

## СИНХРОНИЗАТОР С ПОСТОЯННЫМ ВРЕМЕНЕМ ОПЕРЕЖЕНИЯ

д.т.н., проф. Б.Т. Кононов, к.т.н. М.Б. Старостенко, А.Н. Малыш

*В статье анализируются различные способы формирования команды на включение выключателя генератора при синхронизации. Описывается структурная схема синхронизатора, обеспечивающего получение постоянного времени опережения с использованием фазосдвигающих устройств, построенных на базе устройств импульсной фазовой автоподстройки частоты.*

**Постановка проблемы.** С целью исключения возмущений, вносимых в систему электроснабжения при включении синхронных генераторов на параллельную работу, необходимо к моменту замыкания контактов выключателя включаемого генератора обеспечить выполнение следующих условий:

$$U_1 - U_2 = \Delta U = 0; \quad \omega_1 - \omega_2 = \omega_s = 0; \quad \delta = 0, \quad (1)$$

где  $U_1, U_2$  – амплитудные значения напряжений работающего и включаемого генераторов;  $\Delta U$  – неодинаковость амплитуд синхронизируемых напряжений;  $\omega_1, \omega_2$  – угловые частоты вращения работающего и включаемого генераторов;  $\omega_s$  – угловая частота скольжения;  $\delta$  – угол сдвига фаз между синхронизируемыми напряжениями.

Величины  $\Delta U$ ,  $\omega_s$  и  $\delta$  называют начальными параметрами синхронизации, а условия (1) называют условиями обеспечения идеальной синхронизации. На практике невозможно строгое соблюдение равенств (1), поскольку при  $\omega_s = 0$  нельзя получить нулевой угол сдвига фаз. В связи с этим синхронизацию проводят тогда, когда отклонение начальных параметров синхронизации не превышает допустимых значений:

$$\Delta U \leq \Delta U_{\text{доп}}; \quad \omega_s \leq \omega_{s\text{доп}}; \quad \delta \leq \delta_{\text{доп}}. \quad (2)$$

Для обеспечения наибольшего приближения к выполнению третьего условия системы уравнений (2) команду на включение выключателя генератора надо подать с упреждением, так чтобы к моменту замыкания контактов выключателя генератора угол  $\delta$  между синхронизируемыми напряжениями был равен нулю. При этом возможны два варианта формирования команды на включение выключателя генератора:

- с постоянным углом опережения  $\delta_{\text{оп}} = \text{const}$  ;

– с постоянным временем опережения  $t_{оп} = \text{const}$ .

По первому варианту команду подадут тогда, когда угол между синхронизируемым напряжением становится равным значению, определяемому из соотношения

$$\delta = \delta_{оп1} = \omega_{s_{расч}} t_{вкл}, \quad (3)$$

где  $\omega_{s_{расч}}$  – расчетное значение угловой частоты скольжения, которое, как правило, выбирается равным среднему значению угловой частоты скольжения в интервале ее допустимых значений;  $t_{вкл}$  – время включения выключателя генератора.

У синхронизаторов с постоянным временем опережения команда на включение подается тогда, когда угол между синхронизируемыми напряжениями становится равным расчетному значению, определяемому по формуле

$$\delta = \delta_{оп2} = \omega_s \cdot t_{вкл}, \quad (4)$$

т.е. определяемому для каждого текущего значения угловой частоты скольжения  $\omega_s$ .

Точность работы синхронизатора определяют величиной его угловой погрешности  $\delta_{ош}$ :

$$\delta_{ош} = \delta_{оп} - \omega_s t_{вкл}. \quad (5)$$

Легко видеть, что у синхронизатора с постоянным временем опережения угловая ошибка равна нулю, а у синхронизаторов с постоянным углом опережения угловая ошибка определяется фактической скоростью скольжения

$$\delta_{ош} = (\omega_{s_{расч}} - \omega_s) t_{вкл}. \quad (6)$$

Синхронизаторы с постоянным временем опережения имеют существенные преимущества по сравнению с синхронизаторами с постоянным углом опережения, поскольку при их применении удастся обеспечить выполнение условий (2) и снизить тем самым негативные последствия возмущений, имеющих место при отклонении начальных параметров синхронизации от допустимых значений. Вместе с тем, реализация условия (4) на практике сопряжена с определенными трудностями, связанными с точностью отработки переменного угла опережения.

**Анализ литературы.** Различные способы получения переменного угла опережения подробно описаны в [1 – 3]. Наибольшая точность в этих способах достигается, если команду на включение выключателя генератора подать в момент совпадения напряжения большей частоты со

сдвинутым по фазе в сторону отставания напряжением меньшей частоты.

При этом угол сдвига фазы  $\Theta$  выбирается пропорциональным угловой частоте скольжения и времени включения, т.е. равным

$$\Theta = \omega_s t_{\text{вкл}}. \quad (7)$$

Команда на включение (рис. 1) подается в момент совпадения напряжения  $U_B$  с напряжением

$U'_M$ .

От момента подачи команды до момента совпадения напряжений  $U_B$  и  $U_M$  время опережения постоянно и равно времени включения выключателя генератора.

Диапазон изменения угла  $\Theta$  ограничен величиной, равной  $2\pi$ , а возможности выбора допустимых величин частоты скольжения  $f_{s\text{доп}}$  и времени включения  $t_{\text{вкл,доп}}$  ограничены следующим неравенством

$$f_{s\text{доп}} \cdot t_{\text{вкл,доп}} \leq \frac{\Theta_{\text{макс}}}{2\pi} \leq 1. \quad (8)$$

В соответствии с правилом (8) в системах электроснабжения, в которых допускаются большие значения  $f_{s\text{доп}}$ , применение рассматриваемого приема получения постоянного времени опережения возможно только с быстродействующими выключателями. Если же применяются выключатели с большим временем срабатывания, то необходимо ограничивать величину  $f_{s\text{доп}}$ , используя для этого, например, подгонку частот синхронизируемых напряжений. Однако для осуществления этой операции необходимо изменять подачу топлива, воздействуя на регуляторы частоты вращения, что неизбежно приводит к затягиванию процесса синхронизации. Кроме того, точность отработки времени опережения особенно при малых угловых скоростях скольжения невысока.

**Цель статьи:** *повышение точности получения постоянного времени опережения и анализ возможности практической реализации предложенных решений.*

Повысить точность отработки постоянного времени опережения возможно, сдвигая каждое из синхронизируемых напряжений в сторону отставания на угол, пропорциональный скольжению данного напряжения по отношению к фиксированной частоте, общей для обоих напряже-

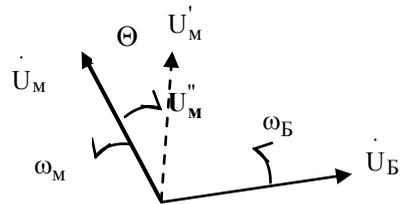


Рис. 1. Получение постоянного времени напряжения

ний и заведомо большей частоты любого из них [4]. Угол сдвига фазы напряжения меньшей частоты  $\alpha_M$  (рис. 2) равен  $\alpha_M = K(\omega_0 - \omega_M)$ , а угол сдвига фазы напряжения большей частоты  $\alpha_B$  равен  $\alpha_B = K(\omega_0 - \omega_B)$ ,

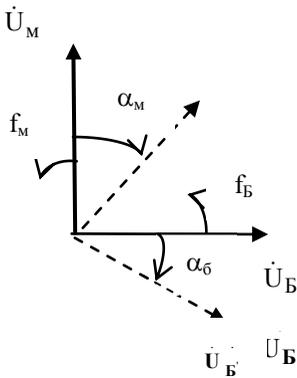


Рис. 2. Сдвиг по фазе обоих синхронизируемых напряжений

где  $\omega_0$  – заданная фиксированная угловая частота скольжения;  $K$  – коэффициент пропорциональности.

Команда на включение выключателя генератора подается в момент совпадения по фазе напряжений  $U_B'$  и  $U_M'$ , когда угол между напряжениями  $U_B$  и  $U_M$  будет равен

$$\alpha_M - \alpha_B = K(\omega_B - \omega_M) = K \cdot \omega_s. \quad (9)$$

Время отработки этого угла постоянно и равно времени опережения

$$t_{\text{вкл}} = \frac{\alpha_M - \alpha_B}{\omega_s} = K = \text{const}. \quad (10)$$

Практическая реализация рассмотренного способа получения постоянного времени опережения возможна в случае использования в качестве фазосдвигающих устройств динамических звеньев первого порядка общего типа, дифференциальные уравнения которых имеют следующий вид:

$$(T_1 p + 1)x = K_1(T_2 p + 1)y, \quad (11)$$

где  $T_1, T_2$  – постоянные времени;  $K_1$  – коэффициент усиления;  $p$  – оператор дифференцирования;  $x, y$  – выходная и входная координаты.

Фазовая характеристика  $\Theta(\omega)$  такого звена описывается следующим уравнением [5]:

$$\Theta(\omega) = \arctg \omega T_2 \cdot \arctg \omega T_1. \quad (12)$$

Фазовая характеристика, аппроксимированная отрезками прямых линий при изменении угловых частот, лежащих в диапазоне  $\frac{0,1}{T_1} < \frac{0,1}{T_2} < \frac{1}{T_1} < \frac{1}{T_2} < \frac{10}{T_1} < \frac{10}{T_2}$ , представлена на рис. 3.

Из рис. 3 легко видеть, что звено первого порядка общего типа при соответствующем подборе постоянных времени  $T_1$  и  $T_2$  позволяет обеспечить сдвиг в сторону отставания синхронизируемых напряжений

в случае, если  $0,1/T_1 < \omega < 0,1/T_2$ .

Главная трудность при реализации рассматриваемого способа получения постоянного времени опережения заключается в обеспечении получения линейности зависимости (10) во всем диапазоне допустимых при синхронизации угловых частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$  или, что то же самое, линейности зависимости фазовой характеристики (12).

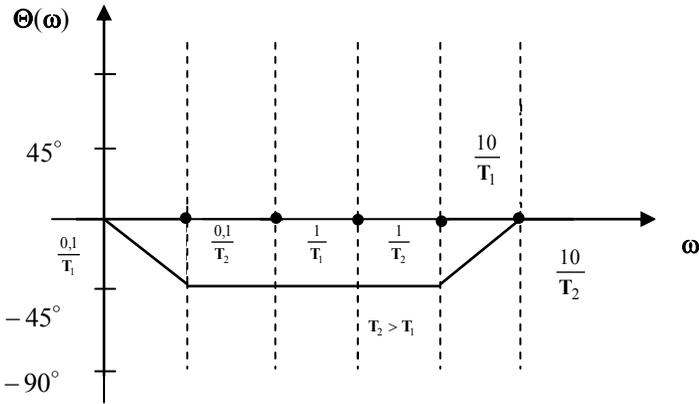


Рис. 3. Фазовая характеристика

Из существующих фазосдвигающих устройств в большей степени удовлетворяют этому требованию устройства, обеспечивающие фазовую автоподстройку частоты [4]. При этом следует, однако, иметь в виду, что собственно импульсная фазовая система автоподстройки частоты реализует зависимость вида

$$\alpha_i = K(\omega_i - \omega_0), \quad (13)$$

где все обозначения соответствуют приведенным ранее, но фиксированная частота  $\omega_0 < \omega_i$  ( $i = 1, 2$ ).

Векторная диаграмма для синхронизируемых напряжений  $U_1$  и  $U_2$  и напряжений  $U'_1$  и  $U'_2$ , сдвинутых по фазе в соответствии с (13), представлена на рис. 4.

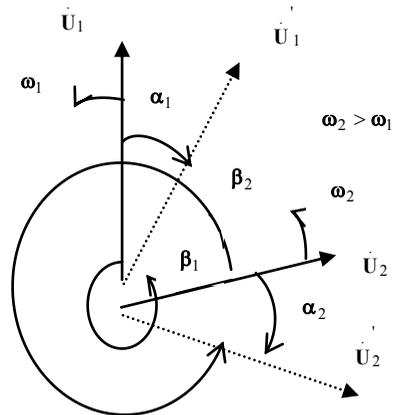


Рис. 4. Векторная диаграмма системы фазовой автоподстройки частоты

Из сопоставления рис. 2 и 4 легко установить, что система фазовой автоподстройки частоты сдвигает в сторону отставания на больший угол напряжение большей частоты, в то время как на больший угол должно сдвигаться напряжение меньшей частоты. Вместе с тем, из рис. 4 следует, что требуемый эффект достигается, если вместо углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  использовать их дополнения до  $360^\circ$ , т.е. углы  $\beta_1$  и  $\beta_2$ . Структурная схема синхронизатора, реализующего предложенный способ получения постоянного времени опережения с использованием устройств импульсной фазовой автоподстройки частоты, представлена на рис. 5 (ДФИ – делитель-формирователь импульсов; УГИ – управляемый генератор импульсов; ИФД – импульсный фазовый детектор; КО – коммутатор операций; УП – устройство переноса; ВИФД – выходной импульсный фазовый детектор; УКПС (УКОС) – устройство контроля положительного (отрицательного) скольжения; ИЛИ – логическая схема “ИЛИ”; КТ – ключ тиристорный; НГИ – настроенный генератор импульсов).

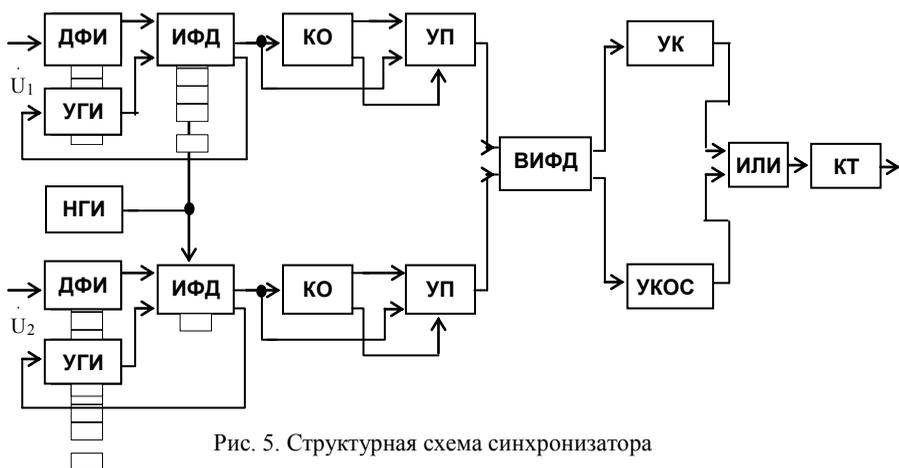


Рис. 5. Структурная схема синхронизатора

В соответствии со способом построения постоянного времени опережения синхронизатор имеет два канала, каждый из которых включает в себя устройство импульсной фазовой автоподстройки частоты для реализации соотношения (16) и коммутатор операций с устройством переноса для перехода от соотношения (16) к соотношениям (10), (11). Устройство импульсной фазовой автоподстройки частоты каждого канала состоит из делителя-формирователя импульсов, управляемого генератора импульсов и импульсного фазового детектора.

Функции фиксации постоянного времени опережения в момент сов-

падения фаз сдвинутых напряжений контроля величины скольжения и выдачу команды в цепь управления выключателем выполняет выходной узел синхронизатора, включающий в себя вспомогательный импульсный фазовый детектор, устройство контроля положительного скольжения, устройство контроля отрицательного скольжения, логическую схему “или” и тиристорный ключ.

В делителях-формирователях импульсов (ДФИ) синхронизируемые синусоидальные напряжения  $U_1$  и  $U_2$  с периодами  $T_1$  и  $T_2$  преобразуются в последовательности остроконечных импульсов. Эти импульсы образуются в момент прохождения мгновенного значения напряжения через ноль один раз за два периода, т.е. каждый импульс является как бы “меткой” начала периода, соответственно равного  $2T_1$  и  $2T_2$ . Например, если на вход ДФИ поступает синусоидальное напряжение с частотой 50 Гц, то на выходе ДФИ формируются импульсы с частотой 25 Гц.

Деление частоты в ДФИ производится с целью расширения диапазона углов опережения синхронизатора вплоть до  $720^\circ$ .

Работа последующих узлов синхронизатора происходит под воздействием выходных импульсов ДФИ, поэтому будем вести речь только об импульсных последовательностях синхронизируемых напряжений  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$ .

Управляемый генератор импульсов (УГИ) представляет собой автогенератор импульсов положительной полярности. Частота УГИ подстраивается под частоту ДФИ сигналами отрицательной обратной связи с выхода импульсного фазового детектора. Импульсный фазовый детектор (ИФД) – это триггер, на выходе которого образуются отрицательные прямоугольные импульсы, длительность которых определяется фазовыми соотношениями импульсов с выхода ДФИ и УГИ.

Работу ИФАПЧ достаточно рассмотреть на примере одного канала, его временные диаграммы изображены на рис. 6.

Импульсные последовательности от ДФИ и УГИ (рис. 6, б, в) поступают на вход ИФД, длительность выходных импульсов которого определяется разностью фаз между импульсами ДФИ и УГИ (рис. 6, г, д). Выходное импульсное напряжение ИФД через отрицательную обратную связь воздействует на вход УГИ, изменяя его частоту так, чтобы она стала равной частоте ДФИ.

В принципе, устройство ИФАПЧ может работать в различных режимах [2]. Например, если частоты ДФИ и УГИ равны и эффект медленных изменений параметров управляемого генератора, определяющих его частоту, в среднем полностью компенсируется действием ИФАПЧ,

устройство работает в так называемом режиме удержания. С понятием режима удержания неразрывно связано понятие полосы удержания, т.е. области начальных расстройок в которой возможен этот режим.

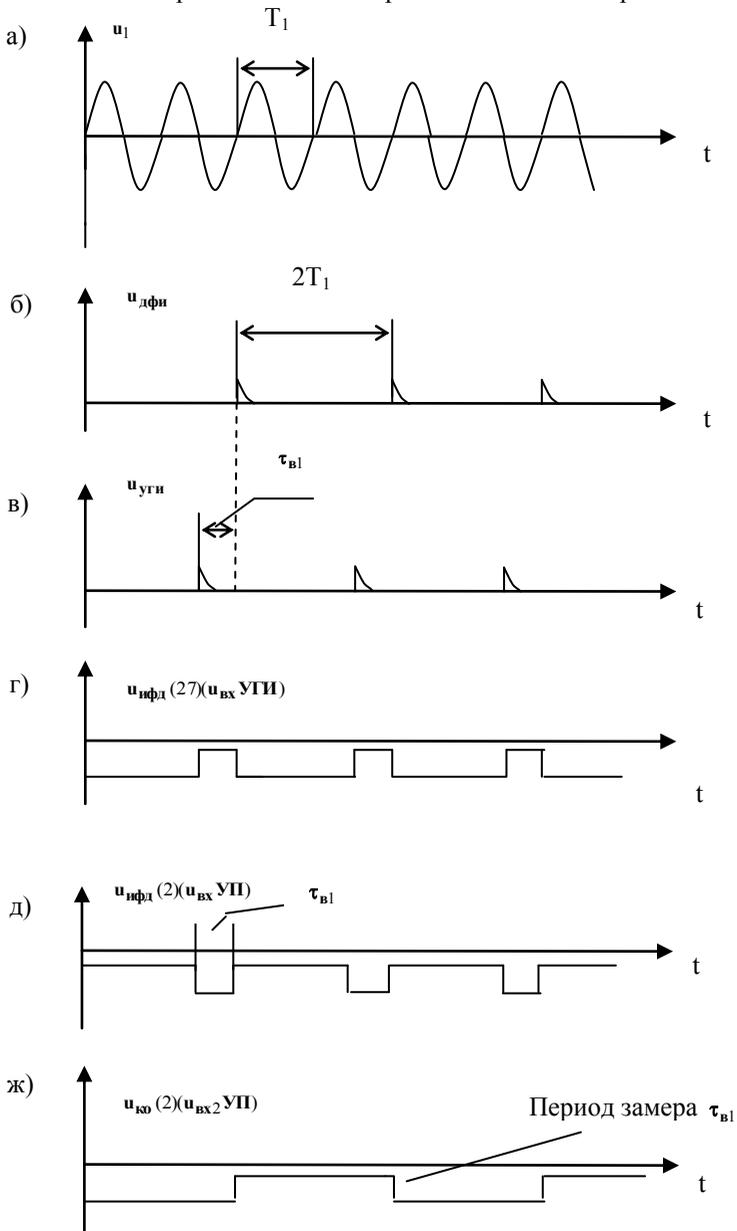


Рис. 6. Временные диаграммы устройства импульсной фазовой автоподстройки частоты

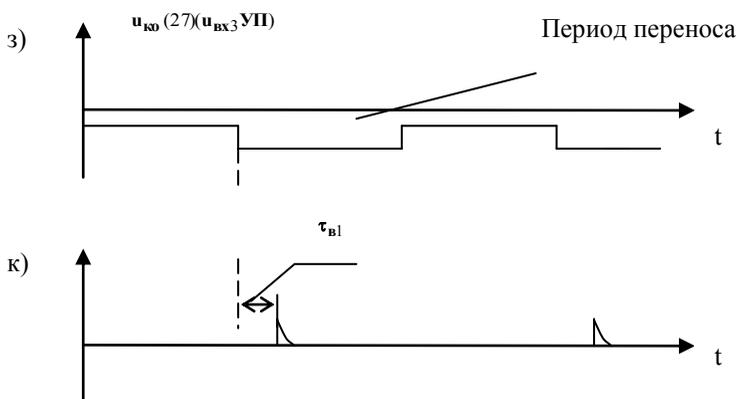


Рис. 6. Временные диаграммы устройства импульсной фазовой автоподстройки частоты (окончание)

Ширина полосы удержания определяется разностью граничных значений частоты УГИ, соответствующих наибольшему и наименьшему среднему напряжениям на выходе ИФД. Возможен и другой режим работы устройства, при котором в среднем разность частот импульсов ДФИ и УГИ равна нулю, а разность их фаз периодически изменяется. Этот режим, используемый крайне редко, называется квазисинхронизмом. Обычно устройство проектируют так, чтобы он не возникал. Третий режим работы устройства ИФАПЧ – режим биений. Его характерной особенностью является непрерывное нарастание в среднем разности фаз УГИ и ДФИ. Режим биений всегда наблюдается в тех случаях, когда начальная расстройка УГИ относительно ДФИ больше полосы удержания. Иногда он может иметь место и при начальной расстройке, меньшей полосы удержания. В режиме биений среднее значение частоты УГИ отличается от частоты ДФИ.

В синхронизаторе используется режим удержания. Переходное состояние системы, при котором режим биений переходит с течением времени в режим удержания или квазисинхронизма, называется режимом захвата. Под полосой захвата понимают область начальных расстроек, в которой при любых начальных условиях устанавливается режим удержания или квазисинхронизма. Факт существования полосы захвата для ИФАПЧ каждого из каналов синхронизатора является определяющим при выборе допустимого диапазона изменения частот синхронизируемых напряжений.

В синхронизаторе применен УГИ, частота которого линейно зависит

от величины среднего напряжения на выходе, и ИФД, среднее значение напряжения на выходе которого линейно зависит от угла сдвига фаз между входными сигналами. В силу этого, ИФАПЧ синхронизатора в режиме удержания обеспечивает формирования на выходе ИФД (рис. 6, г) прямоугольных импульсов, относительная длительность которых  $\tau_{21}$  по отношению к периоду  $2T_1$  пропорциональна частоте  $\omega_1$  синхронизируемого напряжения  $\dot{U}_1$ . Как следует из рис. 6, б, в, г, эта длительность одновременно является временным интервалом, на который сдвигается в сторону отставания импульсная последовательность УГИ по отношению к импульсной последовательности ДФИ. Легко видеть, что временной задержке  $\tau_{\alpha_1}$  соответствует задержка по фазе на величину

$$\alpha_1 = \frac{\tau_{\alpha_1}}{2T_1} \cdot 360^\circ = K \cdot \omega_1, \quad (14)$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности, зависящей от коэффициентов усиления элементов ИФАПЧ: УГИ, ИФД, отрицательной обратной связи.

Дополнением до периода является временной интервал  $\tau_{\beta_1}$  (рис. 6, в), которому соответствует фазовый угол

$$\beta_1 = \frac{\tau_{\beta_1}}{2T_1} \cdot 360^\circ = \frac{2T_1 - \tau_{\alpha_1}}{2T_1} \cdot 360^\circ = 360^\circ - K_1 \cdot \omega_1, \quad (15)$$

удовлетворяющий требованиям зависимости (10).

Значит, на этот угол и необходимо сдвигать импульсную последовательность ДФИ в сторону отставания, причем для осуществления сдвига достаточно перенести интервал  $\tau_{\beta_1}$  на другую сторону импульсов ДФИ (рис. 6, д, ж, з, к).

Задачу замера угла  $\beta_1$ , а также сдвига на этот угол соответствующей импульсной последовательности в сторону отставания решают коммутатор операций и устройство переноса.

Коммутатор операций (КО) выделяет один период для замера угла сдвига  $\beta_1$ , а второй – для переноса импульсов соответствующей последовательности на этот угол в сторону отставания (рис. 6, ж, з).

Таким образом, на выходах устройств переноса в обоих каналах (рис. 5) получаются импульсные последовательности синхронизируемых напряжений  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$ , сдвинутые по фазе в сторону отставания на углы, соответствующие выражению (10) – рис. 6, к. Эти импульсные последовательности подаются на выходной импульсный фазовый детектор (ВИФД), представляющий собой триггер. Длительность импульсов на выходе ВИФД зависит от фазовых соотношений входных импульсных последовательностей. Пре-

менная диаграмма работы ВИФД показана на рис. 7.

При равенстве частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$  длительность импульса  $t_{и}$  на одном выходе триггера (паузы – на другом), будет пропорциональна разности фаз, сдвинутых импульсных последовательностей напряжений  $\dot{U}_1$  и  $\dot{U}_2$ . При неравенстве частот разность фаз  $\theta$  будет непрерывно меняться от 0 до  $2\pi$  за один период скольжения  $T_{ск}$ , а  $t_{и}$  на одном выходе ВИФД будет нарастать от 0 до  $T$  и при  $\theta = 0$  скачком падать до 0 (рис. 7, в). На другом выходе ВИФД, наоборот,  $t_{и}$  будет уменьшаться от  $t_{имакс} = T$  до нуля, а при  $\theta = 0$  скачком возрастать до  $T$  (рис. 7, г). При смене знака скольжения выходы ВИФД как

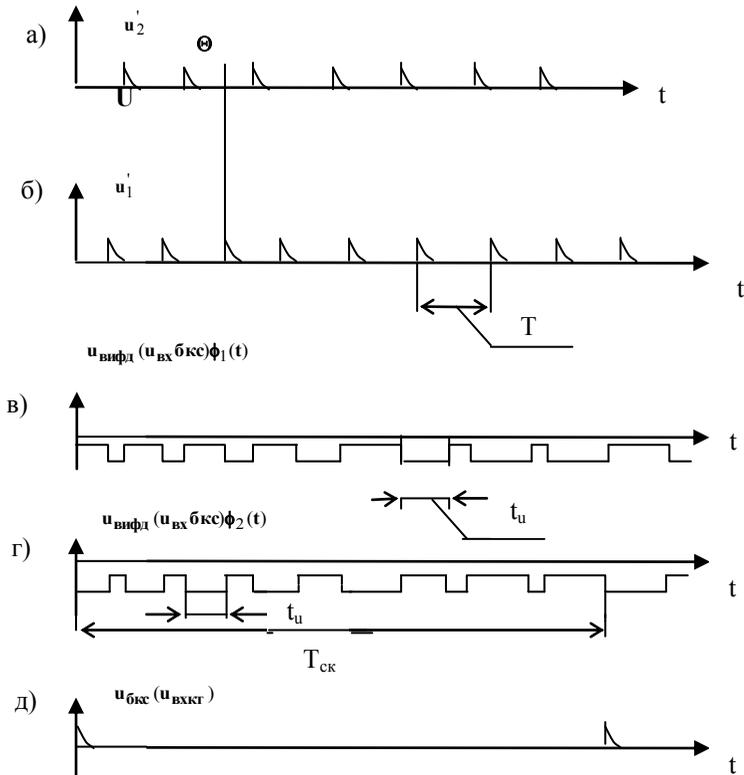


Рис. 7. Временные диаграммы выходного узла синхронизатора

бы меняются местами. Кроме четкого обозначения момента равенства фаз на выход ВИФД контролируется знак и величина скольжения.

Контроль скольжения осуществляется с помощью УКПС и УКОС (рис. 5). Один выход ВИФД подключен к УКПС, а второй – к УКОС.

Эти блоки способны различать знак скольжения, а при допустимом скольжении зафиксировать постоянное время опережения в момент совпадения фаз сдвинутых по фазе импульсных последовательностей синхронизируемых напряжений. В зависимости от знака скольжения, в момент совпадения фаз в УКПС или УКОС, формируются импульсы, управляющие через схему ИЛИ тиристорным ключом (КТ), который, в свою очередь, управляет включением выключателя.

Настроечный генератор импульсов (НГИ) используется только при настройке синхронизатора. В формировании выходной команды при синхронизации НГИ не участвует.

**Вывод.** С учетом проведенного анализа различных способов формирования команды на включение выключателя генератора при синхронизации предложена структурная схема синхронизатора, обеспечивающего получение постоянного времени опережения с использованием фазосдвигающих устройств, построенных на базе устройств импульсной фазовой автоподстройки частоты. В результате повышена точность получения постоянного времени опережения и снижены негативные последствия возмущений, имеющих место при отклонении начальных параметров синхронизации от допустимых значений.

Преимущества предложенного синхронизатора особенно проявляются в случае его применения в системах электроснабжения и инерционными выключателями при больших угловых скоростях скольжения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Самойленко Б.Ф., Кононов Б.Т., Григоров Н.И., Михайловский В.Г., Пушков П.М., Грива Б.И., Коврига А.И. Системы управления электроснабжением и электроприводом. Учебник. – М.: МО СССР, 1990. – 414 с.*
2. *Кононов Б.Т., Малыш А.Н. Новые способы получения постоянного времени опережения в устройствах точной синхронизации // Системы обработки информации. – Х.: ХВУ. – 2003. – Вып. 1. – С. 174 – 182.*
3. *Способ получения постоянного времени опережения. Кононов Б.Т., Церковный А.Е., АС СССР № 455634, опубликовано в БИ № 47, 1974.*
4. *Воронов А.А. Основы теории автоматического управления, часть 1. – М. – Л.-д: Энергия, 1965. – 396 с.*
5. *Шахгильдян В.В., Ляховкин А.Н. Системы фазовой автоподстройки частоты. – М.: Связь, 1972. – 214 с.*

Поступила 12.03.2003

**КОНОНОВ Борис Тимофеевич**, доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры ХВУ. В 1962 году окончил Львовский политехнический институт. Область научных интересов – электроснабжение, моделирование, автоматизация, установки гарантированного питания.

**СТАРОСТЕНКО Михаил Борисович**, канд. техн. наук, преподаватель кафедры ХВУ. Область научных интересов – электроснабжение, установки гарантированного питания.

**МАЛЫШ Александр Николаевич**, адъюнкт очной адъюнктуры при ХВУ. В 2001 году окончил командно-штабной факультет ХВУ. Область научных интересов – электроснабжение.

---