

УДК 623.004.67

Р.М. Афтенцьєв

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

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ФОРМУВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИГНАЛІВ З НОРМОВАНИМ КОЕФІЦІЄНТОМ ГАРМОНІК

*В статті був проведений аналіз методів та засобів формування сигналу із заданим коефіцієнтом гармонік. При формуванні сигналів із заданим коефіцієнтом гармонік використовується в основному три методи: виділення сигналу вищих гармонік з періодичного сигналу довільної форми, підсумовування декількох гармонічних сигналів з необхідним співвідношенням частот і збагачення спектру синусоїдального сигналу.*

*Ключові слова:* цифро-аналоговий синтез, спектр, прецизійний сигнал, амплітуда, коефіцієнт гармонік.

### Вступ

**Постановка задачі.** Одним з найважливіших і пріоритетних напрямків науково-технічного прогресу, що служить основою якісного вдосконалення техніки, є подальший розвиток метрологічного забезпечення на всіх стадіях його життєвого циклу, зокрема його технічної бази – вимірювальної техніки, особливо цифрової.

**Метою статті** є аналіз методів та засобів формування сигналів із заданим коефіцієнтом гармонік, їх достоїнств та недоліків.

### Основний матеріал

**Метод видалення сигналу вищих гармонік з періодичного сигналу довільної форми.** Цей метод називають також методом формування сигналу із спектральних складових, амплітуди яких калібруються. Як такий сигнал найприйнятніший є прямокутний імпульс. Цей імпульс зручний тим, що у нього порівняно просто можна атестувати часові характеристики, а по них розрахувати амплітуду гармонічних складових. Амплітуди гармонічних складових періодичної послідовності прямокутних імпульсів визначаються простим математичним виразом, а шпаруватість послідовності імпульсів з великою точністю встановлюється по оберненню в

нуль певних складових. Спосіб визначення амплітуди імпульсів полягає у вимірюванні постійної складової імпульсів з подальшим перерахунком. Імпульси пропускають через фільтр нижніх частот, що має частоту зрізу нижче за частоту імпульсів. На виході фільтру утворюється тільки нульова складова спектру імпульсів, значення якої вимірюють. Амплітуда імпульсів розраховується за формулою, що містить постійну складову імпульсів,

$$U_m = \frac{U_0 T}{\tau},$$

де  $U_0$  – постійна складова;  $T$ ,  $\tau$  – період і тривалість імпульсів сигналу.

Калібрування з необхідною точністю амплітуд спектральних складових таким чином можна здійснити на частотах до 3 МГц. Постійну складову імпульсів вдається виміряти точніше при порівняно великих її значеннях – порядку десятків мілівольт. Достатньо визначити одне значення амплітуди складової, а нижчі рівні можна одержати, використовуючи спосіб зменшення амплітуд складових, що калібруються.

**Метод підсумовування гармонічних сигналів з необхідним співвідношенням частот.** Даний метод називають ще лічильним методом, суть якого полягає в наступному.

Розглянемо послідовність імпульсів, період якої значно перевищує тривалість імпульсів. Вважатимемо, що часові характеристики імпульсів залишаються постійними.

Тепер додамо по імпульсу в інтервалах між початковими імпульсами, при цьому додаткові імпульси повинні бути затримані від початкових на якийсь час, що дорівнює  $K \frac{T}{m}$ , де  $K$  і  $m$  – будь-які цілі позитивні числа, причому  $K < m$ ,  $T$  – період сигналу.

Спектр  $S_2(\omega)$  послідовності затриманих імпульсів визначається через спектр  $S_1(\omega)$  початкової послідовності згідно властивості перетворення Фур'є:

$$S_2(\omega) = S_1(\omega) e^{-j\omega K \frac{T}{m}} = S_1(\omega) \left( \cos 2\pi f K \frac{T}{m} - j \sin 2\pi f K \frac{T}{m} \right),$$

де  $f$  – частота сигналу.

Для частот, кратних  $m/T$ , вираз в круглих дужках дорівнює одиниці. Отже, спектральні складові на частотах  $f_m = \frac{m}{T}$  і  $f_n = n \frac{m}{T}$  початкової і додаткової послідовностей співпадають на фазі. Враховуючи сказане, можна записати  $S_2(2\pi n f_m) = S_1(2\pi n f_m)$ .

Визначимо амплітуди складових на частотах  $n f_m$  для сумарного сигналу. Як відомо, спектр суми сигналів дорівнює сумі спектрів. Оскільки амплітуди складових на частотах рівні, співпадають по фазі для обох послідовностей, то сумарна амплітуда буде в два рази більше.

Якщо на інтервалі  $T$  знаходиться  $p$  імпульсів, що відстають один від одного на інтервал  $K \frac{T}{m}$ , то амплітуди складових на частотах  $n f_m$  будуть в  $p$  рази більше, ніж амплітуди складових початкової послідовності на тих самих частотах.

Максимальне число імпульсів, затриманих один щодо одного на якийсь час  $\frac{T}{m}$ , яке може пройти за період  $T$ , дорівнює  $m$ . Спектр такої послідовності має складові тільки на частотах, кратних  $f_m$ ,  $U_x$ , причому їх амплітуди в  $m$  рази більше ніж амплітуди послідовності, в якій з'являється тільки один імпульс  $T$ . На практиці одержати зміну амплітуд, що калібруються, простіше, якщо як початкову використовувати послідовність імпульсів з частотою  $f_m$ . Якщо з кожних  $m$  імпульсів цієї послідовності прибрати  $q = m - p$  імпульсів, то амплітуди складових  $U_{mp}$  зменшується в  $\frac{p}{m}$  раз.

Для даного методу не має значення, яким чином видаляються імпульси: підряд, через один, через два або у випадковому поєднанні. Важливо тільки, щоб цей порядок зберігався в кожній серії з  $m$  імпульсів.

Описану властивість імпульсів можна сформулювати таким чином: якщо частота імпульсів в пачці кратна частоті проходження пачок, то при зміні коефіцієнта кратності  $m$  або числа імпульсів в пачці  $p$ , амплітуда спектральних складових на частотах, кратних частоті імпульсів в пачці, змінюватиметься в те саме число раз, що й відношення  $\frac{p}{m}$ .

Описаний метод дозволяє одержати максимальну зміну амплітуд в  $m$  раз/ Діапазон зміни амплітуд можна розширити, якщо використовувати складові на частотах менших  $f_m = \frac{m}{T}$ .

Спектр пачок імпульсів визначається через спектр початкової послідовності. Передбачається, що в пачці  $p$  імпульсів, і вони слідуєть безперервно через інтервали часу  $\frac{T}{m}$ . Амплітуди складових дорівнюють модулю спектру пачок імпульсів. При такому методі формування максимальні амплітуди складових на частотах  $(2n + 1) \frac{f_m}{m}$ , де  $n = 0, 1, 2, \dots$ , виходять при  $p = m/2$ , мінімальне – при  $p = 1$ . Розширення діапазону виходить за рахунок того, що в даному випадку ми можемо зробити частоту  $f_m$  достатньо високою, оскільки зміни, що калібруються, одержуємо на частотах, нижчих, ніж  $f_m$ , а у попередньому випадку на частотах, кратних  $f_m$ .

Підрахувати кількість імпульсів  $p$ ,  $q$  і  $m$  зручно за допомогою електронних лічильників. Іншими словами в даному методі зміна рівня амплітуд визначається за допомогою рахунку числа імпульсів. Звідси слідує назва методу. Метод дозволяє одержати ряд дискретних значень зміни амплітуд складових, що калібруються. Максимально можливе число значень, що калібруються, при заданому  $m$  дорівнює  $m^2$ . Чим більше  $m$ , тим частіше розташовані точки, що калібруються. Діапазон зміни амплітуд на практиці обмежується роздільною здатністю приладу.

**Метод збагачення спектру синусоїдального сигналу.** Цей метод іноді називають методом формування сигналу з відношенням амплітуд двох спектральних складових, що калібруються.

Похибка вимірювання відношення амплітуд складових є його основною характеристикою. Найбільш доцільно перевіряти цю характеристику за допомогою сигналу, у якого відношення між амплітудами складових калібрується. На перший погляд, здається, що достатньо виміряти часові характеристики якого або сигналу, наприклад, прямокутного імпульсу, розрахувати відношення амплітуд його складових і задача вирішена. Проте, похибки визначення відношення амплітуд будуть тим більше, чим більше відрізняються амплітуди складових.

Принцип формування сигналу, запропонований в розглянутому раніше «рахунковому методі», дозволяє одержати складові з відношенням амплітуд, що калібруються, в достатньо широкому діапазоні. При

цьому, похибка визначення відношення амплітуд складових мало залежить від похибки визначення часових характеристик імпульсів.

Послідовність прямокутних імпульсів з частотою походження  $f_m$  має свій спектр. Якщо з кожних  $m$  імпульсів цієї послідовності залишити деяке число  $p$  імпульсів, а інші усунути, то в спектрі цього сигналу з'являться складові на частотах, кратних  $f_m/m$

Визначимо відношення між амплітудою складової з номером  $m$  і амплітудами інших складових в загальному вигляді для серії імпульсів. Для прямокутних імпульсів при  $\tau_n/T = 1/(2m)$  амплітуда  $m$ -ої складової:

$$|S(\omega_m)| = \frac{2A_n}{m\pi}$$

З урахуванням того, що  $f_m = m/T$  одержимо вираз для амплітуди  $m$ -ї складової:

$$U_m = \frac{2A_n p}{\pi m}$$

Визначимо амплітуди складових з номером  $m+a$ , де  $a = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ , і одержуємо

$$U_m = \frac{2A_n}{(m+a)\pi} \cos \frac{a\pi}{m2}$$

Провівши перетворення, одержуємо відношення амплітуд складових з номерами  $m$  і  $m+a$ . Найцікавіший випадок, коли  $a = 1$ , тобто використовуються складові, що стоять поряд. З такими складовими зручніше працювати на практиці. Крім того, похибка визначення відношення амплітуд обумовлена відмінністю форми імпульсу від ідеальної, в цьому випадку мінімальна. Чим ближче розташовані складові, тим менше вплив форми на похибку. В межах, коли  $a = 0$ , похибка дорівнює нулю, навіть для імпульсів невідомої форми (випадок алогічний розглянутому в «рахунковому методі»). Метод збагачення спектру дозволяє одержати велике число точок, що калібруються. Чим більше  $m$ , тим більше число точок виходить, тим густіше вони розташовані і тим більше значення відношення може набути.

Для цього методу, як для «рахункового методу» і методу формування сигналу з рівнем амплітуд складових, що калібруються, доцільно використовувати прямокутні імпульси. Таким чином, метод формування сигналу, заснований на збагаченні спектру, дозволяє набути значення амплітуд складових в широкому діапазоні напруг і відношення, що калібрується.

## Висновок

Підводячи підсумок проведеному аналізу відомих методів, наголосимо на таких їх недоліках:

- складність апаратної реалізації;
- складність перебудови коефіцієнта гармонік в широкому діапазоні його значень і частотному діапазоні;
- недостатня точність завдання коефіцієнта гармонік;
- труднощі експлуатації калібраторів, заснованих на відомих методах, і автоматизації перебудови параметрів сигналів;
- складність, а іноді неможливість управління гармонічним складом формованого сигналу.

Підвищення ефективності використання цих методів досягається, як правило, помітним ускладненням процесу вимірювання і апаратної реалізації, експлуатації і метрологічного обслуговування основних або відповідних засобів вимірювань, так що вказані методи значною мірою вичерпали свої можливості. Тому потрібно розробити альтернативний метод формування сигналів, нормованих по коефіцієнту гармонік, особливо з використанням цифрової вимірювальної техніки.

## Список літератури

1. Чинков В.М. Цифрові вимірювальні прилади / В.М. Чинков. – Х.: МО, 2007. – Ч. 2. – 360 с.
2. Дмитриков Ф.В. Высокоэффективные формирователи гармонических колебаний / Ф.В. Дмитриков, Н.Б. Петяшин, Н.А. Сиверс. – М.: Радио и связь, 1988. – 154 с.

Надійшла до редколегії 23.06.2010

Рецензент: канд. техн. наук, доцент В.Б. Кононов. Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИГНАЛОВ С НОРМИРУЕМЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ГАРМОНИК

Р.М. Афтентев

*В статье проведен анализ методов и средств формирования сигнала с заданным коэффициентом гармоник. При формировании сигналов с заданным коэффициентом гармоник используется в основном три метода: выделение сигнала высших гармоник из периодического сигнала произвольной формы, суммирование нескольких гармонических сигналов с необходимым соотношением частот и обогащение спектра синусоидного сигнала.*

**Ключевые слова:** цифро-аналоговый синтез, спектр, прецизионный сигнал, амплитуда, коэффициент гармоник.

## RESEARCH OF METHOD OF DIGITAL-ANALOG SYNTHESIS OF SIGNALS

R.M. Aftentev

*The analysis methods and facilities of forming of signal with the set coefficient accordions was conducted in the article. At forming of signals with the set coefficient accordions three methods are used mainly: selection of signal of higher accordions from the periodic signal of arbitrary form, adding up of a few harmonious signals with necessary correlation of frequencies and enrichment of spectrum forms of sine signal.*