

млн.т., 2010 г. – 442 млн.т., 2020 г. – 480 млн.т.) в России [3] убеждает в возрастании роли трубопроводного транспорта нефти и газа в ближайшем будущем.

В мировой и отечественной энергетике нет тенденции увеличения выпуска новых электрических машин взамен отработавших срок, поэтому продление срока службы старых машин на 20–30 лет дает большой экономический эффект.

Средний коэффициент готовности турбогенератора в США составляет 65 %, считается, что его можно повысить до 85 %. Согласно расчетов института электроэнергетики США (EPRI) повышение готовности на 1 % для турбогенератора 500 Мвт дает годовой экономический эффект в 1 млн.долл.

Специалисты фирмы Toshiba (Япония) утверждают, что успешная диагностика повреждений может увеличить срок службы генератора почти на 40 % сверх номинального.

Сказанное убеждает в актуальности технического диагностирования состояния эксплуатируемого силового электрооборудования, которое должно обеспечить:

- своевременный вывод электрооборудования в ремонт;
- снижение числа аварийных выходов из строя;
- повышение коэффициента готовности;
- продление срока службы электрооборудования.

Особенно важно это в условиях рыночной экономики, связывающих прибыли с надежностью работы оборудования; конкурентной борьбы фирм, заставляющей строго выполнять гарантии, данные потребителю; жесткой системы страхования от аварий.

Обобщающие научные публикации в мировой и отечественной литературе по контролю силового электрооборудования [1,2] показывают, что успешное решение задач диагностирования можно обеспечить разработкой, освоением и внедрением автоматизированных экспертных и интеллектуальных систем контроля и диагностики по комплексу параметров.

Причем, для выявления медленно развивающихся дефектов достаточен *периодический контроль*, а быстроразвивающиеся дефекты можно обнаружить только при *непрерывном контроле*.

Однако далеко не все дефекты поддаются определению во вращающейся электрической и рабочей машине, многие из них можно установить только при ее остановке.

#### *Литература*

1. Алексеев Б.А. Определение состояния (диагностика) крупных турбогенераторов. – М.: ЭНАС, 1997. – 140 с.
2. Алексеев Б.А. Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов. – М.: ЭНАС, 1998. – 140 с.
3. Назаров В.И., Наливкин В.Д., Сверчков Г.П. Экономическая оценка ресурсов нефти и газа России // Геология нефти и газа. – 1997. – N 10. – С. 15–25
4. Айвз Дж.млад. Активизация строительства трубопроводов в мире // Нефтегазовые технологии. – 1998. – N 2. – С.5–12

## **ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ АВР СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

**В. В. Курганов, Ю. В. Крышнев**

*Гомельский государственный технический университет  
им. П. О. Сухого, Республика Беларусь*

Наиболее эффективным способом сохранения динамической и результирующей устойчивости синхронных двигателей (СД) при внезапных нарушениях электроснабжения является быстродействующий автоматический ввод резервного питания (БАВР) [1]. Если на потерявшей питание секции шин присутствует группа двигателей и сторонняя

нагрузка, выбег всех двигателей довольно длительное время протекает по одинаковым характеристикам с параметрами обобщенного эквивалентного СД – коэффициентом загрузки  $k$ , и электромеханической постоянной времени  $T_j$ , определяемыми для суммарной двигательной и сторонней нагрузки с учетом соотношения их мощностей. Изменение частоты ЭДС эквивалентного СД на обесточенной секции шин следует считать наиболее информативным признаком потери питания, так как амплитуда ЭДС возбужденного СД при выбеге снижается медленно. Согласно уравнению движения, угловая скорость вращения СД после потери питания зависит от момента сопротивления приводимых механизмов  $M_c$  и постоянной времени  $T_j$  (момент и угловая скорость выражены в относительных единицах, причем за базовые приняты номинальный момент  $M_{ном}$  и синхронная угловая скорость СД  $\omega_0$ ):

$$-m_c = T_j \frac{ds}{dt}, \quad (1)$$

где  $s$  – скольжение эквивалентного СД.

Используя аналитическую формулу для определения момента сопротивления различных механизмов [2,3], можно в относительных единицах записать дифференциальное уравнение, являющееся исходным для определения частоты ЭДС эквивалентного СД при выбеге:

$$-m_{mp} - (k_s - m_{mp})\omega^\gamma = T_j \frac{d\omega}{dt}, \quad (2)$$

где  $m_{mp}$  – начальный момент сопротивления механизма, зависящий от трения;  $\gamma$  – показатель степени, характеризующий данный механизм.

Для механизмов с практически постоянным моментом сопротивления  $\gamma = 0$ . Тогда из (2), переходя к абсолютным единицам, получаем:

$$\omega = \omega_0 \left( 1 - \frac{k_s}{T_j} t \right), \quad (3)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вектора ЭДС эквивалентного СД, рад/с;  $t$  – текущее время от начала выбега эквивалентного СД.

Угловое ускорение при выбеге эквивалентного СД определяется как производная:

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = -\omega_0 \frac{k_s}{T_j}. \quad (4)$$

Наиболее распространенные значения  $T_j$  для двигателей 6–10 кВ составляют 2–6 с. При наличии сторонней нагрузки, питающейся от общих шин с СД, диапазон углового ускорения составляет от 300 до 70 рад/с<sup>2</sup>. В режиме возникновения дефицита активной мощности в энергосистеме угловое ускорение всегда меньше 30 рад/с<sup>2</sup>.

При совместном рассмотрении (3) и (4) можно записать:

$$\omega = \omega_0 - \varepsilon t. \quad (5)$$

Для определения характера изменения угла вектора ЭДС при выбеге эквивалентного СД необходимо проинтегрировать уравнение (5):

$$\varphi = \int_0^t (\omega_0 - \varepsilon t) dt = \omega_0 t - \frac{\varepsilon t^2}{2}. \quad (6)$$

За время  $t$  вектор напряжения резервного источника изменится на угол  $\varphi_0 = \omega_0 t$ .

Угол рассогласования  $\delta$  между векторами основного ( $E_{\delta\theta}$ ) и резервного ( $U_c$ ) источников питания можно определить как

$$\delta = \varphi_0 - \varphi = \frac{\varepsilon t^2}{2} + \delta_0 = \omega_0 \frac{k_3}{2T_j} t^2 + \delta_0, \quad (7)$$

где  $\delta_0$  – угол между векторами  $U_c$  и  $E_{\delta\theta}$  в режиме, предшествовавшем свободному выбегу эквивалентного СД.

Скольжение выбегающего СД можно определить из выражения:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega(t)}{\omega_0} = \frac{\omega_0 - (\omega_0 - \varepsilon t)}{\omega_0} = \frac{\varepsilon t}{\omega_0}. \quad (8)$$

Из (4) и (8) следует  $s = k_3 \frac{t}{T_j}$ . Тогда для случая  $\delta_0 = 0$ , получим  $\delta = 0.5\omega_0 s t$ .

При срабатывании устройства БАВР самозапуск синхронных двигателей без гашения поля обеспечивается в следующих случаях [1]:

1. Опережающее АВР (ОАВР), когда угол включения  $\delta$  меньше критического значения  $\delta_{кр} \approx 0.5\pi$ . Располагаемое время действия ОАВР при максимальном ускорении  $\varepsilon = 300$  рад/с<sup>2</sup> составляет менее 0.13 с.

2. Синфазное АВР первого проворота ротора (САВР–1), когда  $\delta = (2 \pm 0.5)\pi$ . Располагаемое время САВР–1 при  $\varepsilon = 300$  рад/с<sup>2</sup> составляет 0.2 – 0.23 с.

3. Синфазное АВР второго проворота ротора (САВР–2), когда  $\delta = (4 \pm 0.5)\pi$ . Располагаемое время САВР–2 при максимальном угловом ускорении составит 0.29 – 0.31 с.

Во всех перечисленных режимах ток включения двигателей при самозапуске не должен превышать допустимого значения. Наибольший сверхпереходной ток в статоре двигателя появляется в момент включения СД в противофазу, т.е. когда  $\delta = \pi$  и определяется по формуле:

$$I_{\text{вклmax}}(s) = \frac{U_c + E_{\delta\theta}}{x_c + x_d(s)} \approx \frac{2U_c}{x_c + x_d(s)}, \quad (9)$$

где  $x_c$  – сопротивление системы,  $x_d(s)$  – сопротивление СД, зависящее от скольжения.

Исходя из алгоритма БАВР синхронных электродвигателей, оценим токи включения эквивалентного СД в самых неблагоприятных случаях – в моменты противофаз векторов  $U_c$  и  $E_{\delta\theta}$ , т.е. когда  $\delta = \delta_1 = \pi$  и  $\delta = \delta_2 = 3\pi$ .

Для максимального углового ускорения ( $\varepsilon = 300$  рад/с<sup>2</sup>) углам  $\delta_1$  и  $\delta_2$  соответствуют моменты времени  $t_{1\text{min}} = 0.13$  с и  $t_{2\text{min}} = 0.26$  с. Из (8) получим:

$$s_{1\text{max}} = \frac{\varepsilon_{\text{max}}}{\omega_0} t_{1\text{min}} = 0.124;$$

$$s_{2\text{max}} = \frac{\varepsilon_{\text{max}}}{\omega_0} t_{2\text{min}} = 0.248.$$

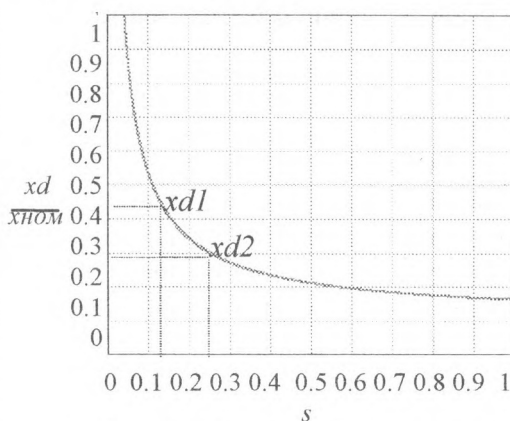


Рис. 1. Усредненная зависимость сопротивления синхронного двигателя от скольжения

По графику [2,3] усредненной зависимости сопротивления синхронного двигателя от

скольжения, изображенному на рис. 1 определяем, что  $s_{1max}$  соответствует  $x_{d1} = 0.463x_{ном}$ , а  $s_{2max}$  соответствует  $x_{d2} = 0.3x_{ном}$ . Этим значениям соответствуют максимальные токи включения, определяемые по (9) (примем для упрощения  $x_c = 0$ , т.к.  $x_d \gg x_c$ ):

$$I_{вкл1} = \frac{2U}{0.463x_{ном}} = 4.32 \cdot I_{ном} \approx 0.86 \cdot I_{пуск};$$

$$I_{вкл2} = \frac{2U}{0.3x_{ном}} = 6.66 \cdot I_{ном} \approx 1.33 \cdot I_{пуск}.$$

Известно, что для двигателей мощностью до 2 МВт допустимый ток включения  $I_{вкл доп} \leq 1.7 I_{пуск}$ , а для двигателей большой мощности  $I_{вкл доп} \leq 1.18 I_{пуск}$ . Можно сделать вывод, что для СД мощностью менее 2 МВт при БАВР токи включения не приведут к повреждению статорной обмотки, а для двигателей большой мощности алгоритм реализации БАВР должен предусматривать переключение СД на резервный источник только в моменты времени, когда угол  $\delta$  находится в пределах  $\delta_{доп} = \pm 90^\circ$ .

#### Литература

1. Патент РБ № 2471. Способ автоматического включения резервного питания потребителей, содержащих синхронные электродвигатели В.В. Курганов. – Опубл. в Б.И., № 4, 1999 г.
2. Голоднов Ю.М. Самозапуск электродвигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1984.

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНФАЗНОГО АВР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ ВЕНТИЛЯТОРНОГО ТИПА

В. В. Курганов, Ю. В. Крышнев

Гомельский государственный технический университет  
им. П. О. Сухого, Республика Беларусь

В настоящее время на многих промышленных производствах с непрерывным технологическим процессом используются механизмы с вентиляторной механической характеристикой момента сопротивления – центробежные насосы, турбокомпрессоры, газодувки, вентиляторы и т.д.. Обеспечение самозапуска электродвигателей при нарушениях электроснабжения является необходимой мерой из-за угрозы расстройства технологического процесса таких производств. Характер изменения угловой скорости вращения эквивалентного СД при свободном выбеге в относительных единицах синхронной частоты вращения СД  $\omega_0$  и номинального момента на валу  $M_{ном}$  описывается дифференциальным уравнением:

$$-m_{mp} - (k_s - m_{mp})\omega^\gamma = T_j \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

где  $k_s$  – коэффициент загрузки эквивалентного СД;  $T_j$  – электромеханическая постоянная времени;  $m_{mp}$  – приведенный начальный момент сопротивления механизмов при  $\omega = 0$ ;  $\gamma=2$  для механизмов с вентиляторной характеристикой момента сопротивления.

Из уравнения (1) можно получить зависимость частоты ЭДС СД от времени выбега: