

В. В. Мошаренков

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

## ПРИНЦИП ПОБУДОВИ ВІДОМЧИХ ЕТАЛОНІВ ТРИФАЗНОЇ НАПРУГИ

**Анотація.** Запропонований принцип побудови відомчих еталонів трифазних періодичних сигналів з регульованими параметрами (підвищення точності і стабільності завдання параметрів) формованих сигналів і більш високими метрологічними характеристиками на основі їх цифроаналогового синтезу із застосуванням методу кусково-східчастої апроксимації та сучасних досягнень мікросхемотехніки. Результати досліджень дозволяють на якісно новому рівні створювати відомчі еталони (вихідний та робочий) трифазної системи періодичних сигналів з більш високими метрологічними характеристиками.

**Ключові слова:** відомчий еталон трифазної напруги, кусково-східчастий сигнал, цифроаналоговий перетворювач, трифазний генератор періодичного сигналу, метрологічні характеристики.

### Вступ

Стрімкий темп розвитку науки щодо вимірювання та вимірювальної техніки в останні десятиріччя сприяє появі нових підходів до принципів побудови засобів вимірювання й контролю та дозволяє зрозуміти подальший розвиток вимірювальної техніки.

Одним із найважливіших завдань для всіх галузей науки і техніки, що пов'язані із застосуванням вимірювань електричних величин (радіо та телебачення, енергетики, електроніки, зв'язку, оборони та наукових досліджень) – є вимірювання фазового зсуву у широкому діапазоні частот.

Тому досить важливим є забезпечення єдності вимірювань фазових зсувів за допомогою відомчих еталонів (вихідного та робочого) фазових зсувів (ВЕФЗ). Як вихідний ВЕФЗ розроблений і експлуатується еталон ВЕ 09-00-02-09, як робочий ВЕФЗ використовується калібратор фази Ф1-4 і електродинамічний фазометр Д 5000. Вихідний еталон виконаний за класичною морально застарілою схемою аналогового двофазного генератора. Те ж саме можна сказати і про калібратори фази Ф1-4, а фазометр Д 5000 є стрілочним приладом [1], що є суттєвим обмеженням для їх практичного застосування у вимірювальній техніці. Крім того, оскільки вони виконуються на аналогових однофазних генераторах синусоїдальних сигналів, то природньо, володіють тими же недоліками, а саме - невисокою точністю і стабільністю параметрів синусоїдальних сигналів, обмеженою нижньою межею по частоті, низькою швидкістю (з-за тривалих перехідних процесів при переналагодженні), ручним управлінням, відсутністю стандартного приладового інтерфейсу для використання у вимірювальних системах, складною апаратною реалізацією, низькою технологічністю виготовлення тощо [1–5].

Аналіз літератури. Аналіз недоліків сучасних трифазних генераторів [2–6] показує, що для забезпечення підвищеної точності та надійності вимірювань необхідно врахувати сучасні досягнення цифрової вимірювальної техніки у сфері генерації сигналів і мікросхемотехніки.

Усунення або зменшення цих недоліків можливо при використанні принципово нового напрямку в області генерації сигналів [6, 7]. Значною мірою задовольняють таким вимогам методи цифроаналогового

синтезу синусоїдальних сигналів, які засновані на формуванні кусочно-східчастих сигналів, апроксимуючих синусоїдальний сигнал. Такі методи пов'язані з новим напрямком в теорії сигналів – цифроаналоговим синтезом на основі одного з видів кусочно-східчастої апроксимації [7, 8].

Метою статті є розробка нового принципу побудови відомчих еталонів трифазної напруги з використанням цифроаналогового синтезу сигналів [8–14].

### Основний матеріал

Під час метрологічного обслуговування засобів вимірювальної техніки безперервно підвищуються вимоги до характеристик їхніх вихідних сигналів. Класичні аналогові методи формування синусоїдальних сигналів практично вичерпали можливості подальшого збільшення точності, підвищення рівня автоматизації. Цих недоліків можна позбутися частково(повністю) при використанні принципово нового напрямку в області генерації сигналів. Певною мірою таким вимогам задовольняють методи цифроаналогового синтезу синусоїдальних сигналів, які засновані на формуванні кусочно-східчастих сигналів, апроксимуючих синусоїдальний сигнал. Вони пов'язані із застосуванням цифроаналогового синтезу на основі одного з видів кусочно-східчастої апроксимації.

Тому, пропонується розглянути розробку нового принципу побудови еталона на основі цифроаналогового синтезу із застосуванням методу кусково-східчастої апроксимації, за прикладом:

– структурної електричної схеми цифрового трифазного генератора періодичних сигналів, яка наведена на рис. 1;

– часової діаграми, що пояснює принцип формування трифазного синусоїдальної напруги – на рис. 2.

Цифровий трифазний генератор періодичних сигналів містить: блок управління (БУ), генератор (опорної) змінної частоти (ГОЗЧ), реверсивні лічильники (РЛ1, РЛ2, РЛ3), блоки реверсу (БР1, БР2, БР3), постійні запам'ятовуючі пристрої (ПЗПр1, ПЗПр2, ПЗПр3), цифроаналогові перетворювачі (ЦАП1, ЦАП2, ЦАП3), вихідні пристрої (ВПр1, ВПр2, ВПр3).

Призначення функціональних блоків і елементів генератору однозначно визначається їх функціонуванням і можуть бути виконані на серійних вітчизняних та закордонних інтегральних мікросхемах.

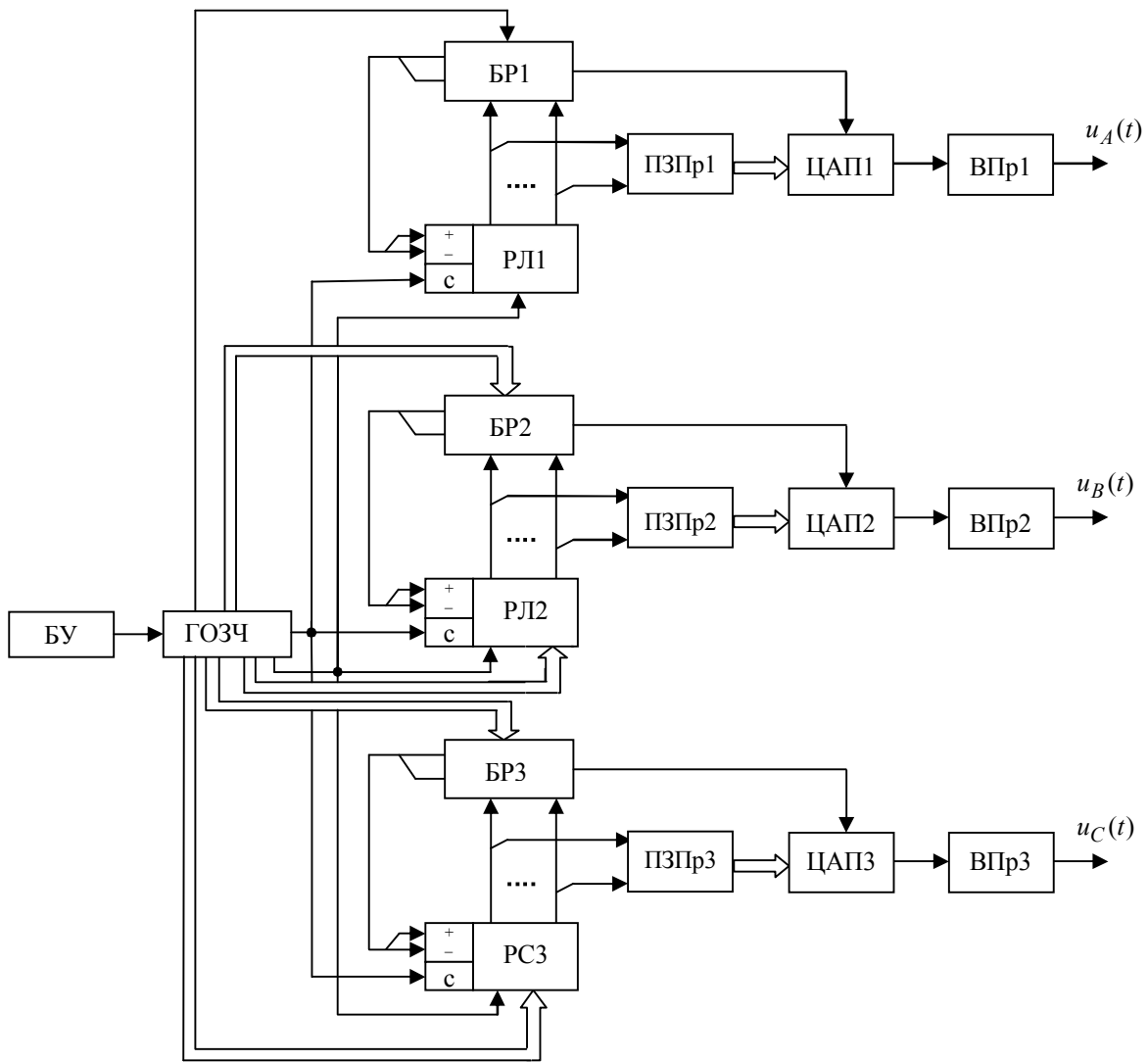


Рис. 1. Структурна схема цифрового трифазного генератора періодичних сигналів

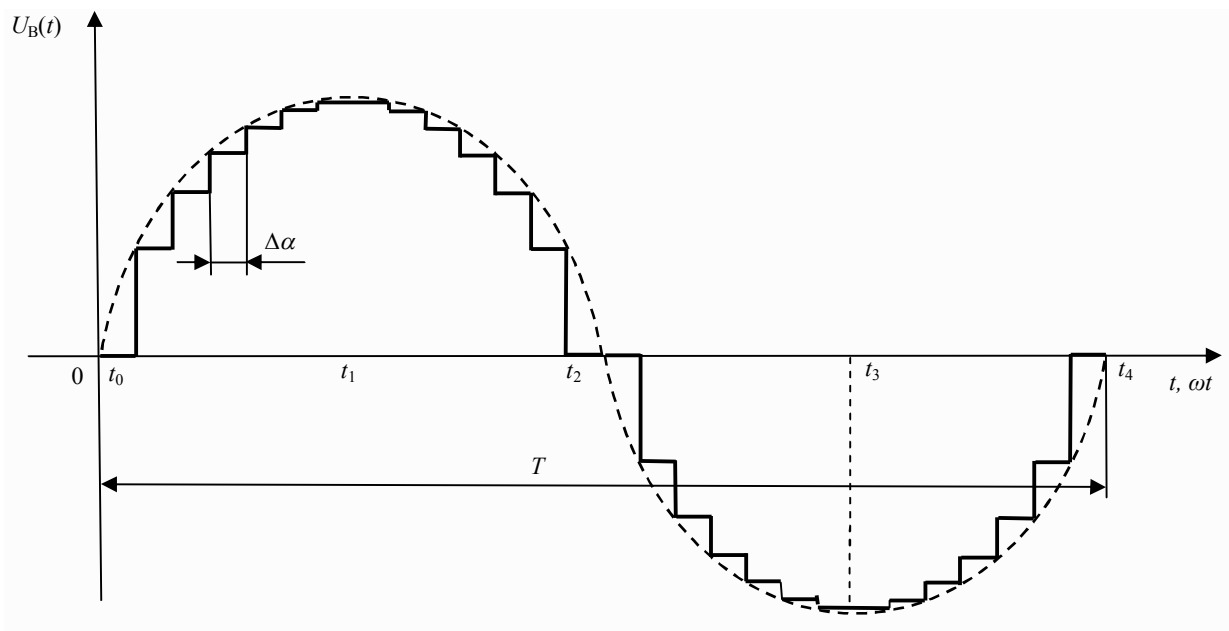


Рис. 2. Часова діаграма формування однофазного синусоїдальної напруги

Цифровий генератор працює наступним чином.

На першому виході БУ виробляється сигнал керування, зазвичай напруга, частотою ГОЗЧ, з виходу якого періодична послідовність імпульсів надходить на об'єднані рахункові входи з реверсних лічильників. Частота вихідних сигналів генератора,  $u_B(t)u_C(t)$ , визначається співвідношенням:

$$f = f_0/n,$$

де  $f_0$  – зразкова частота проходження імпульсів ГОЗЧ;  $n$  – кількість сходинок апроксимації на період ( $T = 1/fT = 1/f$ ) вихідних сигналів генератора.

Амплітуда вихідних сигналів встановлюється вихідними пристроями, які являють собою підсилювачі потужності з аттенуаторами. Це дозволяє регулювати амплітуду вихідних сигналів в широких межах незалежно від динамічного діапазону ЦАП. Завдання фазових зсувів вихідних сигналів генератора пояснимо нижче, а спочатку як приклад розглянемо принцип формування кусково-східчастого (квазисинусоїдного) сигналу будь-якої фази, наприклад,  $u_B(t)$ .

Нехай РЛ2 в початковому стані обнулений, сигнал на його виході дорівнює нулю (момент часу  $t_0$  на рис. 2) і подається з виходу БР2 на його вхід реверсу, що встановлений в режим підсумування, а ЦАП2 сигналом з виходу БР2 на його вхід управління, який встановлений в режим формування позитивної напівхвилі напруги  $u_B(t)$ .

З надходженням кожного імпульсу частоти  $f_0$  з ГОЗЧ стан РС2 отримує поодинокі прирощення (збільшення) і його наростаючим вихідним кодом здійснюється послідовне перемикавання адресів ПЗПр2, з виходу якого на кодовий вхід ЦАП2 послідовно вводяться коди миттєвих значень синусоїдальної функції  $\sin q \Delta\alpha$ , де:

$$\Delta\alpha = 2\pi f \Delta t, \quad \Delta t = T/n \quad \Delta t = T/n,$$

$$q = 0, (n/4-1)q = 0, (n/4-1).$$

На виході ЦАП2 формується перша чверть синусоїдальної напруги  $u_B(t)$  до моменту часу  $t_1$  (рис. 2). До цього моменту часу на РЛ2 надійде кількість імпульсів  $n/4$ , на виході БР2 утворюється сигнал, яким змінюється на протилежну полярність сигналу, що подається з його виходу на вхід реверсу РЛ2, лічильник перемикається в режим віднімання, а ЦАП2 залишається в тому ж стані.

З надходженням чергових  $n/4$  імпульсів з

виходу ГОЗЧ показ РЛ2 зменшуються, і коди миттєвих значень  $\sin q \Delta\alpha$  виводяться з ПЗУ2 на ЦАП2 у зворотному порядку. На виході ЦАП2 формується друга чверть синусоїдальної напруги  $u_B(t)$  до

моменту часу  $t_2$ , коли на РЛ2 надійде  $n/4$  імпульсів на віднімання (або всього  $n/2$  імпульсів). У цей момент часу в БР2 утворюється вихідний сигнал, який надходить на вхід управління ЦАП2, перемикаючи його полярність в режим формування негативної напівхвилі напруги  $u_B(t)$  і встановлюючи РЛ2 в режим підсумування. Наступні перемикавання режиму роботи РЛ2 відбуваються в моменти часу  $t_3$  (після надходження  $n/4$  імпульсів на віднімання або всього  $n$  імпульсів). Таким чином, до моменту часу  $t_4$  на виході ЦАП2, буде сформовано повний період синусоїдальної напруги  $u_B(t)$ , який через ВПр2 подається на вихід цифрового генератора. Надалі робота каналу формування напруги  $u_B(t)$  періодично повторюється протягом надходження вхідних імпульсів РЛ2.

Аналогічно формуються напруги  $u_C(t)u_C(t)$ , відрізняються тільки вихідні стани РЛ1 і РЛ3 щодо вихідного стану РЛ2 в момент часу  $t_0$ , які визначаються необхідними фазовими зсувами,  $\varphi_3\varphi_3$  напруг  $u_C(t)u_C(t)$ , щодо напруги  $u_A(t)$ .

Дискретність завдання фазових зсувів дорівнює  $\Delta\alpha = 2\pi/n$ . Так, для забезпечення дискретності  $\Delta\alpha = 1^\circ$  необхідно мати  $n = 360$ .

Фазові зсуви  $\varphi_3\varphi_3$ , виражені через дискретність, задаються десятковими числами і  $N_3 = \Delta\varphi_3/\Delta\alpha$   $N_3 = \Delta\varphi_3/\Delta\alpha$ , які встановлюються перемикачами БУ. Потім перетворювачами код-код фазові зсуви перетворюються в двійкові коди, а отримані сигнали двійкового коду чисел  $i$   $N_3N_3$  подаються на кодові (установчі) входи РЛ2 і РЛ3 відповідно. Фазові зсуви  $\varphi_3\varphi_3$  сигналів  $u_C(t)u_C(t)$  задаються в межах  $\pm 180^\circ$  щодо нульового значення фази сигналу  $u_A(t)$ . Тому РЛ3 не містить шини завдання фазового зсуву  $\varphi_1$  сигналу  $u_A(t)$ , а в момент введення кодів,  $\varphi_3\varphi_3$  обнуляється. Залежно від діапазону в якому знаходяться необхідні значення фазових зсувів  $\varphi_3\varphi_3$ , необхідно встановлювати відповідні вихідні режими РЛ2, РЛ3 і ЦАП2, ЦАП3, що наведені в табл. 1. Ці режими задаються перемикачами в БУ3 відповідні їм сигнали подаються з виходів БУ на другі входи БР2 і БР3.

В результаті на виходах цифрового генератора, а отже, військового еталону фазових зсувів, буде сформована система трифазних синусоїдальних напруг,  $u_B(t)u_B(t)$ ,  $u_C(t)u_C(t)$  певної частоти і з заданими амплітудами і фазами.

Таблиця 1 – Залежність діапазону фазових зсувів

Діапазон фазових зсувів	Від $0^\circ$ до $+90^\circ$	Від $+90^\circ$ до $+180^\circ$	Від $0^\circ$ до $-90^\circ$	Від $-90^\circ$ до $-180^\circ$
Режим РЛ2 і РЛ3	Підсумування	Віднімання	Віднімання	Підсумування
Полярність ЦАП2 і ЦАП3	+	+	-	-

Аналогічно формуються трифазні системи періодичних напруг будь-якої іншої форми. Відмінність полягає тільки в кодах миттєвих значень цих напруг, що записуються попередньо в ПЗПр.

### Висновки

Використання запропонованого принципу побудови еталону забезпечує такі техніко-економічні переваги:

- розширення функціональних можливостей за рахунок забезпечення можливості регулювання фазових зсувів трифазної системи напруг в межах  $\pm 180^\circ$ ;
- зменшення постійних складових похибок

вихідного сигналу еталона, що забезпечується високою точністю компенсації інструментальних похибок ЦАП за двополярного їх виконання;

– розширення діапазону регулювання амплітуд вихідних напруг, оскільки в запропонованому еталоні він не пов'язаний з динамічним діапазоном ЦАП;

– підвищення точності і стабільності завдання параметрів формованих сигналів.

Таким чином, результати дослідження дозволяють створювати відомчі еталони (вихідний та робочий) трифазної системи періодичних сигналів з регульованими параметрами цих сигналів і більш високими метрологічними характеристиками.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мошаренков В.В. Совершенствование военных эталонов фазовых сдвигов Вооруженных Сил Украины / В.В. Мошаренков // Системи озброєння і військова техніка. – 2014. – № 1 (37), С. 62-64.
2. Атамалян Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин. – М.: Дрофа, 2005. – 415с.
3. Дьяконов В.П. Генерация и генераторы сигналов. – М.: ДМК Пресс, 2009. – 384с.
4. Афонский А.А. Функциональные генераторы и генераторы сигналов специальной формы АТАКОМ / А. А. Афонский // Контрольно-измерительные приборы и системы. – 2011. – № 3, С. 15-22.
5. Дубровин В.С. Способы построения управляемых функциональных генераторов / В.С. Дубровин, А.М. Зюзин // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. – 2014. – №7, - С. 131-137.
6. Чинков В. М. Дослідження методу східчастої апроксимації синусоїдних сигналів з рівномірним розташуванням вузлів апроксимації у часі / В.М. Чинков, С.В. Мірошниченко // Системи обробки інформації. – 2004. – № 2(30). – С. 101-104.
7. Чинков В. М. Методика оцінки похибки цифроаналогового синтезу вимірювальних синусоїдних сигналів на основі кусково-східчастої апроксимації / В.М. Чинков, Т.Я. Наливайська // Системи обробки інформації. – 2010. – № 5(86). – С. 146-148.
8. Герасимов С.В., Дакі О.А., Яковлев М.Ю. Синтез полігармонійного вимірювального сигналу з будь-якою кількістю точок перемикання // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2018. – №79 (2). – С. 73-76. – DOI: 10.23939/istmtm2018/02/073.
9. Чинков В. Н. Прецизионные методы и калибраторы воспроизведения коэффициентов несимметрии трехфазной системы синусоидальных напряжений / В. Н. Чинков, В.В. Мошаренков // Український метрологічний журнал. – 2013. – № 3, С. 18-23.
10. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. – 3-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 768 с
11. Функциональный цифроаналоговый преобразователь в широкополосном цифрууправляемом калибраторе фазы / Сапельников В М, Хакимов Р. А, Коловертнов Г Ю, Шабанов М. А., Газизов А А // Приборы и техника эксперимента. – 2005 – № 4. – С. 43 – 46
12. Функциональные цифро-аналоговые преобразователи и их применение / Газизов А А., Сапельников В М // Физика волновых процессов и радиотехн-е системы – 2007. – № 3, том 10 – С. 109 – 118
13. Сапельников В.М., Максудов А.Д. Двухканальный калибратор фазы со ступенчатой аппроксимацией и коррекцией погрешностей // Приборы и системы управления. - 1997. - №4. С. 32-34
14. ДСТУ 7365-13. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання одиниці кута зсуву фаз між двома напругами: [Чинний від 2014-01-01]. – К.: Держстандарт України, 2013. – 7 с. – (Державний стандарт України).

Received (Надійшла) 12.10.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 17.01.2021

### Principle of construction of departmental standards three-phase voltage

V. Mosharenkov

**Abstract.** The role of sinusoidal signal generators in metrological maintenance of measuring equipment is constantly growing, while the requirements for the characteristics of their output signals are increasing. Classical analogue methods for generating sinusoidal signals have almost exhausted the possibilities of further accuracy growth, increasing the level of automation. The elimination or reduction of these disadvantages is possible when using a fundamentally new direction in the field of signal generation. To a large extent, these requirements are met by digital-to-analog synthesis of sinusoidal signals based on the formation of piecewise-step signals approximating a sinusoidal signal. Thus, the principle of building departmental standards of three-phase periodic signals with adjustable parameters of the generated signals with higher metrological characteristics based on their digital-to-analog synthesis using the piecewise step approximation method is proposed. Such methods are associated with a new direction in signal theory - digital-to-analog synthesis based on one of the types of piecewise step approximation. The research results allow us to create departmental standards (initial and working) of a three-phase system of periodic signals with higher metrological characteristics at a qualitatively new level. This task is particularly relevant in solving the problem of improving metrological support in the direction of performing metrological work.

**Keywords:** departmental standard of phase shifts, piecewise step signal, digital-to-analog converter, three-phase generator of periodic signals, metrological characteristics.