

УДК 621.316.729(088.8)

Б.Т. Кононов, Ю.А. Кусакин, А.Н. Малыш

*Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков*

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

*Обосновывается возможность применения прямого метода измерения параметров синхронизации для повышения точности работы блоков уравнивания частотой и блока опережения устройства автоматической точной синхронизации.*

*синхронизация дизель-генераторов, параметры синхронизации, синхронизатор*

### Введение

**Постановка проблемы.** В системах электропитания разного назначения для обеспечения устойчивости при возрастании нагрузки предусматривается включение генераторов на параллельную работу. Успешное проведение этой операции, называемой синхронизацией, зависит от того, насколько точно выровнены частоты синхронизируемых напряжений и насколько точно обеспечено совпадение фаз этих напряжений к моменту замыкания контактов выключателя генератора. В устройствах автоматической точной синхронизации для выполнения этих процедур предусмотрены блок уравнивания частот и блок опережения. Ошибки, вызванные низкой точностью в процессе контроля и уравнивания частот синхронизируемых напряжений, а также ошибки в определении момента опережения для подачи команды на включение выключателя генератора приводят к появлению бросков уравнивающего тока в статорных цепях генераторов и к провалу напряжения на шинах электростанций. Эти возмущения негативно сказываются как на работе собственно генераторов, так и на работе потребителей электроэнергии. Автоматизация операций синхронизации с исключением при этом причин возможных возмущений является актуальной научно-технической задачей.

**Анализ литературы.** Вопросы, связанные с обеспечением требуемой точности выполнения условий синхронизации, рассматривались в работах [1, 2, 3]. При этом в [1] основное внимание уделялось обоснованию выбора параметров синхронизации, тогда как в [2, 3] рассматривались практические пути реализации требуемых соотношений. Однако использование для определения параметров синхронизации огибающей напряжения биений, как это предлагается в [1, 2, 3], не обеспечивает требуемую точность работы блока уравнивания частот и особенно блока опережения. Использование выпрямленного напряжения биений в устройствах ав-

томатической точной синхронизации оправдано только тогда, когда гарантировано равенство амплитуд синхронизируемых напряжений. Уже в случае, когда  $\Delta U = U_{\max 1} - U_{\max 2} \geq 0,02 U_{\text{ном}}$ , ошибка, связанная с определением периода биений  $T_S$  и угла между синхронизируемыми напряжениями  $\delta$ , составляет 20–30%, что недопустимо.

**Цель статьи** – обоснование возможности обеспечения требуемой точности работы основных блоков синхронизатора при использовании прямых методов измерения угловой частоты скольжения и угла между синхронизируемыми напряжениями.

### Основная часть

Основной особенностью предлагаемого прямого метода измерения параметров синхронизации является отстройка от возможной ошибки измерения, обусловленной неодинаковостью амплитуд синхронизируемых напряжений. По предлагаемому методу синусоидальные напряжения сети и генератора преобразуются в импульсные последовательности, жестко привязанные к моменту перехода напряжений через ноль в начале каждого периода. При неодинаковости частот синхронизируемых напряжений импульсные последовательности смещаются относительно друг друга, совпадая, когда фазовый угол между ними равен нулю или  $2\pi$ . Интервал времени, соответствующий времени между двумя соседними совпадениями по фазе импульсных последовательностей, равен периоду биений  $T_S$ , а фазовый угол между синхронизируемыми напряжениями равен  $2\pi$ . Той или иной части интервала времени  $T_S$  соответствует тот или иной угол  $\delta$  между синхронизируемыми напряжениями. Проиллюстрируем возможность применения прямого метода измерения для реализации основных блоков синхронизатора: блока управления частот и блока опережения.

Схема блока уравнивания частот приведена на рис. 1. На рис. 2 приведены временные диаграммы, объясняющие работу этого блока.

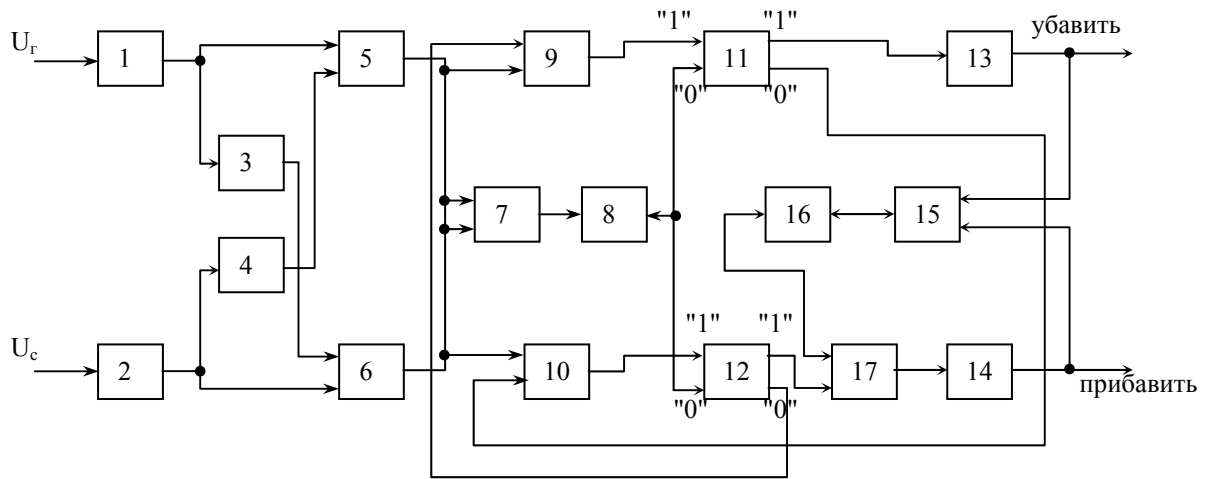


Рис. 1. Устройство уравнивания частот

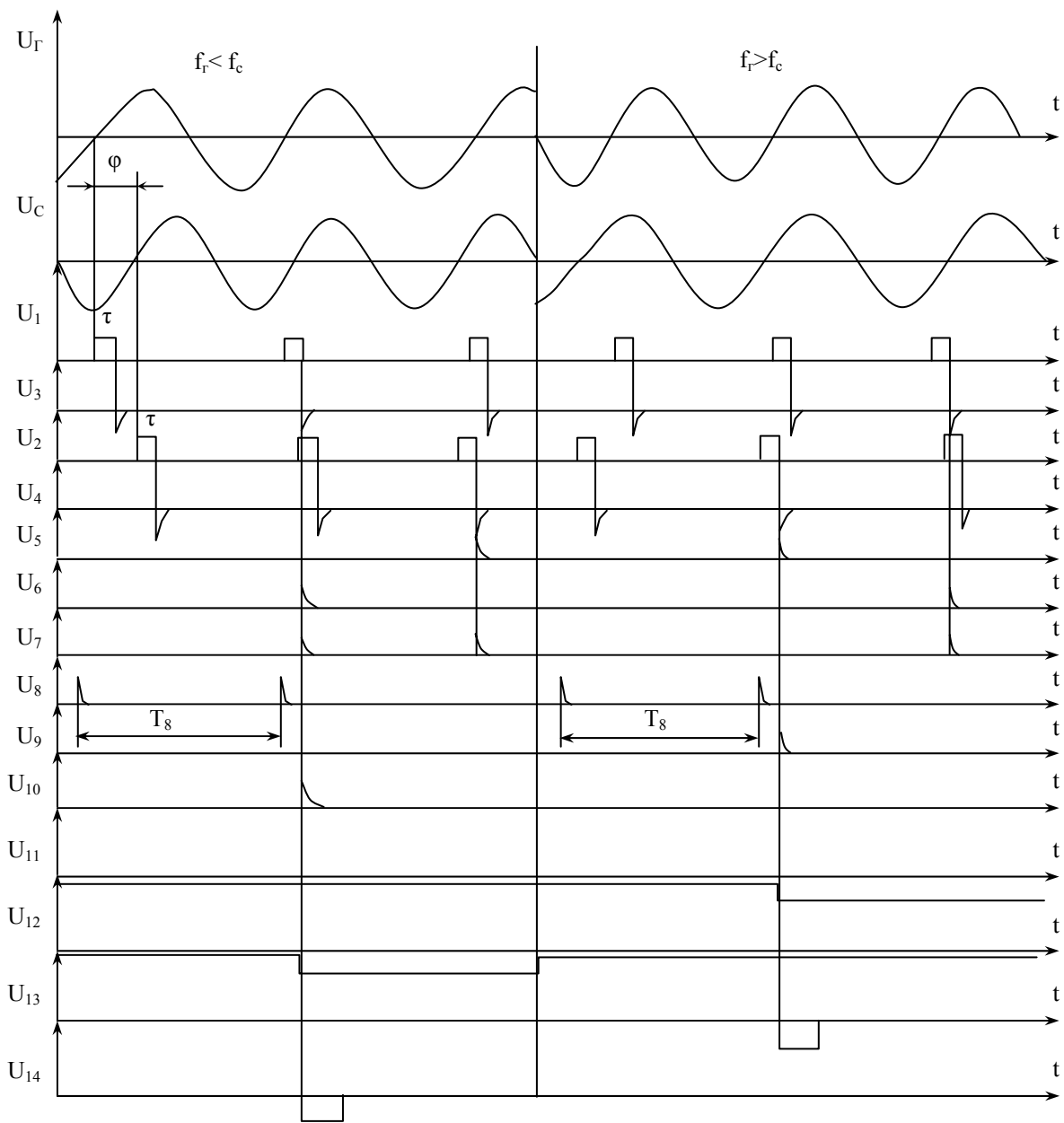


Рис. 2. Временные диаграммы устройства уравнивания частот

В состав блока уравнивания частот входят формирователи импульсов 1, 2; дифференцирующие блоки 3, 4; промежуточные схемы совпадения 5, 6, 7; генератор импульсов 8; схемы совпадения 9, 10; триггеры 11, 12; одновибраторы 13, 14; выходная собирательная схема 15; генератор импульсов 16, блокирующий зависание; собирательная схема 17, включенная на вход одновибратора. Напряжения генератора  $U_{Г}$  и сети  $U_{С}$  в формирователях импульсов 1, 2 преобразуются в последовательности прямоугольных импульсов постоянной длительности  $\tau$ , жестко привязанные к началу периода соответствующих синусоид (рис. 2). На входы промежуточных схем совпадения 5 и 6 поступают импульсные последовательности с выходов формирователей импульсов 1, 2 и дифференцирующих блоков 4, 3. Если частота генератора  $f_{Г}$  меньше частоты сети  $f_{С}$ , то при уменьшении текущего значения угла  $\delta$  между синхронизируемыми напряжениями  $\tau T_{С}$  и  $\tau T_{Г}$  имеет место совпадение импульсных последовательностей  $u_2$ ,  $u_3$ , и появляется сигнал на выходе схемы совпадения  $u_6$ . После прохождения момента совпадения фаз синхронизируемых напряжений имеет место факт совпадения импульсных последовательностей  $u_2$  и  $u_3$ . При этом появляется сигнал  $u_5$  на выходе промежуточной схемы совпадения 5. В случае, если частота генератора  $f_{Г}$  больше частоты сети  $f_{С}$ , то очередность срабатывания промежуточных схем совпадения меняется. В схеме совпадения 5 и 6 фактически фиксируется факт совпадения переднего фронта импульса большей частоты с импульсом меньшей частоты. Передний фронт импульса большей частоты как бы шагами приближается к импульсу меньшей частоты. При этом длина шага  $A$  равна разности периодов  $T_{М}$  и  $T_{Б}$ .

Сигналы с выходов схемы совпадения 5 и 6 через собирательную схему 7 подаются на вход генератора импульсов 8 и запирают его, прекращая тем самым подачу сигналов с выхода генератора импульсов на записывание ноль входа триггеров 11 и 12. Период  $T_8$  следования импульсов генератора импульсов 8 выбирается с таким расчетом, чтобы во всем диапазоне возможных частот скольжения он был меньше периода следования импульсов с выхода собирательной схемы 7. Фактически величина  $T_8$  выбирается меньшей величины периода скольжения  $T_S$ , определяемого частотой скольжения  $f_S$  синхронизируемых напряжений. Срабатывание любой из промежуточных схем совпадения 5, 6 обеспечивает перевод соответствующего триггера 11, 12 в состояние, характеризующее появле-

нием единицы на его единичном выходе. Если первым срабатывает триггер 11, то на его нулевом выходе сигнал исчезает, что предотвращает срабатывание схемы совпадения 10 и тем самым исключает возможность срабатывания триггера 12. Если же частота генератора  $f_{Г}$  меньше частоты сети  $f_{С}$ , то первой срабатывает схема совпадения 6, что вызывает срабатывание схемы совпадения 10 и перевод триггера 12 в единичное состояние. При этом блокируется срабатывание триггера 11, так как на входе схемы совпадения 9 нет сигнала с нулевого выхода триггера 12. Срабатывание триггеров 11, 12 обеспечивает срабатывание одновибраторов 13, 14. После срабатывания одновибратора 13 появляется сигнал  $u_{13}$  – "Прибавить частоту". Срабатывание одновибратора 14 приводит к появлению сигнала  $u_{14}$  – "Убавить частоту".

Срабатывание триггеров 11 и 12 в нулевое состояние осуществляется генератором импульсов 8, который запускается после исчезновения импульсов на выходе собирательной схемы 7 спустя время, равное периоду  $T_8$  следования импульсов 8. В случае, когда частота генератора  $f_{Г}$  равна частоте сети  $f_{С}$  и имеет место так называемое "зависание" синхронизируемых напряжений, отсутствуют сигналы с выходов обоих одновибраторов. При этом спустя интервал времени, равный периоду следования импульсов  $T_{16}$ , с выхода генератора импульсов 16 через собирательную схему 17 подается импульс на вход одновибратора 14, формируя команду "Прибавить частоту". Если явления "зависания" нет, то генератор импульсов 16 не запускается, так как на его вход через собирательную схему 15 поступают импульсы с выходов одновибраторов 13, 14. Период следования импульсов  $T_{16}$  выбирается по минимально допустимой величине частоты скольжения таким образом, чтобы он был больше периода биений при этой частоте.

Работа блока уравнивания частот отличается высоким быстродействием и высокой точностью, поскольку отработка управляющего воздействия обеспечивается в каждом периоде биений. Поскольку управление осуществляется ступенчатыми управляющими воздействиями, возможно исключить перерегулирование в процессе уравнивания частот. Неодинаковость амплитуд синхронизируемых напряжений ни в коей мере не влияет на работу блока управления частот.

Еще в большей степени, чем в блоке уравнивания частот, требуется обеспечивать точность отработки углов включения в блоке опережения. Схема блока опережения, реализующего прямой метод измерения параметров синхронизации, приведена на рис. 3.

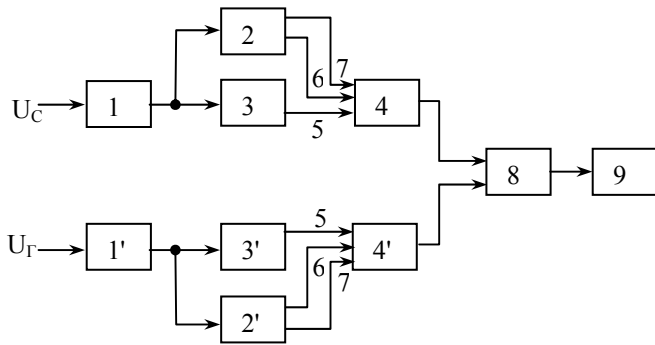


Рис. 3. Блок опережения

Блок опережения содержит формирователи импульсов 1, 1'; триггеры 2, 2', одновибраторы 3, 3'; инверторы фазы 4, 4', у которых имеется по два записывающих входа 5, 6, 5', 6' и по одному считывающему входу 7, 7'; выходные триггеры 8, 8' и релейный блок 9.

В формирователях импульсов 1, 1' синхронизируемые напряжения преобразуются в последовательности управляющих импульсов, привязанных к нулевой фазе соответствующей синусоиды ( $u_1$  и  $u_1'$  на рис. 4).

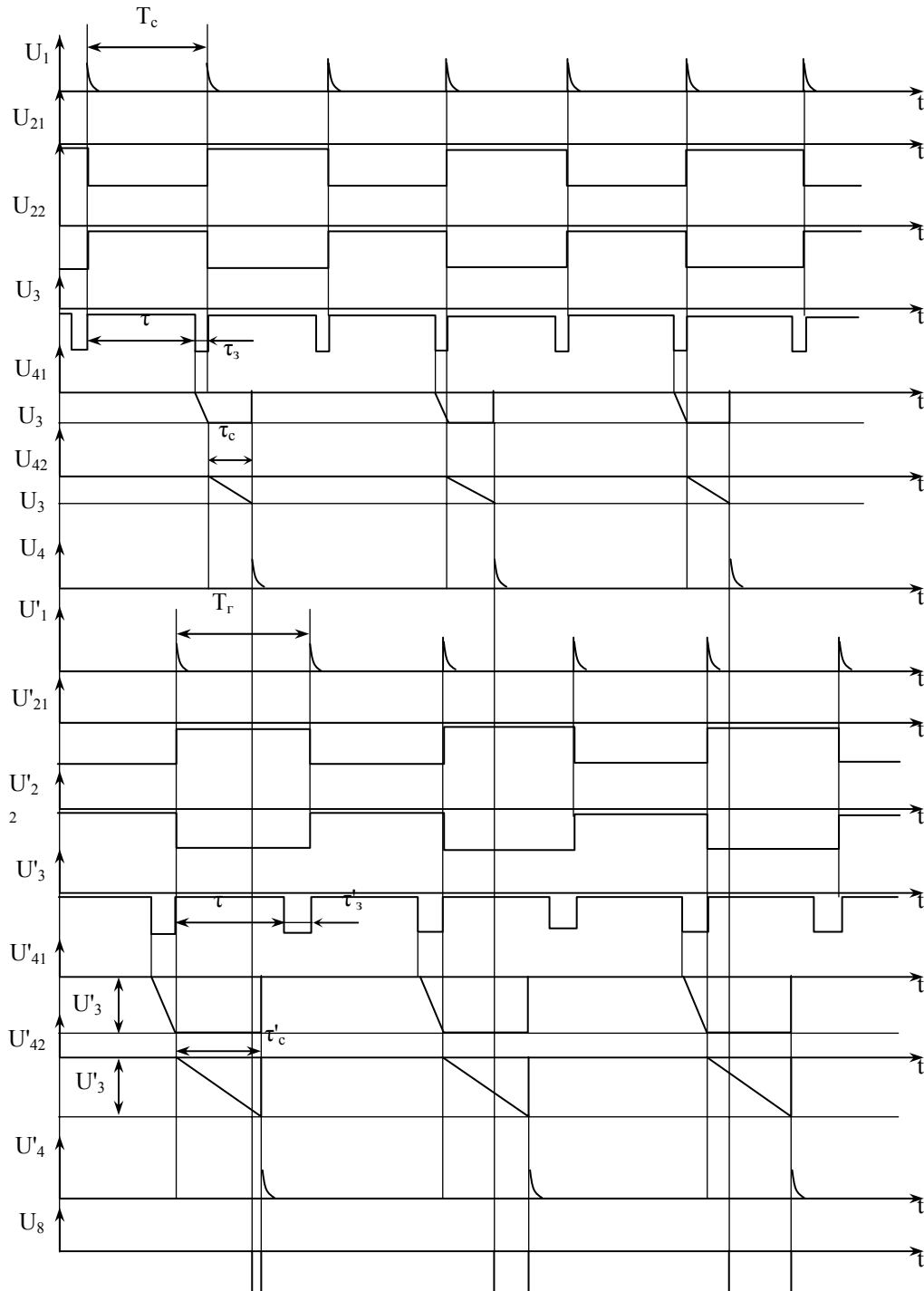


Рис. 4. Временные диаграммы блока опережения

Поступая на счетные триггеры 2, 2', управляющие импульсы поочередно переводят их либо в состояние "Запись", которому на первом выходе триггера 2, 2' соответствует высокий потенциал, либо в состояние "Считывание", которому соответствует высокий потенциал на втором выходе триггера 2, 2'. Выходные напряжения триггеров 2, 2' обозначены  $u_{21}$ ,  $u_{22}$ ,  $u'_{21}$ ,  $u'_{22}$ . Приход управляющих импульсов на вход одновибратора 3, 3' переводит их во временноустойчивое состояние на время  $\tau$  (напряжения  $u_3$  и  $u'_3$  на временной диаграмме рис. 4).

Сигнал, пропорциональный частоте синхронизируемого напряжения и необходимый для сдвига этого напряжения в сторону отставания углов, содержится во временных отрезках  $\tau_3$ ,  $\tau'_3$ :

$$\tau_3 = T_C - \tau; \tau'_3 = T_\Gamma - \tau, \quad (1)$$

где  $T_C$  – период напряжения сети;  $T_\Gamma$  – период напряжения генератора.

Временным отрезкам  $\tau_3$ ,  $\tau'_3$  соответствуют фазовые углы  $\alpha$ ,  $\alpha'$  равные

$$\alpha = \frac{360}{T_C} \tau_3; \alpha' = \frac{360}{T_\Gamma} \tau'_3. \quad (2)$$

С учетом (1) получим из (2):

$$\alpha = 360(1 - \tau f_C); \alpha' = 360(1 - \tau f_\Gamma), \quad (3)$$

где  $f_C$  – частота сети;  $f_\Gamma$  – частота генератора.

Интервалы времени  $\tau_3$ ,  $\tau'_3$  в инверторах фазы преобразовываются в пропорциональные им напряжения  $u_{41} = u_3$  ( $u'_{41} = u'_3$ ), которые запоминаются. Преобразование осуществляется тогда, когда совпадают высокие потенциалы на первом выходе триггеров 2, 2' и на выходе одновибраторов 3, 3'. Процесс считывания напряжений  $\tau T_{41}$  ( $\tau T'_{41}$ ) осуществляется с увеличенной в  $K$  раз постоянной времени. Этот процесс начинается по разрешающему сигналу (высокий потенциал на втором выходе триггера 2 (2')) и заканчивается тогда, когда напряжение  $\tau T_{42}$  ( $\tau T'_{42}$ ) уравнивается с напряжением  $\tau T_{41}$  ( $\tau T'_{41}$ ), достигнутым за время  $\tau_3$ ,  $\tau'_3$ . Тем самым производится умножение на коэффициент  $K$  отрезка  $\tau_3$  и угла  $\alpha$ .

Поскольку интервалы считывания  $\tau_C$  и задержки  $\tau_3$  связаны соотношением

$$\tau_C = k\tau_3, \quad (4)$$

то моменту окончания считывания будет соответствовать фазовый угол  $\beta_C$  в канале сети

$$\beta_C = k\alpha = k360(1 - \tau f_C) \quad (5)$$

и фазовый угол  $\beta_\Gamma$  в канале генератора

$$\beta_\Gamma = k\alpha' = k360(1 - \tau f_\Gamma). \quad (6)$$

Для того, чтобы разность этих углов  $\delta$

$$\delta = \beta_C - \beta_\Gamma = k360(f_\Gamma - f_C) = k360f_\delta \quad (7)$$

представляла собой угол опережения, достаточно принять произведение  $k\tau$  равным времени включения  $t_{\text{ВКЛ}}$  выключателя генератора. Формируемые в момент окончания считывания импульсы  $\tau T_4$  ( $\tau T'_4$ ) с выходов инверторов 4 (4') поступают на входы триггеров, обеспечивая формирование на его выходе импульсной последовательности  $U_8$ . Величина и скорость изменения среднего напряжения на выходе триггера 8 контролируется релейным блоком 9. Если скорость скольжения не превышает заданного значения, соответствующего допустимой разности частот, в момент скачкообразного изменения напряжения на выходе триггера релейный блок 9 подает команду на включение выключателя генератора. Тем самым в блоке опережения отрабатывается постоянное время опережения в момент совпадения сдвинутых по фазе в сторону отставания обоих напряжений, причем углы сдвига фаз пропорциональны скольжению каждого из синхронизируемых напряжений по отношению к частоте, общей для генератора и сети и заведомо большей каждой из синхронизируемых частот.

Рассмотренный пример реализации блока опережения подтверждает возможность получения постоянного времени опережения. Точность работы блока опережения выгодно отличает этот блок от известных технических решений, использующие косвенные методы измерения параметров синхронизации.

## Вывод

Использование прямого метода измерения параметров синхронизации позволяет повышать точность основных блоков синхронизатора и исключить тем самым возмущения, вносимые в работу системы электроснабжения угловыми ошибками, свойственными синхронизаторам, принцип действия которых основан на использовании огибающей напряжения биений.

## Список литературы

1. Соловьев И.И. Автоматизация энергетических систем: 2 изд. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 360 с.
2. Викентьев Е.П., Киришман Р.В., Подаруев А.И. Устройство автоматической синхронизации // Электрические станции. – 1978. – №2. – С. 67-68.
3. Беркович М.А., Гладышев В.А., Семенов В.А. Автоматика энергосистем. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 208 с.

Поступила в редколлегию 9.01.2008

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