрения устройства быстродействующего АВР синхронных двигателей необходимо определить  $m'_{mp}$  всех двигателей, находящихся на секции шин и приближенный тип механической характеристики  $\gamma$  ЭСД для учета этих величин в алгоритме самозапуска ЭСД.

### Литература

1. Голоднов Ю.М. Самозапуск электродвигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Георгиади В.Х. Упрощенный расчет режима группового выбега электродвигателей //Промышленная энергетика. – 1985. – № 5. – С. 42-45.
3. Курганов В.В., Крышнев Ю.В. Анализ экспериментальных данных опытов выбега мощных синхронных двигателей //Современные проблемы машиноведения. Тез. докл. МНТК. – Гомель: Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», 2002. – С. 117.
4. Курганов В.В., Крышнев Ю.В. Исследование условий обеспечения самозапуска синхронных электродвигателей при быстродействующем АВР //Энергетика. Из-

- вестия высших учебных заведений и энергетических объединений стран СНГ. – 2001. – № 2. – С. 40-43.
5. Пат. 2471 ВУ, МПК. Способ автоматического включения резервного питания потребителей, содержащих синхронные электродвигатели /Курганов В.В. //Афіцыйны бюлетэнь /Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 1999. – № 4.
  6. Раух Я.Я., Хитров А.И., Кабанов В.В. Учет нагрузки при выбеге электродвигателей 6-10 кВ //Промышленная энергетика. – 1981. – № 10. – С. 24-26.
  7. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1984.

*Получено 11.10.2002 г.*