

УДК 621.316.729(088.8)

Б.Т. Кононов, А.Н. Малыш, М.С. Кравченко

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОТРАБОТКИ ПОСТОЯННОГО ВРЕМЕНИ ОПЕРЕЖЕНИЯ В ИМПУЛЬСНЫХ СИНХРОНИЗАТОРАХ

*Излагаются схемные решения, использование которых позволит обеспечить высокую точность отработки углов опережения в устройствах автоматической точной синхронизации во всем диапазоне допустимых значений разности частот. Для повышения точности отработки постоянного времени опережения в устройствах автоматической точной синхронизации при измерении параметров синхронизации следует переходить от амплитудных к частотным методам определения частот скольжения и углов между синхронизируемыми напряжениями.*

**Ключевые слова:** синхронизация дизель-генераторов, параметры синхронизации, синхронизатор

### Введение

**Постановка проблемы.** Поддержание требуемого качества электрической энергии в системах электроснабжения во многом зависит от обеспечения возможности осуществлять включение синхронных генераторов на параллельную работу без возмущений, вызываемых ошибками в определении угловой частоты скольжения и угла между синхронизируемыми напряжениями при проведении этой операции. Для определения значений параметров синхронизации и выбора момента времени включения выключателя генератора в применяющихся в настоящее время синхронизаторах используются аналоговые устройства, принцип действия которых основан на косвенных методах измерения частоты скольжения и текущего угла между напряжениями работающего и включаемого генераторов. Аналоговые устройства синхронизации, в которых информацию о параметрах синхронизации получают с помощью выпрямленного напряжения биений, имеют принципиальный недостаток, особо сильно проявляющийся даже при несущественной разнице амплитуд синхронизируемых напряжений. При наличии такой разности амплитуд напряжений огибающая напряжения биений не проходит через ноль, что приводит к ошибкам при определении частоты скольжения и текущего угла между напряжениями, а тем самым и к ошибке при определении момента подачи команды на включение выключателя генератора устройством синхронизации. Попытка уравнивания амплитуд синхронизируемых напряжений для устранения отмеченного недостатка приводит к затягиванию процесса синхронизации, что усугубляет возможные последствия дефицита вырабатываемой электрической энергии. В то же время переход от аналоговых к дискретным методам определения параметров синхронизации сдерживается сложностью реализации предлагаемых технических решений основных блоков устройств синхронизации.

**Анализ литературы.** Импульсный автоматический синхронизатор, сведения о котором изложены в [1], содержит в своем составе формирователи импульсов, триггеры, фильтр низких частот и релейный блок. В этом устройстве команда на включение выключателя генератора подается в момент совпадения по фазе напряжения большей частоты с напряжением меньшей частоты, сдвинутого в сторону отставания на угол, пропорциональный скольжению синхронизируемых напряжений и времени включения.

Во-первых, поскольку любое синхронизируемое напряжение может иметь большую или меньшую частоты, для технической реализации предлагаемого решения необходимо иметь два однотипных блока по определению факта, заключающегося в том, какая из частот большая.

Во-вторых, для реализации сдвига по фазе напряжения меньшей частоты в этом синхронизаторе используются одновибраторы, настройка которых сопряжена с серьезными затруднениями.

Кроме того, при малых угловых частотах скольжения углы сдвига по фазе малы, что приводит, в конечном счете, к низкой точности определения момента подачи команды в предлагаемом устройстве.

**Цель статьи** – изложение новых технических решений, использование которых позволит обеспечить высокую точность отработки углов опережения в устройствах автоматической точной синхронизации во всем диапазоне допустимых значений разности частот.

### Основная часть

Прежде всего, рассмотрим возможность исключения провалов напряжения и бросков уравнивающего тока, вызываемых низкой точностью отработки угла опережения, с помощью следующего устройства синхронизации. Схема этого синхронизатора приведена на рис. 1, 2 приведены временные диаграммы, поясняющие работу синхронизатора.

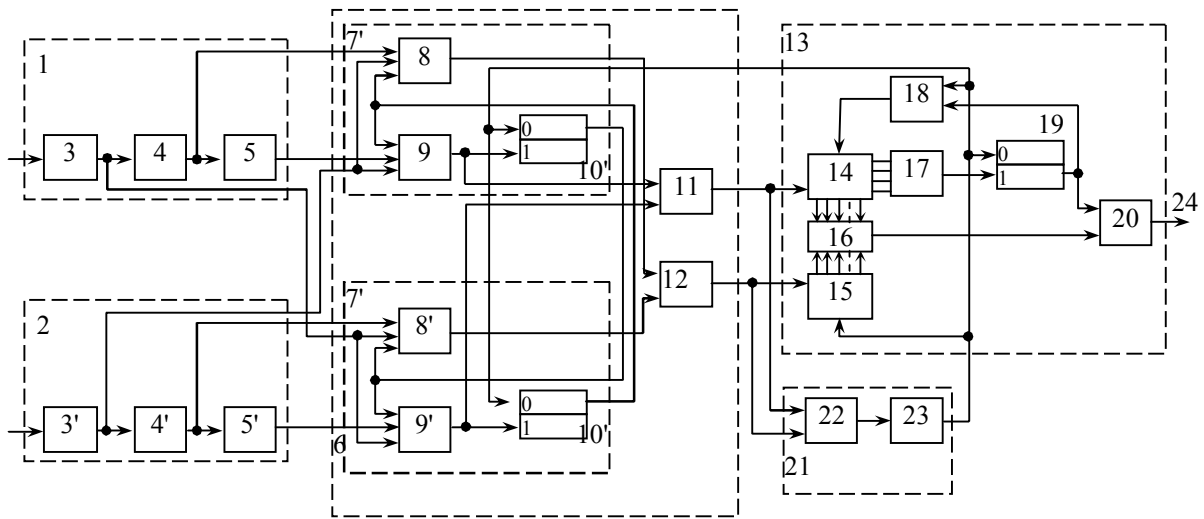


Рис. 1. Импульсный синхронизатор

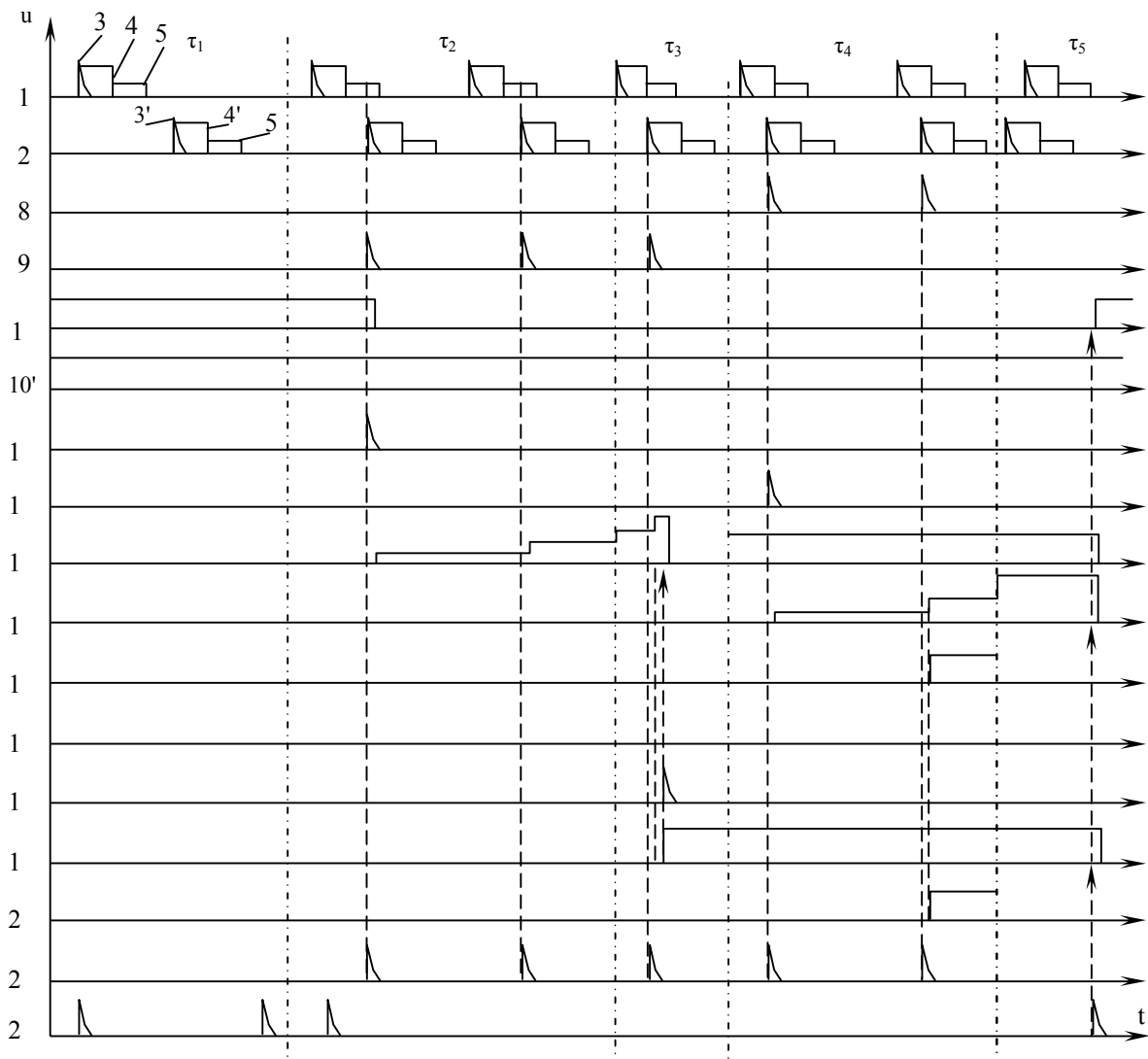


Рис. 2. Временные диаграммы работы синхронизатора

В состав синхронизатора входят: входные блоки 1,2, содержащие формирователи управляющих импульсов 3,3', формирователи прямоугольных импульсов 4,4', формирователи вспомогательных импульсов 5,5', переключатель каналов 6, определители знака

скольжения 7,7', содержащие первые 8,8' и вторые 9,9' схемы совпадения и триггеры 10, 10', переключатели каналов в составе первой 11 и второй 12 схем ИЛИ, блок включения 13 в составе первого 14 и второго 15 счетчиков, схемы совпадения 16, дешифрато-

ра 17, собирательной схемы 18, триггера 19 и выходной схемы совпадения 20, блок сбрасывающих импульсов 21 в составе собирательной схемы 22 и генератор сбрасывающих импульсов 23.

На временных диаграммах рис. 2 цифры вдоль оси ординат соответствуют номерам блоков синхронизаторов. Временные диаграммы работы блоков 3, 4, 5 и 3', 4', 5' для наглядности совмещены и показаны в виде временных диаграмм у блоков 1, 2, а синусоиды входных напряжений генератора  $U_G$  и сети  $U_C$  на рис. 2 не показаны. Для определенности принято, что частота сети  $f_C$  больше частоты генератора  $f_G$ .

Взаимное положение импульсов блоков 3, 3', 4, 4', и 5, 5', образующих своеобразный пакет, видно из диаграммы блоков 1, 2. Управляющие импульсы блоков 3, 3' привязаны по фазе к синусоидам  $u_G(t)$  и  $u_C(t)$ . Эти импульсы формируются в момент перехода синусоиды через ноль в начале положительного полупериода. Основные и вспомогательные импульсы блоков 4, 4' и 5, 5' имеют одинаковую длительность

$$\tau_0 = \tau_B = \tau'_0 = \tau'_B = \tau. \quad (1)$$

Неодинаковость частот синхронизируемых напряжений приводит к тому, что пакеты импульсов генератора и сети с течением времени смещаются относительно друг друга так, что пакет импульсов большей частоты (в данном случае – сети) своим управляющим импульсом от блока 3' как бы надвигаются на пакет импульсов меньшей частоты со стороны заднего фронта вспомогательного импульса блока 5. Это показано на временных диаграммах блоков 2 и 2' для интервалов времени  $\tau_1 - \tau_5$ . В результате такого смещения управляющий импульс блока 3' последовательно проходит во времени сначала по вспомогательному прямоугольному импульсу блока 5, а затем по основному прямоугольному импульсу блока 4. Перемещение происходит не непрерывно, а дискретно – "шагами" на один шаг  $\Delta T$ , отнесенный к периоду меньшей частоты. Величина шага  $\Delta T$  равна разности периодов меньшей и большей частоты

$$\Delta T = T_M - T_B. \quad (2)$$

В предлагаемом устройстве совпадения импульсов блоков 3' и 5 (3 и 5' при другом разности частот) используются для оценки разности частот, а совпадения импульсов блоков 3' и 4 (3 и 4') – для построения постоянного времени опережения.

Оценка разности частот производится по числу  $N$  совпадений импульсов блоков 3' и 5 (3 и 5'). Для  $N$  справедливо равенство

$$N = \frac{\tau}{\Delta T} = \frac{\tau}{T_M - T_B} = \tau \frac{\tau}{f_B - f_M} = \tau \frac{f_M f_B}{f_S}, \quad (3)$$

где  $f_M$ ,  $f_B$  – значения меньшей и большей частот;  $f_S$  – значение частоты скольжения.

В процессе точной синхронизации частоты изменяются не более, чем на 5%. В связи с этим в (3) можно принять, что

$$\tau f_M f_B = K \approx \text{const}, \quad (4)$$

и считать  $N$  только функцией  $f_S$

$$N = K/f_S. \quad (5)$$

Если известна допустимая разность частот  $f_{S\text{доп}}$ , то условие, при котором синхронизация разрешается  $f_S \leq f_{S\text{доп}}$  примет вид

$$N \geq N_{\text{доп}} = K/f_{S\text{доп}}. \quad (6)$$

Для оценки разности частот, тем самым, можно использовать счетчик, подключаемый к схеме совпадения, на входы которой подаются импульсы блоков 3' и 5 (3 и 5'). Таким образом при  $f_S < f_{S\text{доп}}$  в счетчике должно быть записано число  $N > N_{\text{доп}}$ .

Команда на включение выключателя генератора подается в момент очередного совпадения импульсов блоков 3' и 4 (3 и 4') при условии, что число предыдущих совпадений было равным

$$\Delta N = N - N_{\text{доп}}. \quad (7)$$

Покажем, что время опережения  $t_{\text{оп}}$  при выполнении условия (7) будет постоянным. Примем, что разность частот в процессе движения управляющего импульса по вспомогательному и основному будет неизменной. При выполнении условия (6) и сделанном выше допущении команда на включение выключателя генератора подается в тот момент времени, когда до совпадения по фазе напряжений  $u_G$  и  $u_C$  (чему эквивалентно совпадение по фазе импульсов 3' и 3) число совпадений импульсов 3', 4 (3, 4') равно  $N_{\text{доп}}$ .

Действительно, исходя из (7), остаток совпадений равен

$$N - \Delta N = N_{\text{доп}}. \quad (8)$$

Время опережения  $t_{\text{оп}}$  равно произведению этого остатка на длительность периода  $T_M$  меньшей частоты

$$t_{\text{оп}} = N_{\text{доп}} T_M. \quad (9)$$

Учитывая (3), (4) и (7), представим соотношение (9) таким образом

$$t_{\text{оп}} = \frac{\tau f_M f_B}{f_{S\text{доп}}} T_M = \frac{\tau f_B}{f_{S\text{доп}}} \approx \text{const}. \quad (10)$$

Изложим особенности работы предложенного импульсного синхронизатора. Входные блоки 1, 2 формирователей импульсов формируют пакеты импульсов большей и меньшей частот в момент прохождения синусоид синхронизируемых напряжений через нулевую фазу. Формирователи основных импульсов 4, 4' запускаются по переднему фронту управляющих импульсов 3, 3', а формирователи вспомогательных импульсов 5, 5' запускаются по заднему фронту основных импульсов 4, 4'. Пока пакеты импульсов не перекрывают друг друга (интервал времени  $\tau_1$  на рис. 2) сигналы на выходах схем совпадения 8, 8', 9, 9', а значит и на выходах собирательных схем 11, 12, 22 отсутствуют, что дает возможность работы генератору 23 сбрасывающих импульсов, который устанавливает в состояние "0"

триггеры 10, 10' и первый 14 и второй 15 счетчики. Счетчик 15 устанавливается в состояние "0" импульсами генератора 23 непосредственно, а счетчик 14 – через собирательную схему 18. Сигналы с нулевых выходов триггеров 10, 10' подаются на входы схем совпадения 8', 9' и 8, 9, подготавливая их к срабатыванию в момент совпадения управляющих импульсов большей частоты с вспомогательными и основными импульсами меньшей частоты (интервал времени  $\tau_2$ ). При принятых условиях ( $f_C > f_T$ ) сначала происходит совпадение импульсов блоков 3' и 5, что приводит к срабатыванию второй схемы "И" 9, сигнал с выхода которой переводит триггер 10 в состояние "1", через схему "ИЛИ" 11 запускает счетчик 14, а через схемы "ИЛИ" 11 и 22 блокирует генератор импульсов 23. Переход триггера 10 в единичное состояние приводит переключатель в такое состояние, которое обеспечивает подачу на вход блока включения 13 в качестве импульсов большей частоты сигнала сети, а в качестве импульсов меньшей частоты сигналы генератора. При этом в работе остаются схемы совпадения 8 и 9, а схемы совпадения 8' и 9' блокируются.

Счетчик 14 производит подсчет импульсов, поступающих с выхода переключателя каналов. Если разность частот не превышает допустимое значение, то в счетчике 14 на интервале времени  $\tau_3$  накопится число  $N_{доп}$ , которое вызовет появление сигнала на выходе дешифратора 17 и, как следствие, переход в единичное состояние триггера 19. Переброс триггера 19 обеспечивает подготовку к включению выходной схемы совпадения 20. Сигнал с единичного выхода триггера 19, кроме того, через собирательную схему 18 подается на установочный вход счетчика 14, который сбрасывается в состояние "0" для того, чтобы сосчитать число "N" импульсов  $\Delta N$ , поступающих с выхода схемы "И" и равных остатку совпадений  $N - N_{доп}$ . К интервалу времени  $\tau_4$ , когда в счетчике записано число  $\Delta N$ , наступает совпадение импульсов блоков 3' и 4, что фиксируется схемой "И" 8. Сигналы с выхода этой схемы через вторую собирательную схему 12 поступают на счетчик 15. В момент накопления в счетчике числа  $\Delta N$  срабатывает схема совпадения 16, сигнал с выхода которой через схему "И" 20 проходит в цепь 24 включения выключателя генератора.

Если разность частот выше допустимой, то на интервале времени  $\tau_3$  число, которое записывается в счетчике 14, меньше, чем  $N_{доп}$ . В этом случае дешифратор 17 не сработает и триггер 19 остается в нулевом состоянии, блокируя схему "И" 20, что исключает включение выключателя генератора при записи в счетчике 15 числа равного числу в счетчике 14.

Расхождение импульсов блоков 3' и 4 (интервал  $\tau_5$ ) приводит к запиранию схемы совпадения 8 и 9 и, как следствие, деблокировку генератора импульсов 23, который первым же своим импульсом приведет схему синхронизатора в исходное состояние установив в "0" триггер 10, счетчики 14 и 15 и

подтвердит состояние "0" триггеров 10' и 19.

Погрешность в обработке угла опережения связана с возможными неточностями в настройке длительности импульсов на выходе формирователей импульсов. Действительно, исходя из соотношения (10), в случае если реальная длительность импульсов  $\tau$  отличается от расчетного значения  $\tau_{расч}$  величина угловой ошибки определяется из выражения

$$\Delta\delta_{ош} = \frac{(\tau_{расч} - \tau)f_B f_S}{f_{сдоп}} \quad (11)$$

Для отстройки от этой ошибки предлагается подавать команду на включение выключателя генератора в момент совпадения по фазе сдвинутых по фазе в сторону отставания напряжений генератора и сети, причем углы сдвига фаз пропорциональны времени включения и скольжению каждого из синхронизирующих напряжений по отношению к частоте, общей для обеих напряжений и заведомо большей каждой из синхронизируемых частот. Выбор одной и той же общей частоты для каналов сети и генератора позволяет избежать ошибки, связанной с необходимостью обеспечения одинаковой настройки длительности импульсов, формируемых на выходе формирователей. Схема синхронизатора, реализующего изложенное решение, приведена на рис. 3.

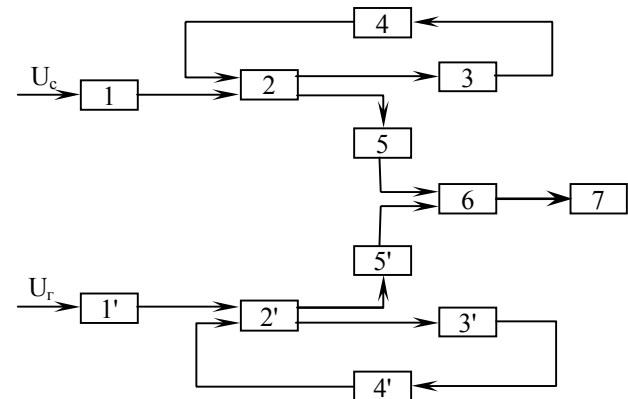


Рис. 3. Синхронизатор с постоянным временем опережения

На рис. 4 приведены временные диаграммы, иллюстрирующие его работу.

Синхронизатор содержит формирователи импульсов 1, 1', триггеры 2, 2', фильтры нижних частот 3, 3', управляемые импульсные генераторы 4, 4', инверторы фазы 5, 5', выходной триггер 6 и релейный блок 7. В формирователях импульсов 1, 1' синхронизируемые напряжения превращаются в последовательности управляющих импульсов (напряжения  $u_1$  и  $u_1'$  на временной диаграмме рис. 4), частоты следования которых равны угловой частоте сети  $\omega_C$  (или угловой частоте генератора  $\omega_T$ ). Каждый импульс перебрасывает триггер 2 (2') из состояния "1" в состояние "0". Управляемый импульсный генератор 4 (4') генерирует импульсы, поступающие на другой вход триггера 2 (2') и перебрасывающие его в состояние "1".

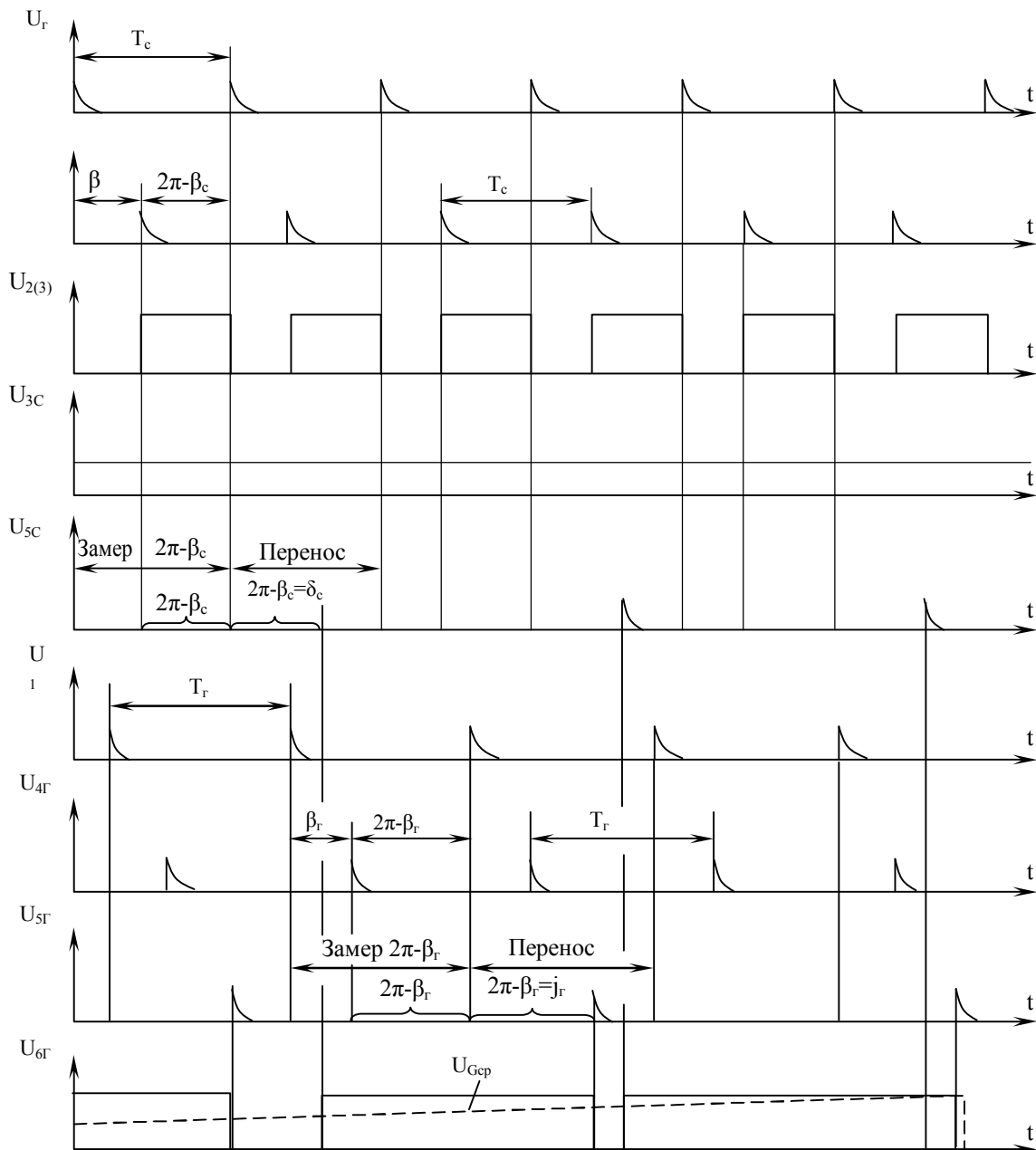


Рис. 4. Временные диаграммы работы синхронизатора с постоянным временем опережения

Частота следования этих импульсов равна

$$\omega_4 = \omega_0 - k_4 U_3 \quad (12)$$

где  $\omega_0$  – собственная частота импульсного генератора 4 (4') при отсутствии управляющего напряжения на его входе;  $k_4$  – коэффициент усиления генератора 4 (4');  $U_3$  – управляющее напряжение на выходе фильтра нижних частот 3 (3').

Напряжение  $U_3$ , поступающее на вход генератора 4 (4'), равно

$$u_3 = k_3 U_{2CP}, \quad (13)$$

где  $k_3$  – коэффициент усиления нижних частот;  $U_{2CP}$  – среднее значение напряжения на выходе триггера 2 (2'). Выбор величины  $U_{2CP}$  и значений коэффициентов  $k_3$  и  $k_4$  производится таким образом, чтобы в определенном частотном диапазоне

происходил автоматический захват частоты  $\omega_4$  на выходе управляемого импульсного генератора и ее подстройка к значениям частот  $\omega_C$  и  $\omega_{\Gamma}$ . В случае, если захват произошел, управляемый импульсный генератор начинает генерировать импульсы с частотой сети (генератора), сдвинутые по фазе в сторону отставания на угол  $\beta_C$  ( $\beta_{\Gamma}$ ) по отношению импульсной последовательности с выхода формирователя 1 (1'). Величина этого угла сдвига фаз пропорциональна требуемой величине управляющего напряжения, необходимого для подстройки частоты управляемого импульсного генератора.

При поступлении на входы триггера 2 (2') импульсных последовательностей, сдвинутых по фазе на угол  $\beta$ , напряжение на его выходе равно

$$U_{2CP} = k_2 (2\pi - \beta), \quad (14)$$

где  $k_2$  – коэффициент усиления триггера 2 (2').

Очевидно, угол отставания  $\beta$  пропорционален скольжению напряжения сети (генератора) по отношению к фиксированной частоте управляемого импульсного генератора  $\omega_0$

$$\begin{aligned}\beta_C &= k_\beta(\omega_C - \omega_0); \\ \beta_\Gamma &= k_\beta(\omega_\Gamma - \omega_0).\end{aligned}\quad (15)$$

Действительно, из формулы (14) следует, что

$$\beta = 2\pi - \frac{u_{2CP}}{k_2}, \quad (16)$$

а с учетом выражений (12) и (13)

$$\beta_C = 2\pi - \frac{\omega_C - \omega_0}{k_2 k_3 k_4}; \quad \beta_\Gamma = 2\pi - \frac{\omega_\Gamma - \omega_0}{k_2 k_3 k_4}. \quad (17)$$

Для того, чтобы углы отставания управляемых импульсных генераторов соответствовали зависимости

$$\gamma = k_\gamma(\omega_0 - \omega), \quad (18)$$

следует использовать не собственно углы  $\beta_C$  и  $\beta_\Gamma$ , а их дополнения до  $2\pi$ . Очевидно, что из соотношения (17) дополнения до углов  $\beta_C$  и  $\beta_\Gamma$  до  $2\pi$  равны

$$\gamma_C = 2\pi - \beta_C = \frac{\omega_0 - \omega_C}{k_2 k_3 k_4}; \quad \gamma_\Gamma = 2\pi - \beta_\Gamma = \frac{\omega_0 - \omega_\Gamma}{k_2 k_3 k_4}. \quad (19)$$

Операцию инвертирования фазы в соответствии с соотношением (19) выполняют инверторы фазы 5 (5'). Используя для запуска выходного триггера 6 сигналы с выходов инверторов фазы 5 (5'), получаем на выходе триггера 6 импульсную последовательность  $u_6$ . В момент совпадения фаз, сдвинутых на углы  $\gamma$  напряжений  $u_{5C}$ ,  $u_{5\Gamma}$ , напряжение на выходе триггера 6 меняется скачкообразно. Этот момент используется для подачи команды на включение выключателя генератора релейным блоком 7.

В момент подачи команды совпадают сдвинутые по фазе напряжения, а угол  $\delta$  между синхронизируемыми напряжениями равен

$$\delta = \gamma_\Gamma - \gamma_C = \frac{\omega_C - \omega_\Gamma}{k_2 k_3 k_4} = \frac{\omega_S}{k_2 k_3 k_4}. \quad (20)$$

обеспечив подбор коэффициентов  $k_2$ ,  $k_3$  и  $k_4$  так, чтобы имело место равенство

$$\frac{1}{k_2 k_3 k_4} = t_{\text{вкл}}, \quad (21)$$

получаем возможность отработки синхронизатором постоянного времени опережения. Важным преимуществом синхронизатора является возможность его работы во всем диапазоне допустимых значений угловой частоты скольжения  $\omega_S$ , в том числе и при  $\omega_S \approx 0$ .

## Выводы

1. Для повышения точности отработки постоянного времени опережения в устройствах автоматической точной синхронизации при измерении параметров синхронизации следует переходить от амплитудных к частотным методам определения частот скольжения и углов между синхронизируемыми напряжениями.

2. В импульсных синхронизаторах возможно получение постоянного времени опережения во всем возможном диапазоне угловых частот скольжения.

## Список литературы

1. Бобров Н.Н. Импульсный автоматический синхронизатор // *Электричество*. – 1967. – №3. – С. 42-54.

Поступила в редакцию 19.02.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Н. Чинков, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВІДРОБІТКУ ПОСТІЙНОГО ЧАСУ ВИПЕРЕДЖЕННЯ В ІМПУЛЬСНИХ СИНХРОНІЗАТОРАХ

Б.Т. Кононов, О.М. Малиш, М.С. Кравченко

Висловлюються схемні рішення, використання яких дозволить забезпечити високу точність відробітку кутів випередження в пристроях автоматичної точної синхронізації у всьому діапазоні допустимих значень різниці частот. Для підвищення точності відробітку постійного часу випередження в пристроях автоматичної точної синхронізації при вимірюванні параметрів синхронізації слід переходити від амплітудних до частотних методів визначення частот ковзання і кутів між напругою, що синхронізується.

**Ключові слова:** синхронізація дизель-генераторів, параметри синхронізацій, синхронізатор.

## AN INCREASE OF EXACTNESS OF WORKING OFF PERMANENT TIME OF PASSING IS IN IMPULSIVE SYNCHRONIZERS

B.T. Kononov, A.N. Malish, M.S. Kravchenko

Scheme decisions the use of which will allow to provide high exactness of working off the corners of passing in the devices of automatic exact synchronization in all of range of legitimate values of difference of frequencies are expounded. For the increase of exactness of working off permanent time of passing in the devices of automatic exact synchronization at measuring of parameters of synchronization it is necessary to pass om to the frequency methods of determination frequencies of peaks of sliding and corners between the synchronized tensions.

**Keywords:** synchronization of oil-electrical engines, parameters of synchronization, synchronizer.