

## ПРЕЦИЗИОННЫЕ МЕТОДЫ И КАЛИБРАТОРЫ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ НЕСИММЕТРИИ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ СИНУСОИДАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

**В.Н. Чинков,** доктор технических наук, профессор Харьковского университета Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба

**В.В. Мошаренков,** старший преподаватель Харьковского университета Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба



В.Н. Чинков



В.В. Мошаренков

*Предлагаются два прецизионных метода воспроизведения коэффициентов несимметрии трехфазной системы синусоидальных напряжений (цифровой и аналоговый), принципы их аппаратурной реализации (структурные схемы калибраторов), причем аналоговый метод имеет базовую реализацию для обоих коэффициентов прямой и обратной последовательностей.*

*It is offered two precision methods of reproducing of asymmetry coefficients of sinewave tensions three-phase systems (digital and analog), and principles of their apparatus realization (flow diagrams of calibrators), moreover, an analog method is basically realized for both coefficients of direct and reverse sequences.*

### Введение

**Постановка задачи.** Одной из проблем отечественной измерительной техники является низкий уровень воспроизведения прецизионной трехфазной системы синусоидальных напряжений (ТССН) с регулируемой несимметрией, которая необходима для тестирования характеристик и метрологического обслуживания (поверки и калибровки) измерительного, регистрирующего, записывающего и управляющего трехфазного электрического оборудования. В частности, в эталоне-калибраторе электрической мощности типа 6100А немецкой фирмы “Fluke” решение этой проблемы сводится к воспроизведению ТССН с независимо регулируемой амплитудой и фазой исходной симметричной ТССН. Однако этот эталон-калибратор не позволяет задавать нормированные значения таких важнейших комплексных показателей несимметрии, как коэффициенты

несимметрии, ТССН – обратной нулевой последовательности [1].

**Анализ литературы.** Аналогично прибору 6100А, воспроизведение высокоточной несимметричной ТССН можно несложно решить и в отечественном приборостроении на основе цифровых генераторов с цифроаналоговым синтезом синусоидальных сигналов [2]. Но задача воспроизведения коэффициентов несимметрии ТССН существенно усложняется, так как известные отечественные принципы построения формирователей и измерителей коэффициентов несимметрии основаны на традиционном, хорошо известном использовании фильтров симметричных составляющих [3, 4], точностные возможности которых ограничены как методическими, так и инструментальными погрешностями.

Таким образом, весьма актуальной научно-технической задачей является разработка прецизионных методов воспроизведения, позволяющих создать достаточно простые и в то же время высокоточные калибраторы (рабочие эталоны) несимметрии. Эта задача будет обостряться с внедрением цифровых измерителей несимметрии, погрешность которых может быть доведена до десятых долей процента и меньше [5].

**Цель статьи.** В настоящей статье предлагаются прецизионные методы воспроизведения ТССН с нормированными коэффициентами обратной и нулевой последовательностей и основанные на них принципы построения калибраторов таких напряжений.

### Основной материал

Запишем выражения для комплексных коэффициентов несимметрии обратной  $\dot{\epsilon}_2$  и нулевой  $\dot{\epsilon}_0$  последовательностей несимметричной ТССН:

$$\dot{\epsilon}_2 = \dot{U}_2 / \dot{U}_1; \quad \dot{\epsilon}_0 = \dot{U}_0 / \dot{U}_1, \quad (1)$$

где  $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_0$  – комплексы средних квадратических значений (СКЗ) составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей соответственно.

Используя равенства (1), запишем известные выражения для составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей несимметричной ТССН в следующем виде [3, 6]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \alpha\dot{U}_B + \alpha^2\dot{U}_C) &= \dot{U}_1 ; \\ \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \alpha^2\dot{U}_B + \alpha\dot{U}_C) &= \dot{U}_2 = \dot{\varepsilon}_2\dot{U}_1 ; \\ \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) &= \dot{U}_0 = \dot{\varepsilon}_0\dot{U}_1, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  – комплексы СКЗ фазовых напряжений несимметричной ТССН;  $\alpha = e^{j120^\circ}$  – фазовый множитель.

Решая систему уравнений (2), находим

$$\dot{U}_A = \dot{U}_1(1 + \dot{\varepsilon}_0 + \dot{\varepsilon}_2) ; \quad (3)$$

$$\dot{U}_B = \alpha^2\dot{U}_1(1 + \alpha\dot{\varepsilon}_0 + \alpha^2\dot{\varepsilon}_2) ; \quad (4)$$

$$\dot{U}_C = \alpha\dot{U}_1(1 + \alpha^2\dot{\varepsilon}_0 + \alpha\dot{\varepsilon}_2) . \quad (5)$$

Из (4) и (5) с учетом (3) получим

$$\dot{U}_B = \alpha^2\dot{U}_A \frac{1 + \alpha\dot{\varepsilon}_0 + \alpha^2\dot{\varepsilon}_2}{1 + \dot{\varepsilon}_0 + \dot{\varepsilon}_2} ; \quad (6)$$

$$\dot{U}_C = \alpha\dot{U}_A \frac{1 + \alpha^2\dot{\varepsilon}_0 + \alpha\dot{\varepsilon}_2}{1 + \dot{\varepsilon}_0 + \dot{\varepsilon}_2} . \quad (7)$$

Выражения (3), (6), (7) описывают цифровой метод воспроизведения несимметричной ТССН, если выполнить его с применением микропроцессора, при котором СКЗ (или амплитуды) фазных напряжений  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  определяются по стандартным программам.

Аналоговый метод несимметричной ТССН основан на ее представлении в виде суммы исходной симметричной системы и добавочных напряжений, определяющих требуемую несимметрию:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_{AO} + \Delta\dot{U}_A ; \\ \dot{U}_B &= \dot{U}_{BO} + \Delta\dot{U}_B ; \\ \dot{U}_C &= \dot{U}_{CO} + \Delta\dot{U}_C , \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где  $\dot{U}_{AO}, \dot{U}_{BO}, \dot{U}_{CO}$  – комплексы СКЗ фазных напряжений исходной ТССН, причем

$$\dot{U}_{BO} = \alpha^2\dot{U}_{AO} ; \dot{U}_{CO} = \alpha\dot{U}_{AO} ;$$

$\Delta\dot{U}_A, \Delta\dot{U}_B, \Delta\dot{U}_C$  – комплексы СКЗ симметричных добавочных напряжений к комплексам СКЗ  $\dot{U}_{AO}, \dot{U}_{BO}, \dot{U}_{CO}$ .

Подставляя соотношения (8) в выражения (2), получим

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{3}(\Delta\dot{U}_A + \alpha\Delta\dot{U}_B + \alpha^2\Delta\dot{U}_C) &= 0 ; \\ \frac{1}{3}(\Delta\dot{U}_A + \alpha^2\Delta\dot{U}_B + \alpha\Delta\dot{U}_C) &= \dot{U}_2 = \dot{\varepsilon}_2\dot{U}_1 ; \\ \frac{1}{3}(\Delta\dot{U}_A + \Delta\dot{U}_B + \Delta\dot{U}_C) &= \dot{U}_0 = \dot{\varepsilon}_0\dot{U}_1 . \end{aligned} \right\}$$

Из этой системы уравнений находим

$$\left. \begin{aligned} \Delta\dot{U}_A &= (\dot{\varepsilon}_0 + \dot{\varepsilon}_2)\dot{U}_1 = (\dot{\varepsilon}_0 + \dot{\varepsilon}_2)\dot{U}_{AO} ; \\ \Delta\dot{U}_B &= (\dot{\varepsilon}_0 + \alpha\dot{\varepsilon}_2)\dot{U}_1 = \dot{\varepsilon}_0\dot{U}_{AO} + \dot{\varepsilon}_2\dot{U}_{CO} ; \\ \Delta\dot{U}_C &= (\dot{\varepsilon}_0 + \alpha^2\dot{\varepsilon}_2)\dot{U}_1 = \dot{\varepsilon}_0\dot{U}_{AO} + \dot{\varepsilon}_2\dot{U}_{BO} . \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Принимая  $\dot{U}_{AO} = \dot{U}_A$  (что означает  $\Delta\dot{U}_A = 0$ ), выражения для величин  $\Delta\dot{U}_B, \Delta\dot{U}_C$  в (9) преобразуем к виду

$$\Delta\dot{U}_B = -j\sqrt{3}\alpha\dot{U}_A \frac{\dot{\varepsilon}_0 - \alpha^2\dot{\varepsilon}_2}{1 + \dot{\varepsilon}_0 + \dot{\varepsilon}_2} ; \quad (10)$$

$$\Delta\dot{U}_C = -j\sqrt{3}\alpha^2\dot{U}_A \frac{\dot{\varepsilon}_0 - \alpha\dot{\varepsilon}_2}{1 + \dot{\varepsilon}_0 + \dot{\varepsilon}_2} . \quad (11)$$

Формулы (10), (11) решают задачу регулирования несимметрии ТССН в самом общем виде: задаваясь любыми комплексными значениями коэффициентов несимметрии  $\dot{\varepsilon}_0$  и  $\dot{\varepsilon}_2$ , определяют добавки  $\Delta\dot{U}_B, \Delta\dot{U}_C$  к симметричным составляющим  $\dot{U}_{BO}, \dot{U}_{CO}$  фазных напряжений  $\dot{U}_B, \dot{U}_C$ .

Однако обычно нормируются значения коэффициентов несимметрии  $\dot{\varepsilon}_0, \dot{\varepsilon}_2$  только по модулю, не задаваясь фазовыми сдвигами между составляющими  $\dot{U}_0, \dot{U}_1, \dot{U}_2$ , при этом фазы коэффициентов несимметрии  $\dot{\varepsilon}_0$  и  $\dot{\varepsilon}_2$  могут быть взяты произвольными. Наиболее простыми в реализации соотношения (10) и (11) получаются, если положить фазы величин  $\dot{\varepsilon}_0$  и  $\dot{\varepsilon}_2$  равными нулю, то есть принять  $\dot{\varepsilon}_0 = \varepsilon_0, \dot{\varepsilon}_2 = \varepsilon_2$ . Тогда равенства (10) и (11) принимают следующий вид:

$$\Delta\dot{U}_B = -j\sqrt{3}\alpha\dot{U}_A \frac{\varepsilon_0 - \alpha^2\varepsilon_2}{1 + \varepsilon_0 + \varepsilon_2} ; \quad (12)$$

$$\Delta\dot{U}_C = -j\sqrt{3}\alpha^2\dot{U}_A \frac{\varepsilon_0 - \alpha\varepsilon_2}{1 + \varepsilon_0 + \varepsilon_2} , \quad (13)$$

где принято  $\dot{U}_A = U_A$ .

Из (12), (13) следует, что  $\Delta\dot{U}_B = \Delta\dot{U}_C^*$  (\* – знак комплексного сопряжения), то есть модули добавок одинаковы ( $|\Delta\dot{U}_B| = |\Delta\dot{U}_C|$ ), а их аргументы (фазовые сдвиги относительно опорного напряжения  $\dot{U}_A$ ) отличаются только знаком.

Формулы (12), (13) упрощаются еще больше для двух важных частных случаев.

1. Воспроизводится только обратная последовательность ТССН,  $\dot{U}_0$  означает  $\dot{\varepsilon}_0 = 0$ . В этом случае имеем

$$\Delta\dot{U}_B = \frac{\sqrt{3}\varepsilon_2}{1 + \varepsilon_2} e^{j90^\circ} U_A ;$$

$$\Delta\dot{U}_C = \frac{\sqrt{3}\varepsilon_2}{1 + \varepsilon_2} e^{-j90^\circ} U_A .$$

2. Воспроизводится только нулевая последовательность трехфазного напряжения, то есть принимается  $\varepsilon_2 = 0$ . Тогда получим

$$\Delta\dot{U}_B = \frac{\sqrt{3}\varepsilon_0}{1 + \varepsilon_0} e^{j90^\circ} U_A ;$$

$$\Delta\dot{U}_C = \frac{\sqrt{3}\varepsilon_0}{1 + \varepsilon_0} e^{-j90^\circ} U_A .$$

Рассмотрим принципы построения калибраторов несимметрии ТССН.

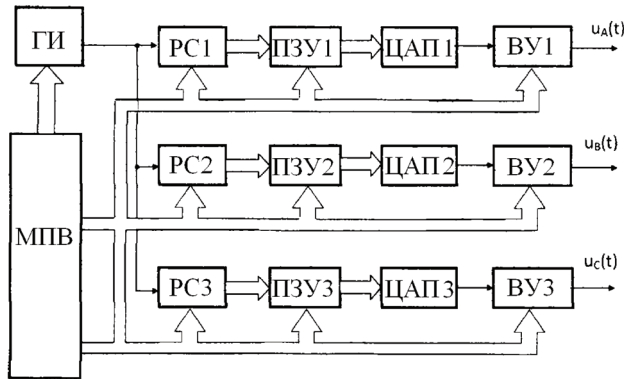


Рис. 1. Структурная схема цифрового калибратора несимметрии ТССН

На рис. 1 приведена структурная схема цифрового калибратора, основанная на реализации соотношений (3), (6), (7) и содержащая микропроцессорный вычислитель (МПВ), генератор импульсов (ГИ), реверсивные счетчики РС1, РС2, РС3, ПЗУ1, ПЗУ2, ПЗУ3, цифроаналоговые преобразователи ЦАП1, ЦАП2, ЦАП3, выходные устройства ВУ1, ВУ2, ВУ3.

Клавишным устройством в МПВ вводятся частота выходных сигналов, амплитуда (или СКЗ) напряжения  $\dot{U}_1$  прямой последовательности и комплексы коэффициентов несимметрии  $\dot{\epsilon}_0, \dot{\epsilon}_2$  (или СКЗ напряжений обратной и нулевой последовательностей  $\dot{U}_2$  и  $\dot{U}_0$ ). Код частоты с МПВ подается на управляющий вход ГИ, задавая его выходную частоту, следовательно, и частоту выходных напряжений меры. По кодам величин  $\dot{U}_1, \dot{\epsilon}_0$  и  $\dot{\epsilon}_2$  осуществляется вычисление комплексов фазных напряжений  $\dot{U}_A = U_A e^{j\psi_A}$ ,  $\dot{U}_B = U_B e^{j\psi_B}$  и  $\dot{U}_C = U_C e^{j\psi_C}$ . Коды начальных фаз  $\psi_A, \psi_B, \psi_C$  напряжений  $u_A(t), u_B(t), u_C(t)$  с выходом МПВ подаются на входы предварительной установки реверсивных счетчиков РС1, РС2, РС3 и записываются в них, устанавливая в определенные исходные состояния, соответствующие требуемым фазовым сдвигам формируемой ТССН. Коды их амплитуд подаются с выхода МПВ на управляющие входы выходных устройств ВУ1, ВУ2, ВУ3, представляющих собой усилители мощности с аттенуаторами.

В дальнейшем при поступлении импульсов с ГИ на счетные входы реверсивных счетчиков РС1, РС2, РС3 их выходными кодами последовательно изменяются адреса мгновенных значений функций синуса: на входах ПЗУ1 – коды  $\sin(\omega t_j + \psi_A)$ , на выходах ПЗУ2 – коды  $\sin(\omega t_j + \psi_B)$ , на выходах ПЗУ3 – коды  $\sin(\omega t_j + \psi_C)$ . Выходные коды ПЗУ1, ПЗУ2, ПЗУ3 преобразуются соответственно в пропорциональные напряжения определенной амплитуды, которые через выходные устройства ВУ1, ВУ2, ВУ3 с заданными коэффициентами передачи поступают на выходы калибратора, образуя ТССН с нормированными коэффициентами несимметрии прямой  $\dot{\epsilon}_0$  и обратной  $\dot{\epsilon}_2$  последовательностей.

На рис. 2 приведена структурная схема аналогового калибратора ТССН. Схема содержит генера-

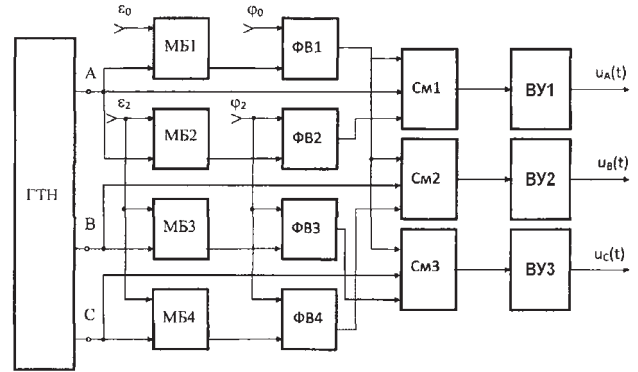


Рис. 2. Структурная схема аналогового калибратора несимметрии ТССН

тор трехфазного напряжения (ГТН), масштабные блоки МБ1, МБ2, МБ3, МБ4, фазовращатели ФВ1, ФВ2, ФВ3, ФВ4, сумматоры См1, См2, См3, выходные устройства ВУ1, ВУ2, ВУ3. По этой схеме могут быть реализованы оба частных случая метода.

Переключателями или клавишным устройством калибратора устанавливаются следующие исходные данные:

- коэффициент передачи перестраиваемых масштабных блоков МБ1, МБ2, МБ3, МБ4, а именно: в МБ1 – значение  $\epsilon_0 = |\dot{\epsilon}_0|$ , а в МБ2, МБ3, МБ4 – значение  $\epsilon_2 = |\dot{\epsilon}_2|$ , причем, поскольку  $\epsilon_0 = \epsilon_2 < 1$ , то их можно задавать делителем напряжения;
- аргументы коэффициентов несимметрии  $\varphi_0 = \arg \dot{\epsilon}_0$  и  $\varphi_2 = \arg \dot{\epsilon}_2$ , определяющие фазовые сдвиги добавочных напряжений, причем значение  $\varphi_0$  вводится в фазовращатель ФВ1, а значение  $\varphi_2$  – в фазовращатели ФВ2, ФВ3, ФВ4;
- амплитуда и частота генератора ТССН ГТН.

При реализации базовых соотношений метода (9), (10) фазовые напряжения  $\dot{U}_{AO}, \dot{U}_{BO}, \dot{U}_{CO}$  с выходов А, В, С ГТН подаются на первые входы сумматоров См1, См2, См3 и на цепочки из последовательно соединенных перестраиваемых масштабных блоков МБ1, МБ2, МБ3, МБ4 и фазовращателей ФВ1, ФВ2, ФВ3, ФВ4. На выходах фазовращателей ФВ1, ФВ2, ФВ3, ФВ4 образуются соответственно напряжения  $\dot{\epsilon}_0 \dot{U}_{AO}, \dot{\epsilon}_2 \dot{U}_{AO}, \dot{\epsilon}_2 \dot{U}_{BO}, \dot{\epsilon}_2 \dot{U}_{CO}$ , подаваемые на определенные входы сумматоров См1, См2, См3, на выходах которых формируется несимметричная ТССН  $u_A(t), u_B(t)$  и  $u_C(t)$  с заданными коэффициентами несимметрии. Эти напряжения через выходные устройства ВУ1, ВУ2, ВУ3 поступают на выход калибратора.

Для частного случая, когда нормируются только вещественные значения коэффициентов несимметрии  $\dot{\epsilon}_0$  и  $\dot{\epsilon}_2$ , фазовращатели в схеме не нужны.

Точность задания параметров формируемой ТССН определяется только инструментальными погрешностями, а они могут быть достаточно малы. Так, например, основной вклад в погрешность цифрового калибратора вносит по-

грешность ЦАП, которая, как известно, даже для серийных микросхем составляет тысячные доли процента. Погрешность задания фазовых сдвигов формируемых ТССН определяется значением и нестабильностью высокостабильной опорной частоты кварцевого генератора импульсов и может быть сделана пренебрежимо малой.

Подчеркнем также, что оба метода и реализующие их калибраторы воспроизведения несимметрии ТССН позволяют при необходимости осуществлять независимую регулировку амплитуд и фаз ТССН, как в эталоне-калибраторе типа 6100А, с наименьшей погрешностью.

#### Выводы

Таким образом, предложенные методы воспроизведения несимметричной ТССН позволяют создать прецизионные и в то же время простые калибраторы или меры коэффициентов несимметрии ТССН, которые могут найти широкое применение для метрологического обслуживания измерителей несимметрии и различного рода трехфазных электротехнических устройств.

#### Список литературы

1. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97. – [Введ. 2000-01-01]. – К.: Госстандарт Украины, 1999. – 31 с. – (Межгосударственный стандарт).
2. Горлач А.А. Цифровая обработка сигналов в измерительной технике / А.А. Горлач, М.Я. Минц, В.Н. Чинков. – К.: Техника, 1985. – 151 с.
3. Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники / П.Л. Калантаров, Л.Р. Нейман. – Л.– М.: Госэнергоиздат, 1951. – 464 с.
4. Жежеленко И.П. Качество электрической энергии на предприятиях / И.П. Жежеленко, М.Л. Рабинович, В.М. Божко. – К.: Техника, 1981. – 161 с.
5. Минц М.Я. Симметрирование системы токов трехфазной системы напряжений / М.Я. Минц, В.Н. Чинков, О.Г. Гриб // Измерительная техника. – 1984. – № 6. – С. 41–43.
6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1973. – 752 с.