

**ОПИСАНИЕ  
ИЗОБРЕТЕНИЯ  
К ПАТЕНТУ**  
(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



(19) **ВУ** (11) **2471**

(13) **С1**

(51)<sup>6</sup> Н 02J 9/06

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПАТЕНТНЫЙ  
КОМИТЕТ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

(54) **СПОСОБ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЗЕРВНОГО  
ПИТАНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ, СОДЕРЖАЩИХ СИНХРОННЫЕ  
ДВИГАТЕЛИ**

(21) Номер заявки: 960278  
(22) 03.06.1996  
(46) 30.12.1998

(71) Заявитель: Гомельский политехнический институт им. П.О.Сухого (ВУ)  
(72) Автор: Курганов В.В. (ВУ)  
(73) Патентообладатель: Гомельский политехнический институт имени П.О.Сухого (ВУ)

(57)

Способ автоматического включения резервного питания потребителей, содержащих синхронные двигатели, заключающийся в отключении поврежденного основного источника, определении фазового угла  $\delta$  расходящихся векторов напряжения резервного источника и ЭДС синхронного двигателя путем измерения временных интервалов несовпадения знаков полуволн этих напряжений, определении момента включения выключателя резервного питания, включении выключателя резервного питания, отличающийся тем, что при определении фазового угла  $\delta$  запоминают четыре первых временных интервала, последовательно рассчитывают среднюю скорость снижения частоты ЭДС синхронного двигателя, номер полупериода последнего измерения, скорректированное значение скорости снижения частоты ЭДС синхронного двигателя, значение текущего времени от начала выбега двигателя, величину временного интервала, соответствующего начальному углу  $\delta_n$ , и время, в течении которого угол  $\delta$  достигнет значения  $90^\circ$ , по формулам

$$\epsilon' = [(a+d) - (b+c)]/4;$$

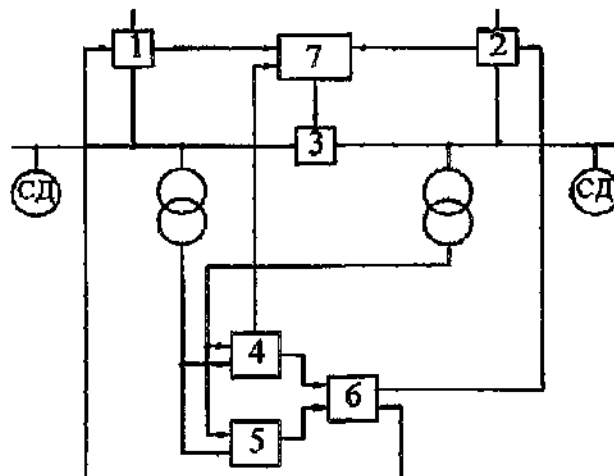
$$i = (d-b)/(4\epsilon') + 1;$$

$$\epsilon = \epsilon' [1 - 0,01(i-1)];$$

$$t_n = 0,01 \cdot i;$$

$$\tau = d - \epsilon i^2;$$

$$t = \sqrt{(0,5 - \tau \cdot 10^{-4}) / \epsilon},$$



**ВУ 2471 С1**

# ВУ 2471 С1

где  $\epsilon'$  - средняя скорость снижения частоты ЭДС синхронного двигателя, Гц/с;

a, b, c и d - измеренные значения четырех первых временных интервалов, мкс;

i - номер полупериода последнего измерения;

$\epsilon$  - скорректированное значение скорости снижения частоты ЭДС синхронного двигателя, Гц/с;

$t_n$  - значение текущего времени от начала выбега двигателя, с;

$\tau$  - временной интервал, соответствующий начальному углу  $\delta_n$ , мкс;

t - время, в течение которого угол  $\delta$  достигнет значения  $90^\circ$ , с,

проверяют выполнение условия

$$t \geq t_n + t_b + \sigma + t_m,$$

где  $t_b$  - собственное время включения резервного выключателя, с;

$\sigma$  - среднеквадратичное отклонение времени  $t_b$ , с;

$t_m$  - время вычисления значения t, с,

и при выполнении данного условия включают выключатель резервного питания, в противном случае - рассчитывают максимальное, минимальное и среднее время, в течение которого угол  $\delta$  достигнет значения  $360 \pm 90^\circ$  и  $720 \pm 90^\circ$ , а также время задержки включения резервного выключателя по формулам

$$t_{\max} = \sqrt{(A + 0,5) / \epsilon + q_1},$$

$$t_{\min} = \sqrt{(A - 0,5) / \epsilon + q_2},$$

$$t_{\text{ср}} = (t_{\max} + t_{\min}) / 2,$$

$$t_3 = t_{\text{ср}} - t_n - t_b - t_m,$$

где  $t_{\max}$ ,  $t_{\min}$  и  $t_{\text{ср}}$  - соответственно максимальное, минимальное и среднее время, в течение которого угол  $\delta$  достигнет значения  $360 \pm 90^\circ$  и  $720 \pm 90^\circ$ , с;

$A = 2\pi \cdot \tau \cdot 10^{-4}$  ( $n=1$  для  $\delta = 360 \pm 90^\circ$ ,  $n=2$  для  $\delta = 720 \pm 90^\circ$ );

$q_1 = q_2 = 0$  - для приводных механизмов с постоянным моментом сопротивления и  $q_1 = 0,011(A + 0,5)$ ,  $q_2 = 0,011(A - 0,5)$  - для приводных механизмов с вентиляторной механической характеристикой;

$t_3$  - время задержки включения резервного выключателя, с,  
проверяют выполнение условий

$$t_{\max} - t_{\text{ср}} \geq \sigma;$$

$$t_3 \geq 0$$

и в случае их выполнения при  $n=1$  или  $n=2$  осуществляют выдержку времени, равную  $t_3$ , после чего включают резервный выключатель.

(56)

1. А.с. СССР 1136255, МПК Н 02J 9/06, 1985.
2. А.с. СССР 1359854, МПК Н 02J 9/06, 1987.
3. А.с. СССР 1292108, МПК Н 02J 9/06, 1987.
4. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. - М.: Высш. шк., 1991. - С. 350-357.
5. А.с. СССР 1422303, МПК Н 02J 9/06, 1988 (прототип).

Изобретение относится к электроэнергетике и может быть использовано для автоматического включения резервного питания потребителей, содержащих синхронные электродвигатели.

Известно устройство для автоматического ввода резервного питания, содержащее блоки измерения величины угла, скорости и ускорения угла рассогласования фаз напряжений контролируемых источников питания, а также решающий блок и блок управления [1].

Известно также устройство для автоматического ввода резервного питания потребителей с синхронными двигателями, содержащее фазочувствительный блок, блок распознавания момента включения резервного источника и блок управления [2].

Известно также устройство для синхронного быстродействующего автоматического включения резервного питания потребителей для подстанций с двигательной нагрузкой, содержащее блок измерения угла между векторами контролируемых напряжений, блок фиксации заданного значения угла, блок задания времени включения резервного выключателя и нелинейный блок, обрабатывающий угол опережения, соответствующий времени включения резервного выключателя [3].

В известных устройствах, реализующих способ включения резервного питания основные блоки (расознавания, решающий и нелинейный) требуют предварительной настройки на конкретный состав электродвигателей и их приводных механизмов, участвующих в самозапуске. Жесткие алгоритмы управления этими блоками не позволяют оперативно выбрать оптимальный вариант восстановления резервного питания до момента первой противофазы, после

# ВУ 2471 С1

первого или второго проворотов ротора эквивалентного двигателя, а также требуют применения быстродействующих выключателей, поскольку все они построены по известному способу синхронизации генераторов, включаемых на параллельную работу [4].

Наиболее близким к изобретению является способ автоматического включения резервного питания потребителей, содержащих синхронные двигатели, заключающийся в отключении поврежденного основного источника, определении фазового угла  $\delta$  расходящихся векторов напряжения резервного источника и ЭДС синхронного двигателя путем измерения временных интервалов несовпадения знаков полувольт этих напряжений, определении момента включения выключателя резервного питания [5].

Известный способ предполагает использование специального тиристорного выключателя 6-10 кВ, который в десятки раз дороже электромеханических выключателей и существенно уступает им по показателям надежности, а также область применения его ограничена относительно маломощными электродвигателями.

Задачей изобретения является повышение надежности и расширения функциональной возможности за счет адаптации и самонастройки.

Согласно изобретению при определении фазового угла  $\delta$  запоминают четыре первых временных интервала, последовательно рассчитывают среднюю скорость снижения частоты ЭДС синхронного двигателя, значение текущего времени от начала выбега двигателя, величину временного интервала, соответствующего начальному углу  $\delta_n$ , и время, в течении которого угол  $\delta$  достигнет значения  $90^\circ$ , по формулам:

$$\varepsilon' = [(a+d) - (b+c)] / 4,$$

$$i = (d-b) / (4\varepsilon') + 1,$$

$$\varepsilon = \varepsilon' [1 - 0,01(i-1)],$$

$$t_n = 0,01 \cdot i,$$

$$\tau = d - \varepsilon i^2$$

$$t = \sqrt{(0,5 - \tau \cdot 10^{-4}) / \varepsilon},$$

где  $\varepsilon'$  - средняя скорость снижения частоты ЭДС синхронного двигателя, Гц/с; a, b, c и d - измеренные значения четырех первых временных интервалов, мкс;

i - номер полупериода последнего измерения;

$\varepsilon$  - скорректированное значение скорости снижения частоты ЭДС синхронного двигателя, Гц/с;

$t_n$  - значение текущего времени от начала выбега двигателя, с;

$\tau$  - временной интервал, соответствующий начальному углу  $\delta_n$ , мкс;

t - время, в течении которого угол  $\delta$  достигнет значения  $90^\circ$ , с, проверяют выполнение условия:

$$t \geq t_n + t_b + \sigma + t_m,$$

где  $t_b$  - собственное время включения резервного выключателя, с;

$\sigma$  - среднеквадратичное отклонение времени  $t_b$ , с;

$t_m$  - время вычисления значения t, с,

и при выполнении данного условия включают выключатель резервного питания, в противном случае - рассчитывают максимальное, минимальное и среднее время, в течение которого угол  $\delta$  достигнет значения  $360 \pm 90^\circ$  и  $720 \pm 90^\circ$ , а также время задержки включения резервного выключателя по формулам:

$$t_{\max} = \sqrt{(A + 0,5) / \varepsilon + q_1},$$

$$t_{\min} = \sqrt{(A - 0,5) / \varepsilon + q_2},$$

$$t_{\text{ср}} = (t_{\max} + t_{\min}) / 2,$$

$$t_3 = t_{\text{ср}} - t_n - t_b - t_m,$$

где  $t_{\max}$ ,  $t_{\min}$  и  $t_{\text{ср}}$  - соответственно максимальное, минимальное и среднее время, в течении которого угол  $\delta$  достигнет значения  $360 \pm 90^\circ$  и  $720 \pm 90^\circ$ , с;

$A = 2n - \tau \cdot 10^{-4}$  ( $n=1$  для  $\delta=360 \pm 90^\circ$ ,  $n=2$  для  $\delta=720 \pm 90^\circ$ );

$q_1 = q_2 = 0$  для приводных механизмов с постоянным моментом сопротивления и  $q_1 = 0,011(A + 0,5)$ ,  $q_2 = 0,011(A - 0,5)$  для приводных механизмов с вентиляторной механической характеристикой;

$t_3$  - время задержки включения резервного выключателя, с, проверяют выполнение условий:

$$t_{\max} - t_{\text{ср}} \geq \sigma,$$

$$t_3 \geq 0,$$

и в случае их выполнения для  $n=1$  или  $n=2$  осуществляют выдержку времени, равную  $t_3$ , после чего включают резервный выключатель.

На фигуре изображена функциональная блок-схема автоматического включения резервного питания потребителей в системе электроснабжения, состоящей из вводных выключателей 1 и 2 и

# ВУ 2471 С1

двух секций шин, разделенных секционным выключателем 3. Датчик 4 угла рассогласования одноименных фаз напряжений секций шин и датчик 5 скорости снижения частоты напряжения получают сигналы от измерительных трансформаторов напряжения. Выходы датчиков 4 и 5 соединены с входами блока 6 пороговых элементов, а выходы последнего подключены к цепям отключения выключателей 1 и 2. Блок-контакты вводных выключателей включают в работу блок вычислений 7, измерительный вход которого соединен с выходом датчика угла рассогласования. Выходной сигнал с блока вычислений воздействует на цепи включения секционного выключателя.

В нормальном режиме работы схемы электроснабжения секционный выключатель 3 отключен и каждая секция шин отдельно питает свой узел нагрузки с синхронными двигателями СД.

При повреждении источника питания на одном из вводов создаются условия для срабатывания блока 6 и выключатель 1 или 2 отключает поврежденный источник. В конце операции отключения блок-контакты выключателя разрешают работу блока 7 вычислений, в качестве которого может быть использовано программно-управляемое устройство, осуществляющее процесс обработки цифровой информации и управления объектами, например, микроконтроллер типа КР1830ВЕ51. Блок 7 в течении 4-х полупериодов промышленной частоты считывает информацию с датчика 4 угла рассогласования и по определенному алгоритму в темпе процесса вычисляет и прогнозирует располагаемые интервалы времени, в течении которых угол рассогласования достигнет значений  $90^\circ$ ,  $360 \pm 90^\circ$  и  $720 \pm 90^\circ$ . Затем сравнивает располагаемые интервалы с текущим временем от начала выбега двигателей и собственным временем включения секционного выключателя и при выполнении определенных условий подает команду на включение резервного источника питания.

Ниже приводится математическое обоснование способа и алгоритм работы блока вычислений 7.

При потере питания и свободном выбеге электродвигатели переходят в генераторный режим и частота ЭДС на шинах уменьшается в соответствии с частотой вращения эквивалентного синхронного двигателя (в случае группового выбега).

ЭДС синхронного двигателя (СД) при выбеге изменяется по закону:

$$e = E_m \sin[\varphi(t) - \delta_n],$$

где  $\delta_n$  - угол рассогласования в начале выбега, зависящий от рабочего угла нагрузки СД и времени отключения поврежденного источника питания;

$$\varphi(t) = \omega t; \quad \omega = d\varphi / dt = 2\pi f.$$

Так как  $f = f_c - \epsilon t$ , то

$$\varphi = \int_0^t 2\pi(f_c - \epsilon t) dt = \omega_c t - 2\pi\epsilon t^2 / 2.$$

$$\text{Следовательно} \quad e = E_m \sin(\omega_c t - \pi\epsilon t^2 - \delta_n),$$

где  $\omega_c = 2\pi f_c$  - циклическая частота сети;

$\epsilon$  - скорость снижения частоты ЭДС, Гц/с;

$t$  - текущее время выбега, с.

Напряжение на резервном источнике питания изменяется по закону:

$$u = U_m \sin \omega_c t.$$

Угол рассогласования одноименных фаз ЭДС двигателя и напряжения резервного питания также изменяется во времени по следующему закону:

$$\delta = \omega_c t - (\omega_c t - \pi\epsilon t^2 - \delta_n) = \delta_n + \pi\epsilon t^2. \quad (1)$$

Подавать резервное питание на выбегающий СД без гашения его поля можно при условии, если угол  $\delta$  кратен  $2\pi$  или отличается от этого значения не более, чем на  $\pm 90^\circ$ , т.е.:

$$\delta = 2\pi n \pm \pi / 2, \quad (2)$$

где  $n$  - целое число полных проворотов ротора СД относительно вектора напряжения сети ( $n \leq 2$ ).

При этом величина тока включения и электромагнитного момента при включении на валу СД не превысят допустимых значений для любой мощности СД.

Условно назовем быстродействующим автоматическим включением резерва (БАВР) при  $n=0$  и синфазным автоматическим включением резерва (САВР) первого и второго циклов при  $n=1$  и  $n=2$  соответственно.

Располагаемое время от начала выбега до момента разрешенной подачи резервного питания прогнозируется, т.е. определяется из (1) и (2) по выражению:

$$t_p = \sqrt{(2n \pm 0,5 - \delta_n / \pi) / \epsilon}. \quad (3)$$

Данное выражение справедливо для двигателей с постоянным моментом сопротивления на валу, при  $\epsilon = \text{const}$ . Для механизмов с вентиляторной характеристикой момента сопротивления, зависящей от частоты вращения двигателя, например центробежные насосы, скорость  $\epsilon$  также является функцией времени.

# ВУ 2471 С1

Момент сопротивления, а следовательно и скорость  $\varepsilon$  снижаются пропорционально квадрату частоты вращения двигателя:

$$\varepsilon / \varepsilon_n = f_c^2 / f_n^2,$$

где  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_n$  - скорость снижения частоты ЭДС начальная и после  $n$ -го поворота соответственно;  $f_c$ ,  $f_n$  - частота ЭДС двигателя номинальная и после  $n$ -го поворота соответственно.

Частота  $f_n$  за время  $t$  станет равной  $f_n = f_c - \varepsilon t$ . Средняя частота ЭДС двигателя за интервал времени  $t$ :

$$f_{cp} = \frac{f_c + f_n}{2} = \frac{f_c + f_c - \varepsilon t}{2} = f_c - 0,5\varepsilon t.$$

Средняя скорость снижения частоты:

$$\varepsilon_{cp} = \varepsilon (f_{cp} / f_c)^2 = \varepsilon [(f_c - 0,5\varepsilon t) / f_c]^2.$$

При  $f_c = 50$  Гц значение  $\varepsilon_{cp} = \varepsilon (1 - 0,01\varepsilon t)^2$ .

Выразим располагаемое время для механизмов с вентиляторной характеристикой момент сопротивления через  $t'$  по формуле (3):

$$t' = \sqrt{\frac{2n \pm 0,5 - \delta_n / \pi}{\varepsilon (1 - 0,01\varepsilon t)^2}} = \frac{t}{1 - 0,01\varepsilon t}.$$

Располагаемое время  $t'$  отличается от  $t$  на величину:

$$\Delta t = t' - t = \frac{t}{1 - 0,01\varepsilon t} - t = \frac{0,01\varepsilon t^2}{1 - 0,01\varepsilon t} = \frac{0,01\varepsilon \left[ \sqrt{(2n \pm 0,5 - \delta_n / \pi) / \varepsilon} \right]^2}{1 - 0,01\varepsilon t} = \frac{0,01(2n \pm 0,5 - \delta_n / \pi)}{1 - 0,01\sqrt{\varepsilon(2n \pm 0,5 - \delta_n / \pi)}}.$$

Анализ показал, что при реально возможном диапазоне изменений  $\varepsilon$  от 10 до 60 Гц/с знаменатель данного выражения изменяется незначительно от 0,96 до 0,85, поэтому время  $t'$  с погрешностью не более 0,5% определяется по упрощенному выражению:

$$t' = t + 0,011(2n \pm 0,5 - \delta_n / \pi). \quad (4)$$

Для БАВР при  $n=0$  вторым слагаемым можно пренебречь, т.к. погрешность при самом неблагоприятном случае не превышает 5% и идет в запас надежности. Таким образом, для осуществления БАВР или САВР необходимо при выбеге СД в темпе процесса измерить величины  $\varepsilon$  и  $\delta_n$ , затем вычислить  $t$  или  $t'$  с учетом затраченного времени на измерения и расчет, а также собственного времени срабатывания коммутационного аппарата реализовать необходимую выдержку времени и подать команду на включение выключателя резервного питания.

Среднее собственное время включения секционного выключателя и его среднеквадратичное отклонение известны из паспортных или экспериментальных данных.

Для осуществления БАВР после расчета располагаемого времени по (3) необходимо проверить соблюдение условия:

$$t \geq t_n + t_b + \delta + t_m, \quad (5)$$

где  $t_n$  - значение текущего времени от начала выбега двигателя, с;

$t_b$  - собственное время включения резервного выключателя, с;

$\delta$  - среднеквадратичное отклонение времени  $t_b$ , с;

$t_m$  - время вычисления значения  $t$ , с.

Если данное условие не выполняется, то проверяется возможность осуществления САВР. Для этого необходимо вычислить максимальное, минимальное и среднее располагаемое время, учитывая допустимость отклонения от синфазности на угол не более  $\pm 90^\circ$ .

Обозначим в формулах (3) и (4)  $A = 2n - \delta_n / \pi$ , тогда

$$\left. \begin{aligned} t_{max} &= \sqrt{(A + 0,5) / \varepsilon} + 0,011(A + 0,5); \\ t_{min} &= \sqrt{(A - 0,5) / \varepsilon} + 0,011(A - 0,5); \\ t_{cp} &= (t_{max} - t_{min}) / 2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Возможность САВР проверяется по первому условию:

$$t_{max} - t_{cp} \geq \delta \quad (7)$$

При выполнении данного условия рассчитывается время задержки включения резервного выключателя, необходимое для соблюдения баланса времени по выражению:

$$t_3 = t_{cp} - t_m - t_b - t_m. \quad (8)$$

Осуществимость САВР проверяется по 2-му условию:

$$t_3 \geq 0 \quad (9)$$

# ВУ 2471 С1

Таким образом, при выполнении обоих условий по истечению временной задержки, равной  $t_3$  подают команду на включение резервного источника. При этом в начале проверяется САРВ первого цикла при  $n=1$ , затем второго цикла при  $n=2$ .

Для механизмов с постоянным моментом сопротивления на валу, например, поршневые насосы, прокатные станы и т.д., расчет  $t$  выполняют по формулам (6), но без учета вторых слагаемых.

В данном способе расчет искомым величин производится по измеренному в начале выбега углу  $\delta$ . Угол  $\delta$  пропорционален временным интервалам  $\tau_i$ ; несовпадения знаков синусоид ЭДС двигателя и напряжения сети, поскольку

$$\delta = 2\pi f \cdot \tau_i. \quad (10)$$

Из (1) следует, что при  $\delta_n=0$

$$\delta = \pi \epsilon t^2 \quad (11)$$

Определим первую и вторую производные функции (11):

$$\delta' = 2\pi \epsilon t; \delta'' = 2\pi \epsilon \text{ или } \epsilon = \delta'' / 2\pi.$$

Следовательно, величина скорости снижения частоты ЭДС пропорциональна второй производной функции угла  $\delta$  или его ускорению.

Поскольку интервалы  $\tau_i$  измеряются через равные промежутки времени, нетрудно показать, что для определения  $\epsilon$  необходимо выполнить как минимум 3 измерения  $\tau_i$  и из последующего значения  $\tau_i$  вычесть предыдущее, затем операцию вычитания повторить с полученными разностями.

Подставив в (11) значение угла  $\delta$  из (10), получим:

$$2\pi f \tau_i = \pi \epsilon t^2 \text{ или } \tau_i = \epsilon t^2 / 2f.$$

Так как интервал между очередными измерениями  $\tau_i$  равен полупериоду промышленной частоты ( $1 / 2f$ ), то:

$$t^2 = (i / 2f)^2,$$

где  $i$  - номер полупериода, в котором измеряется  $\tau_i$ .

Следовательно, 
$$\tau_i = \frac{\epsilon}{2f} \left( \frac{i}{2f} \right)^2 = \frac{\epsilon i^2}{(2f)^3}.$$

При  $f=50$  Гц значение  $\tau_i = \epsilon i^2 \cdot 10^{-6}$ , с или

$$\tau_i = \epsilon i^2, \text{ мкс} \quad (12)$$

Определим разность между разностями величин  $\tau_i$  трех смежных полупериодов:

$$\Delta\tau = (\tau_i - \tau_{(i-1)}) - (\tau_{(i-1)} - \tau_{(i-2)}) = \tau_i + \tau_{(i-2)} - 2\tau_{(i-1)}.$$

Подставив значение  $\tau_i$  из (12), получим

$$\Delta\tau = \epsilon [i^2 - (i-2)^2 - 2(i-1)^2] = 2\epsilon.$$

Отсюда

$$\epsilon_i = 0,5\Delta\tau = 0,5(\tau_i + \tau_{(i-2)} - 2\tau_{(i-1)}), \text{ Гц/с} \quad (13)$$

При выводе формулы (13) принято допущение, что измерение угла  $\delta$  происходит мгновенно через интервалы времени  $1 / 2f$ . Однако, процесс измерения  $\delta$  растянут во времени на величину  $\tau_i$ , которая дискретно возрастает по мере увеличения числа  $i$ . Следовательно, с возрастанием  $i$  увеличивается и погрешность измерения величины  $\epsilon_i$ , причем приращение скорости  $\Delta\epsilon_i$  (ускорение) пропорционально  $\epsilon_i t$ , где  $t=1/2f=0,01i$ .

Таким образом, для компенсации указанной погрешности и с учетом того, что среднее время  $t$  на участке от  $\tau_{(i-2)}$  до  $\tau_i$  равно  $0,01(i-1)$  скорректированное значение скорости снижения частоты:

$$\epsilon = \epsilon_i [1 - 0,01(i-1)]. \quad (14)$$

При неравенстве нулю начального угла  $\delta_n \neq 0$ , значения  $\tau_i$  в смежных полупериодах возрастают на постоянную величину, равную  $\tau_n$  и согласно (13) не влияют на результат расчета величины скорости  $\epsilon$ .

Выразим начальный угол  $\delta_n$  через временной интервал  $\tau_n$  из (10):

$$\delta_n = 2\pi f \tau_n.$$

Подставив значение  $\delta_n$  в выражение (3) и учитывая, что  $f=50$  Гц и размерность  $\tau_n$  принята в микросекундах, получим

$$t_p = \sqrt{(2n \pm 0,5 - \tau_n \cdot 10^{-4}) / \epsilon}, \text{ с} \quad (15)$$

В процессе измерения периодически поступающих временных интервалов  $\tau_i$ , начальный угол  $\delta_n$  и номер  $i$  полупериода измерения, как правило неизвестны. Определим по двум измерениям  $\tau_i$  значения  $i$  и  $\delta_n$ :

$$\tau_i - \tau_{(i-1)} = \epsilon [i^2 - (i-1)^2] = \epsilon (2i-1).$$

Отсюда

$$i = 0,5 \cdot [(\tau_i - \tau_{(i-1)}) / \epsilon + 1]. \quad (16)$$

# ВУ 2471 С1

По величинам  $\varepsilon$  и  $i$  согласно (12) определяют интервал  $\tau_{i0}$ , соответствующий углу  $\delta_H = 0$ , затем величину  $\tau_H$  по известному значению  $\tau_i$  рассчитывают, как:

$$\tau_H = \tau_i - \tau_{i0} \quad (17)$$

Текущее время выбега СД от начала измерения составит:

$$\tau_H = 0,001 \cdot i, \text{ с.} \quad (18)$$

Расчет указанных параметров по трем значениям  $\tau_i$  имеет существенный недостаток, так как не учитывает погрешность формирователей импульсов несовпадения знаков синусоид блока 4. Действительно, при температурном смещении нуля у одного из нуль-органов формирователя предыдущее значение интервала  $\tau_i$ , будет, например, уменьшено на величину смещения, а следующее - увеличено на такую же величину или наоборот. Указанный недостаток устранится, если измерения  $\tau_i$  производить в течение четного числа полупериодов, например, 4 и величины  $\varepsilon$  и  $i$  определять как среднее из двух полученных результатов расчета.

Например, даны величины  $a, B, c, d$ , соответствующие  $\tau_i$  четырем смежным полупериодам. Тогда по (13) и (16), имеем

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= 0,5(b+d-2c); \quad \varepsilon_2 = 0,5(a+c-2b); \\ \varepsilon_{cp} &= \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} = \frac{b+d-2c+a+c-2b}{4} = \frac{(a+d)-(b+c)}{4}; \quad (19) \\ i_1 &= 0,5\left(\frac{d-c}{\varepsilon} + 1\right); \quad i_2 = \left[0,5\left(\frac{c-b}{\varepsilon} + 1\right)\right] + 1; \\ i &= \frac{i_1 + i_2}{2} = \frac{d-b}{4\varepsilon} + 1. \quad (20) \end{aligned}$$

Рассмотрим алгоритм управления АВР на конкретном примере.

В память вычислительного блока 7 - контроллера введены следующие постоянные величины:

$t_B = 0,12\text{с}$  - собственное время отключения секционного выключателя;

$\delta = \pm 0,03\text{с}$  - среднеквадратичное отклонение времени  $t_B$ ;

$t_M = 0,013\text{с}$  - машинное время, затрачиваемое контроллером на выполнение программы расчета.

По сигналу отключения выключателя ввода контроллер переходит в режим измерения и расчета.

В процессе измерения угла  $\delta$  в регистры контроллера с периодичностью 0,01 с поступила запись 4-х временных интервалов  $\tau_i$ , равных, мкс: 1658; 1761; 1892 и 2038. Последовательность вычислений приводится для механизмов с вентиляторной механической характеристикой, например, насосные агрегаты нефтеперекачивающей станции.

Алгоритм вычисления следующий.

1. Определяется средняя скорость снижения частоты ЭДС по (19)

$$\varepsilon_{cp} = [(1685+2038) - (1761+1892)] / 4 = 17,5 \text{ Гц/с.}$$

2. Определяется номер полупериода последнего измерения  $\tau_i$  по (20)

$$i = (2038-1761) / (4 \cdot 17,5) + 1 = 4,96.$$

3. Вносят корректировку в значение скорости по (14)

$$\varepsilon = 17,5[1-0,01(4,96-1)] = 16,8 \text{ Гц/с.}$$

4. Определяется текущее время от начала выбега двигателей по (18)

$$t_H = 0,01 \cdot 4,96 = 0,05 \text{ с.}$$

5. Определяется временной интервал  $\tau_{i0}$  при  $\delta_H = 0$  по (12)

$$\tau_{i0} = 16,8 \cdot 5^2 = 420 \text{ мкс.}$$

6. Определяется интервал  $\tau_H$  и соответствующий ему начальный угол  $\delta_H$  по (17)

$$\tau_H = 2038-420 = 1618 \text{ мкс., или } \delta_H = 0,51 \text{ рад.}$$

7. Определяется располагаемое время БАВР при  $n=0$  по (15)

$$t = \sqrt{(2 \cdot 0 + 0,5 - 1618 \cdot 10^{-4})} / 16,8 = 0,142 \text{ с.}$$

8. Проверяется возможность осуществления БАВР по условию (5)

$$t_H + \delta + t_M + t_H = 0,12+0,03+0,013+0,05=0,213 \text{ с;} \\ 0,142 > 0,213.$$

Так как данное условие не выполняется, то БАВР запрещают.

9. Определяется максимальное, минимальное и среднее располагаемое время САВР первого цикла  $n=1$  по выражениям (6):

$$A = 2 \cdot 1 - 1618 \cdot 10^{-4} = 1,8382;$$

$$t_{1\max} = \sqrt{(1,8382 + 0,5)} / 16,8 + 0,011(1,8382 + 0,5) = 0,399 \text{ с;}$$

# BY 2471 C1

$$t_{1\min} = \sqrt{(1,8382 - 0,5) / 16,8} + 0,011(1,8382 - 0,5) = 0,297 \text{ с};$$

$$t_{1\text{ср}} = (0,399 + 0,297) / 2 = 0,348 \text{ с}.$$

10. Проверяется возможность САВР по условию (7):

$$0,399 - 0,348 > 0,03$$

11. Определяется время задержки по (8) и возможность осуществления САВР по условию (9)

$$t_3 = 0,348 - (0,12 + 0,013 + 0,05) = 0,165 \text{ с. } 0,165 > 0.$$

12. Так как оба условия выполняются, то программным способом реализуется временная задержка  $t_3 = 0,165$  с. и после истечения этого времени подается команда на включение секционного выключателя.

В случае невозможности осуществить САВР первого цикла проверяют возможность САВР второго цикла. Для этого расчет повторяется, начиная с п.9 при  $n=2$ . В данном примере для второго цикла САВР увеличивается располагаемое время  $t_{2\text{ср}} = 0,519$  с., но уменьшается разность  $t_{2\text{max}} - t_{2\text{ср}} = 0,037$  с.

При невозможности осуществления САВР ни в одном из проверяемых циклов быстродействующее АВР запрещается, при этом остается в работе штатная схема небыстродействующего АВР.

Таким образом, данный способ АВР существенно увеличивает надежность за счет точного прогнозирования оптимального варианта восстановления резервного питания двигателей без потери их динамической устойчивости с учетом реального времени включения выключателя и его погрешности. Данный способ применим практически для любых типов выключателей, что расширяет его функциональную возможность, при этом в отличие от известных способов, в случае чрезмерного увеличения скорости изменения угла  $\delta$  и большего времени включения выключателя или его погрешности, действие АВР будет автоматически запрещено и не произойдет опасного включения двигателей в противофазу.

Составитель Е.В. Федоров  
Редактор В.Н. Позняк  
Корректор Т.Н. Никитина