

УДК 398.1

В.М. Чинков, О.О. Ярохіна

*Харківський університет Повітряних Сил імені І. Кожедуба, Харків*

## ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ГЕНЕРАТОРІВ СИГНАЛІВ

*В статті розглянуті та досліджені основні тенденції розвитку вимірювальних функціональних генераторів, розглянуті три підходи до побудови цифрових функціональних генераторів на основі цифрового синтезу сигналів і для прикладу наведена методика такого синтезу одного з найпоширеніших вимірювальних сигналів – синусоїдального.*

**Ключові слова:** цифровий вимірювальний функціональний генератор, цифровий синтез сигналів, кусково-східчаста апроксимація./

### Вступ

**Постановка задачі.** Сучасний етап розвитку вимірювальної техніки характеризується зростанням уваги до швидких фізичних процесів. У зв'язку з цим ринок зарубіжної техніки інтенсивно насичується різними засобами динамічних вимірювань, серед яких важливу роль відіграють вимірювальні генератори сигналів. Найбільш широкі можливості при проведенні складних вимірювальних експериментів представляють вимірювальні функціональні генератори (ВФГ), які формують сигнали декількох

видів (синусоїдні, трикутні, прямокутні, експоненційні та інші), модулюючи різноманітні функції [1, 2], що розширює сфери використання ВФГ для тестування, відладки і дослідження найрізноманітнішої електронної апаратури.

**Аналіз літератури.** У зв'язку із зростаючими вимогами науки і техніки до можливостей і технічних характеристик ВФГ стрімко розширюється їх випуск провідними закордонними приладобудівними фірмами (зокрема VICTOR, Protek, АКТАКОМ, VELLEMAN, INSTRUMENTS тощо), їх розвитку приділяються чисельні публікації [1 – 5]. В цих пуб-

лікаціях розглядаються багаточисельні принципи побудови аналогових і цифрових ВФГ, наведено багато прикладів їх використання для різноманітних експериментальних досліджень в багатьох галузях науки і техніки. Проте всі вони мають несистемний характер, відрізняються хаотичністю, а іноді і протиріччівістю в поглядах авторів. Те саме стосується підходів в принципах побудови серійних промислових моделей ВФГ різними фірмами. До того ж відсутні теоретичні основи синтезу найбільш перспективних цифрових ВФГ прямого синтезу.

**Метою статті** є аналіз відомих принципів побудови ВФГ, виявлення основних тенденцій розвитку перспективних ВФГ і наведення прикладу методики прямого цифрового синтезу найпоширенішого вимірювального сигналу – синусоїдального.

### Основний матеріал

Все зростаючі вимоги до сигналів ВФГ (перш за все, до стабільності їх частоти і амплітуди, а також адекватності заданої форми) призвели розробників цих засобів вимірювання до необхідності переходу на цифрові методи синтезу сигналів і цифрову елементну базу. Це обумовило підвищення їх багатофункціональності, метрологічних та експлуатаційних характеристик і зниження вартості.

Можна відзначити три основні підходи до побудови ВФГ на основі цифрової схемотехніки:

- застосування синтезаторів частоти, що різко підвищує її стабільність і точність установки;
- застосування прямого цифрового синтезу форми обмеженої кількості різних видів вимірювальних сигналів;
- застосування цифрового синтезу вимірювальних сигналів з можливістю завдання довільної їх форми з допомогою як самого генератора, так і персонального комп'ютера.

Цифрові ВФГ ґрунтуються на методах цифроаналогового синтезу сигналів, тобто на завданні при проектуванні кодів миттєвих значень вихідного (потрібного) сигналу у визначені дискретні моменти часу та їх перетворенні в аналоговий сигнал за допомогою високочотного ЦАП в робочому режимі, тобто при експлуатації. Тим самим потрібний вимірюваний сигнал  $u(t)$  апроксимується з певною точністю сигналами іншої форми, наприклад кусково-східчастої або лінійно-східчастої, технічна реалізація яких більш проста. Як показує аналіз [5], за методичною похибкою апроксимації, яка характеризує ступінь наближення сформованого вимірювального сигналу до потрібного, кусково-східчаста апроксимація поступається перед іншими видами апроксимації (за однакової кількості ділянок апроксимації), але через більш просту апаратну реалізацію та значно меншу інструментальну похибку вона в цілому виявляється найбільш ефективною і тому оде-

ржала переважне застосування в цифрових генераторах [1, 3]. У теперішній час серійно випускаються цифрові генератори синусоїдальних і спеціальних сигналів, а також цифрові генератори імпульсів. Перехід від класичних (традиційних) аналогових методів формування (відтворення) вимірювальних сигналів до цифроаналогового синтезу забезпечує такі основні переваги:

- формування (синтез) вимірювальних сигналів будь-якої складної форми, а отже, створення універсальних багатофункціональних вимірювальних генераторів, що дозволяють формувати будь-яку безліч сигналів різних видів за однією й тією самою структурою основного каналу формування (синтезу) сигналів, але за рахунок змінного пакету програмного забезпечення;

- істотне підвищення метрологічних характеристик ВФГ: точності задання параметрів амплітудно-часових параметрів вихідних сигналів та їх стабільності;

- зменшення часу перехідних процесів при перестройці параметрів вихідного сигналу генератора, що особливо важливо при дослідженні об'єктів з швидкоплинними фізичними процесами;

- спрощення завдання та перестройки параметрів сигналів за будь-яким законом, у тому числі дистанційно;

- підвищення надійності та контролепридатності генераторів за рахунок використання переважно цифрової мікросхемотехніки;

- зменшення масогабаритних показників генераторів;

- значне зменшення вартості генераторів при формуванні визначеної номенклатури вимірювальних сигналів порівняно з класичними, аналоговими генераторами.

Як приклад, розглянемо методику прямого цифрового синтезу синусоїдального сигналу на основі його кусково-східчастої апроксимації.

При цьому найкращим є оптимальний синтез параметрів за критерієм мінімуму коефіцієнта гармонік чи максимуму відтворення синусоїдального сигналу. Оптимізація параметрів квазисинусоїдальної кусково-східчастої напруги  $u_c(t)$  за мінімумом коефіцієнта гармонік  $k_{гс}$  зводиться до оптимального вибору вузлів апроксимації цієї напруги як за рівнем  $u(t_i)$ , так і за часом  $t_i$ .

Квадрат коефіцієнта гармонік  $k_{гс}$  представимо у такому вигляді:

$$k_{гс} = \sum_{i=0}^{n-1} \int_{a_i}^{a_{i+1}} (U_i - A_{ik} \sin a - A_{ij} \cos a) da = \frac{1}{\pi A_1^2} \sum_{i=0}^{n-1} ((U_i)^2 \cdot \Delta a_i) - 1. \quad (1)$$

де  $A_1$  – амплітуда першої гармоніки сигналу  $u_c(t)$ ;  $A_{1x}$ ,  $A_{1y}$  – синфазна та квадратурна складові;

$$A_{1x} = \frac{1}{\pi} \sum_{i=0}^{n-1} U_i S_i \Delta \alpha_i; \quad A_y = \frac{1}{\pi} \sum_{i=0}^{n-1} U_i C_i \Delta \alpha_i;$$

$$S_i = \frac{\cos \alpha_i - \cos \alpha_{i+1}}{\alpha_{i+1} - \alpha_i}; \quad C_i = \frac{\sin \alpha_{i+1} - \sin \alpha_i}{\alpha_{i+1} - \alpha_i},$$

де  $\alpha = \omega t$ ;  $\alpha_i = \omega t_i$  – фазові координати вузлів апроксимації;  $\omega$  – кругова частота синусоїдальної напруги;

$$\Delta \alpha_i = \alpha_{i+1} - \alpha_i.$$

Задача оптимізації сигналу  $u_2(t)$  полягає у визначенні величин  $U_i$  та  $\alpha_i$ , щоб одержати мінімум коефіцієнта гармонік  $k_{гс}$ . Для розв'язання цієї задачі скористаємося методом невизначених множників Лагранжа:

$$\Phi = \sum_{i=0}^{n-1} (U_i^2 - \lambda U_i S_i - \mu U_i C_i) \Delta \alpha_i,$$

де  $\lambda, \mu$  – невизначені множники (коефіцієнти) Лагранжа. Отримаємо

$$U_i = \left( \frac{A_i}{S} \right) S_i, \quad S = \frac{1}{\pi} \sum_{i=0}^{n-1} S_i^2 \Delta \alpha_i \quad (2)$$

Підставивши (2) в (1), маємо

$$k_{гс} = \sqrt{1/s-1} \quad (3)$$

Знайдемо оптимальне розташування фазових координат апроксимації  $\alpha_i$  сигналу  $u_c(t)$ . Як випливає з виразу (3), мінімізація коефіцієнта гармонік  $k_{гс}$  сигналу  $u_c(t)$  еквівалентна максимізації величини  $S$  по змінній  $\alpha_i$  ( $dS/d\alpha_i = 0$ ), згідно з якою одержимо:

$$S_{i-1} + S_i = 2 \sin \alpha_i \quad (4)$$

де  $\alpha_n = \alpha_0 + 2\pi$ ;  $S_n = S_0$  – початкові (граничні) умови.

Зміст рівнянь (4) зводиться до такого: оптимальні фазові координати  $\alpha_i$  сигналу  $u_c(t)$  повинні розташовуватися так, щоб відхилення середніх значень синуса на двох сусідніх інтервалах ( $S_{i-1}$  і  $S_i$ ) від його значення в точці  $\alpha_i$  ( $\sin \alpha_i$ ) були рівні за модулем і протилежні за знаком. Зі збільшенням кількості сходинок  $n$  у сигналі  $u_c(t)$  величини  $\Delta \alpha_i$  стають малими, що дозволяє одержати асимптотичне розв'язання системи (4):

$$k_{гс} = a/n$$

де  $a$  – коефіцієнт, який приймає конкретні числові значення для трьох можливих методів кусково-східчастої апроксимації:  $\alpha_{опт}=1,54$ ;  $\alpha_z=1,81$ ;  $\alpha_p=1,63$ , відповідно для оптимальної, рівномірної в часі та рівномірної за рівнем апроксимації. Більш просту апаратурну реалізацію забезпечує рівномірна за часом кусково-східчаста апроксимація, тому вона може знайти переважне використання в сучасних цифрових ВФГ.

## Висновок

Проведений аналіз відомих розробок і сучасних серійних зразків вимірювальних Широкому поширенню таких ВФГ в останні 10 – 15 років сприяла розробка спеціалізованих для їх побудови великих інтегральних мікросхем, застосування яких не тільки здешевило ці засоби вимірювань, але й дозволило значно підвищити їх технічні характеристики. Подальше удосконалення цифрових ВФГ прямого синтезу пов'язане з використанням методики синтезу вимірювальних сигналів на основі кусково-східчастої апроксимації.

## Список літератури

1. *Современные функциональные генераторы за рубежом. Экспресс-информация за рубежом сер. ТС-5.* – М, 1988. – 13 с.
2. *Ноткин Л.Р. Функциональные генераторы и их применение.* – М.: Радио и связь, 1983 – 184 с.
3. *Дьяконов В.П. Генерация и генераторы сигналов / В.П. Дьяконов.* – М.: ДМК Пресс, 2009. – 384 с.
4. *Чинков В.Н. Основные тенденции развития цифровой измерительной техники // Украинський метрологічний журнал – 2000. – с. 18-21.*
5. *Горлач А.А., Минц М.Я., Чинков В.Н. Цифровая обработка сигналов в измерительной технике.* – К.: Техника, 1985. – 151 с.

Надійшла до редколегії 10.01.2013

**Рецензент:** д-р. техн. наук, проф. В.Б. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ СИГНАЛОВ

В.М. Чинкова, А.А. Ярохина

*В статье рассмотрены и исследованные основные тенденции развития измерительных функциональных генераторов, рассмотрены три подхода к построению цифровых функциональных генераторов на основе цифрового синтеза сигналов и для примера приведена методика такого синтеза одного из самых распространенных измерительных сигналов – синусоидального.*

**Ключевые слова:** цифровой измерительный функциональный генератор, цифровой синтез сигналов, кусково-ступенчатая, аппроксимация.

## BASIC PROGRESS OF MEASURING FUNCTIONAL GENERATORS OF SIGNALS TRENDS

V.M. Tchinkov, O.O. Yarokhina

*There are the considered and investigational basic progress of measuring functional generators trends in the articles, three going is considered near the construction of digital functional generators on the basis of digital synthesis of signals and for an example the brought methodology over of such synthesis of one of the most widespread measuring signals – sinewave.*

**Keywords:** digital measuring functional generator, digital synthesis of signals, cobbled-step, approximation.