

УДК 621.317

С. П. Кононов, к. т. н., доц.; В. Д. Росохай**ВИМІРЮВАННЯ ЧАСТОТИ МІТОК У ПРИСТРОЯХ НА ОСНОВІ
СВІП-ГЕНЕРАТОРА**

У статті запропоновано методи визначення частоти свіп-генератора за допомогою формування частотних міток опорними генераторами, проаналізовано похибку вимірювання частоти міток, обумовлену нелінійністю свіп-генератора.

Ключові слова: свіп-генератор, частотна мітка, стробоскопічний змішувач, опорний генератор, коефіцієнт нелінійності розгортки, формування і аналіз часових інтервалів, максимальний та граничний номери гармонік.

Вступ

При визначенні параметрів електронних пристроїв і ліній зв'язку важливо знати їх частотні характеристики, знаходження яких є відносно складною операцією. Для спрощення вимірювання частотних характеристик використовують панорамні прилади на основі свіп-генераторів, при цьому постає проблема формування сітки частотних міток та визначення їх частот.

Існує кілька методів визначення частот міток, наприклад, такі як зіставлення напруги керування свіп-генератора з частотою, зупинка розгортки свіп-генератора і вимірювання його частоти за допомогою частотоміра, використання прямого цифрового синтезу [1, 2]. За першим способом забезпечується висока швидкодія при широкій смузі гойдання свіп-генератора, але є низькою точність визначення частоти. Зупинка розгортки свіп-генератора і вимірювання частоти міток частотоміром дає точні результати, але потребує більше часу для визначення частотних характеристик. Прямий цифровий синтез дозволяє однозначно зіставити цифровий код керування з частотою свіп-генератора, але прилади за технологією прямого синтезу мають частотні обмеження.

Виникає задача розробки методів, які б дозволили з високою швидкістю і маленькою похибкою виміряти частоту міток у панорамних приладах на основі свіп-генератора діапазонів УВЧ, НВЧ.

Методи вимірювання частоти міток

У [3] запропонований метод вимірювання частоти міток і пристрій на основі двох опорних генераторів, які дозволяють вирішити поставлену задачу.

З метою зменшення похибки вимірювання частоти мітки пропонується у вимірювач [3] ввести третій опорний генератор з частотою $f_0 - F$ (рис. 1).

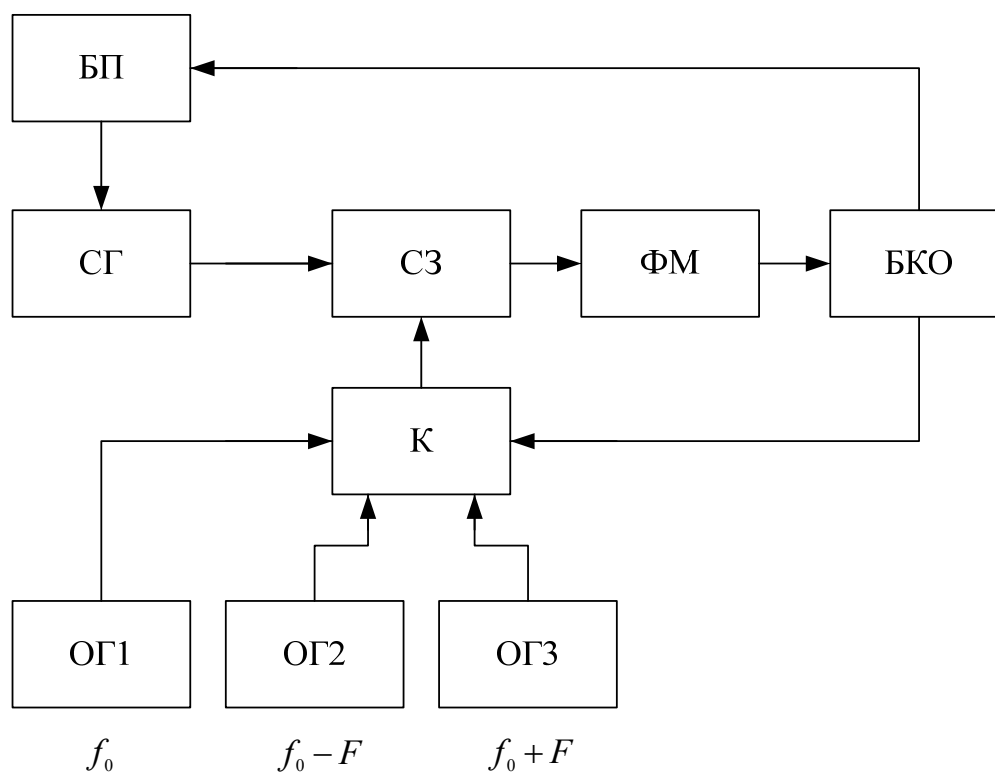


Рис. 1. Вимірювач частоти міток

Частота f вихідної напруги свіп-генератора (СГ), підключеного до входу стробоскопічного змішувача (СЗ) змінюється під час прямого ходу напруги розгортки блоку перестройки (БП) за лінійним законом. На інший вхід змішувача подається напруга з одного з трьох опорних генераторів (ОГ). Гармоніки вихідної напруги опорних генераторів ОГ1-ОГ3 розподілені рівномірно у робочому діапазоні частот з кроком f_0 , $f_0 - F$, $f_0 + F$ відповідно. Отже, на виході змішувача будуть спостерігатися „нульові биття”, за якими формувач міток (ФМ) створює імпульси міток на вході блоку керування та обчислення (БКО). З підключенням ОГ1 перша мітка відповідає моменту часу, коли $f = (n-1)f_0$, де $n = 2,3,4\dots$ Після першої мітки ключ (К) переключує вхід змішувача на генератор ОГ2. Тоді друга мітка з’явиться, коли $f = n(f_0 - F)$. Після цього БКО знову переводить ключ у положення, при якому на вхід змішувача подається напруга від генератора ОГ1 і наступна третя мітка буде відповідати моменту часу, коли $f = nf_0$. Часовий інтервал між другою і третьою мітками

$$\tau_- = \frac{nf_0 - n(f_0 - F)}{\eta} = \frac{nF}{\eta},$$

де η – швидкість зміни частоти свіп-генератора.

Після того, як сформована третя мітка, ключ за допомогою БКО приєднує до змішувача генератор ОГ3. Четверта мітка з’явиться, коли $f = n(f_0 + F)$, часовий інтервал між третьою і четвертою мітками

$$\tau_+ = \frac{n(f_0 + F) - nf_0}{\eta} = \frac{nF}{\eta}.$$

Після четвертої мітки БКО переводить ключ у положення, при якому на змішувач подається напруга від генератора ОГ1, і наступна п'ята мітка буде відповідати моменту часу, коли $f = (n+1)f_0$.

Інтервали між першою і третьою мітками, третьою і п'ятою мітками будуть становити відповідно

$$\tau_1 = \frac{nf_0 - (n-1)f_0}{\eta} = \frac{f_0}{\eta},$$

$$\tau_2 = \frac{(n+1)f_0 - nf_0}{\eta} = \frac{f_0}{\eta}.$$

Тоді частота третьої мітки, що вимірюється

$$f_M = nf_0 = \frac{\tau_+ + \tau_-}{\tau_1 + \tau_2} \frac{f_0^2}{F}.$$

Точність вимірювання частоти мітки зростає у зв'язку з тим, що у вимірювачі, на відміну від [3], компенсується вплив нелінійності розгортки свіп-генератора на результат.

Послідовність міток, що формуються у вимірювачі, наведено на рис. 2. Усі сигнали

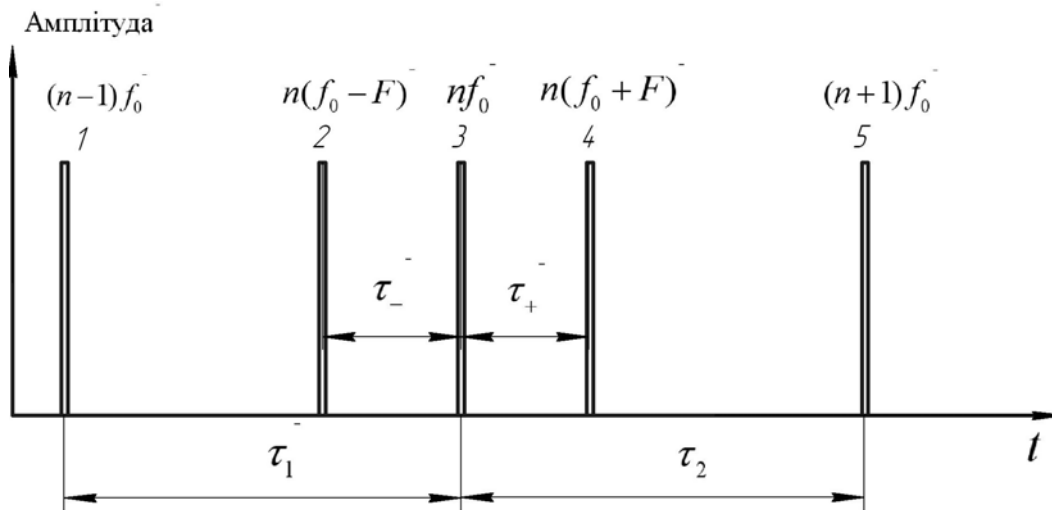


Рис. 2. Послідовність міток, що формуються у вимірювачі

керування формуються БКО послідовно програмним шляхом. У залежності від швидкості зміни частоти свіп-генератора та її коефіцієнта нелінійності τ_- , τ_+ , τ_1 і τ_2 приймають різні значення для однієї і тієї ж мітки f_M . У випадку сталої швидкості зміни частоти свіп-генератора η

$$\tau_+ = \tau_- = \tau,$$

$\tau_1 = \tau_2 = \tau_0$. Формула для частоти третьої мітки

$$f_M = \frac{\tau}{\tau_0} \frac{f_0^2}{F},$$

збігається з формулою, за якою визначається частота мітки в [3]. Послідовність міток, що формуються в пристрої [3], наведено на рис. 3.

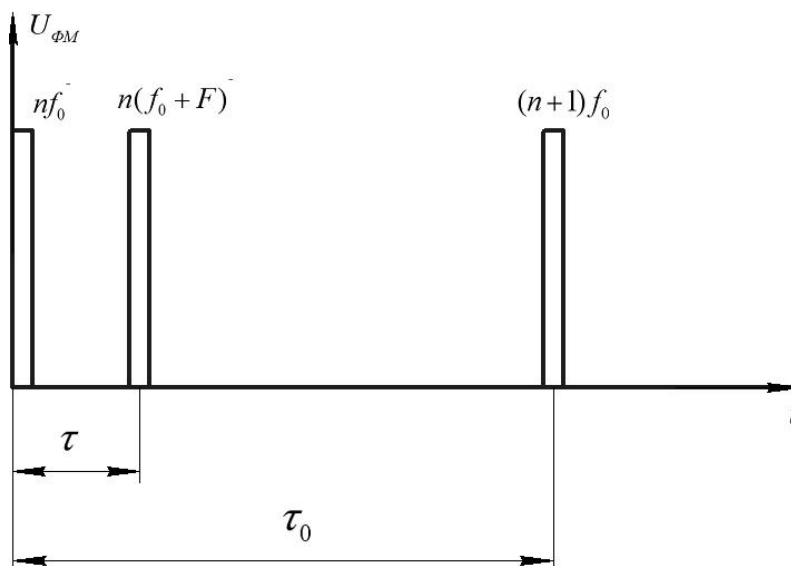


Рис. 3. Послідовність міток, що формуються у вимірювачі [3]

Виконаємо нормування часової залежності частоти f свіп-генератора за віссю ординат до $y = f/f_m$, за віссю абсцис – до $x = t/T_p$, де f_m – максимальна частота, а T_p – період розгортки частоти свіп-генератора. Найгірший, з точки зору впливу нелінійності розгортання на точність визначення частоти, випадок – це зміна частоти f за період розгортки від $(n-1)f_0$ до $(n+1)f_0$ (рис. 4).

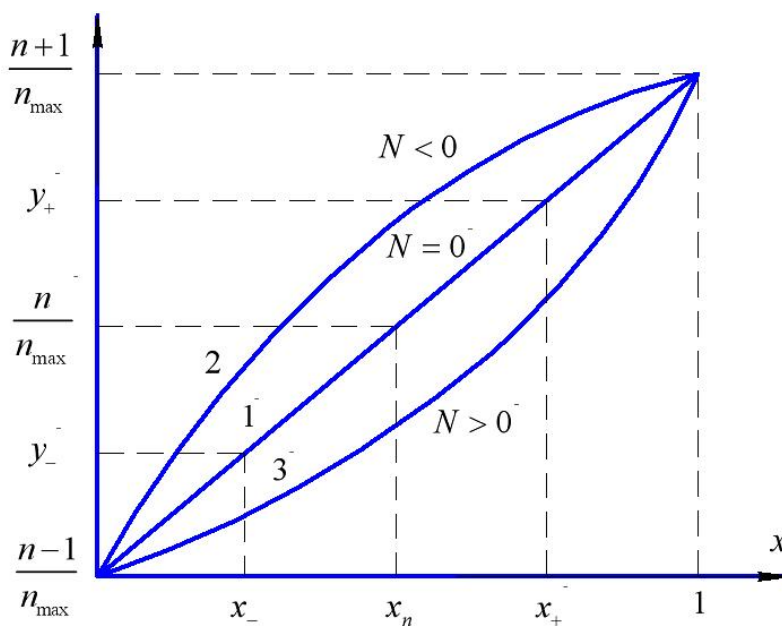


Рис. 4. Лінійна та нелінійна зміна частоти свіп-генератора

Тоді для лінійної зміни частоти f (рис.4, крива 1) у вимірювачі з двома опорними генераторами [1] номер гармоніки

$$n = n_{\max} \frac{\tau}{\tau_0} = n_{\max} \frac{x_+ - x_n}{1 - x_n}, \quad (1)$$

де $n_{\max} = \frac{f_0}{F}$ – максимальний номер гармоніки, який відповідає максимальній частоті свіп-генератора f_{\max} . Для вимірювача (рис. 1)

$$n = n_{\max} \frac{\tau_- + \tau_+}{\tau_1 + \tau_2} = n_{\max} (+x_+ - x_-). \quad (2)$$

Лише теоретично зміна у часі частоти свіп-генератора відбувається за лінійним законом. Тому частота мітки знаходиться за (1, 2) з похибкою, яка залежить від коефіцієнта нелінійності реального свіп-генератора [4]. Для створення в блоці перестройки напруги, що лінійно змінюється, використовують спосіб перезаряду конденсатора постійним струмом [4]. Незважаючи на спеціальні схемні рішення (застосування початкової ділянки експоненти, від'ємного зворотного зв'язку в інтеграторі, е. р. с. компенсації та ін.) отримати нульовий коефіцієнт нелінійності не вдається.

Похибка вимірювання, обумовлена нелінійністю свіп-генератора

Напруга перестройки i , відповідно, частота f свіп-генератора змінюються за експоненціальним законом (рис. 4, криві 2, 3)

$$y = \frac{n-1}{n_{\max}} + \frac{2}{n_{\max}} \cdot \frac{e^{Nx} - 1}{e^N - 1}, \quad (3)$$

де N – коефіцієнт нелінійності розгортки.

У випадку нелінійності знайдемо вирази для x_n, x_-, x_+ . Підставивши в (3) значення

$$y(x_n) = \frac{n}{n_{\max}}, \text{ отримаємо:}$$

$$\frac{n}{n_{\max}} = \frac{n-1}{n_{\max}} + \frac{2}{n_{\max}} \cdot \frac{e^{Nx_n} - 1}{e^N - 1},$$

звідки

$$x_n = \frac{1}{N} \ln\left(\frac{e^N - 1}{2} + 1\right). \quad (4)$$

Значення y в момент часу x_- дорівнює

$$y(x_-) = \frac{n(f_0 - F)}{n_{\max}} = \frac{n}{n_{\max}} \left(1 - \frac{1}{n_{\max}}\right)$$

або

$$\frac{n-1}{n_{\max}} + \frac{2}{n_{\max}} \cdot \frac{e^{Nx_n} - 1}{e^N - 1} - \frac{n}{n_{\max}^2} = \frac{n-1}{n_{\max}} + \frac{2}{n_{\max}} \cdot \frac{e^{Nx_-} - 1}{e^N - 1}.$$

Після перетворень отримаємо

$$x_- = \frac{1}{N} \ln \left[\frac{e^N - 1}{2} \left(2 \frac{e^{Nx_n} - 1}{e^N - 1} - \frac{n}{n_{\max}} \right) + 1 \right]. \quad (5)$$

Аналогічно момент часу

$$x_+ = \frac{1}{N} \ln \left[\frac{e^N - 1}{2} \left(2 \frac{e^{Nx_n} - 1}{e^N - 1} + \frac{n}{n_{\max}} \right) + 1 \right]. \quad (6)$$

Підставивши (4 – 6) у (1), (2), будемо мати розрахункові формули для знаходження номера гармоніки n_p , а, відповідно, частоти мітки f_M .

Точне значення номера гармоніки визначається за формулою $n = n_{\max} y(x_n)$, тоді похибка визначення номера гармоніки $\Delta n = n_p - n$.

На рис. 5, 6 наведені залежності абсолютної похибки Δn визначення номера гармоніки від $z = \frac{n}{n_{\max}}$ для різних значень коефіцієнта нелінійності свіп-генератора у випадках застосування у вимірювачі частоти міток двох [3] і трьох (рис. 1) опорних генераторів.

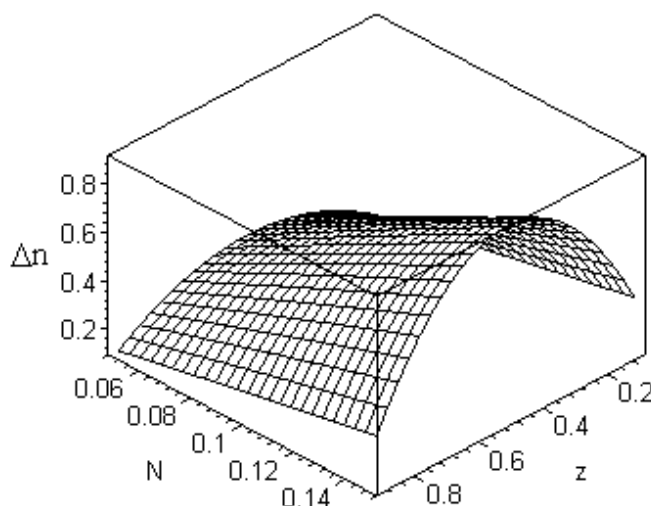


Рис. 5. Абсолютна похибка визначення номера гармоніки вимірювача з двома опорними генераторами

Номер гармоніки буде визначатися коректно, коли виконується умова $\Delta n < 0,5$. Пов'язано це з тим, що номер гармоніки може бути тільки цілим числом. Після вимірювання часових інтервалів x_n , x_- , x_+ і обчислення n_p точне значення номера гармоніки n буде знайдено за допомогою операції закруглення.

Проведемо дослідження залежності максимально можливої кількості гармонік n_{\max} опорного генератора з частотою f_0 від z для різних значень коефіцієнта нелінійності свіп-генератора у випадках застосування у вимірювачі частоти міток двох (рис. 7) і трьох (рис. 8) опорних генераторів. Аналіз залежностей допоможе пов'язати між собою такі основні параметри свіп-генератора, як робочий діапазон частот, частотний крок міток, смугу гойдання.

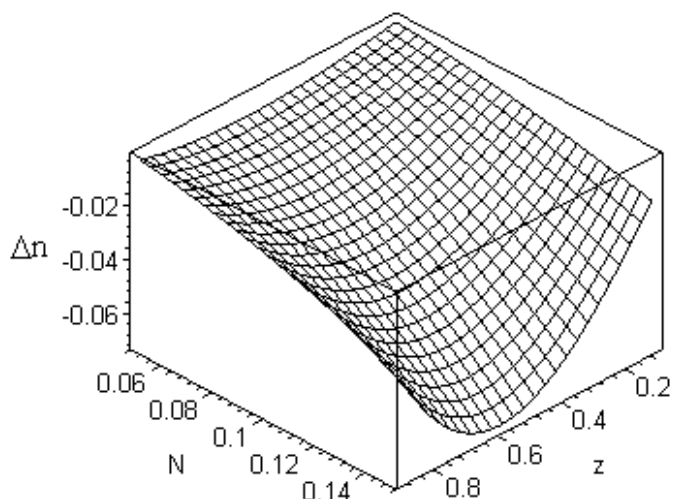


Рис. 6. Абсолютна похибка визначення номера гармоніки вимірювача з трьома опорними генераторами

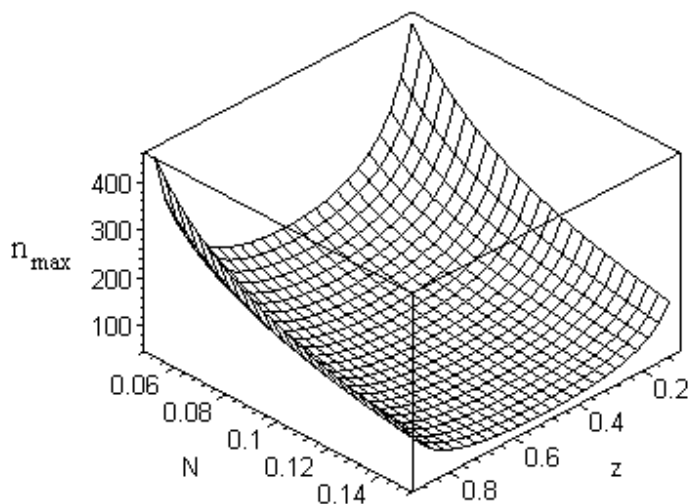


Рис. 7. Максимальна кількість гармонік вимірювача з двома опорними генераторами

Проведемо нормування похибки Δn до n_{\max} , тоді умова коректного визначення частоти буде мати вигляд

$$\frac{0,5}{n_{\max}} > \frac{|\Delta n|}{n_{\max}}$$

Тоді для вимірювача з двома опорними генераторами [3] отримаємо такий вираз для максимального номера гармоніки

$$n_{\max} = \frac{1}{2} \left(\frac{x_+ - x_n}{1 - x_n} - z \right)^{-1},$$

а для вимірювача з трьома опорними генераторами (рис. 1)

$$n_{\max} = \frac{1}{2(x_+ - x_- - z)}.$$

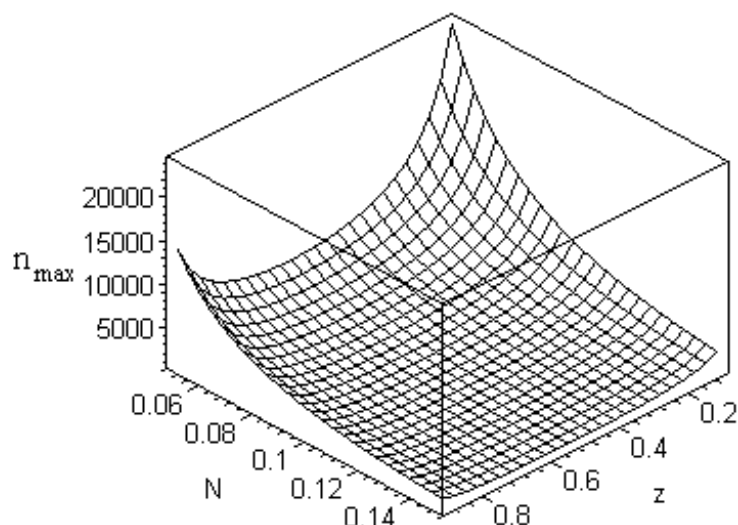


Рис. 8. Максимальна кількість гармонік вимірювача з трьома опорними генераторами

Отримані криві мають мінімуми, які відповідають умові $\frac{\partial n_{\max}}{\partial z} = 0$. Можна говорити про те, що для кожного коефіцієнта нелінійності свіп-генератора існує свій граничний номер гармоніки $n_{ГР}$. Якщо максимальний номер гармоніки n_{\max} буде перевищувати граничне значення, то в усьому частотному діапазоні свіп-генератора разом з правильно сформованими мітками, будуть такі, частота яких визначена з абсолютною помилкою f_0 або більше. На рис. 9 наведені залежності граничного номера гармоніки $n_{ГР}$ від коефіцієнта нелінійності свіп-генератора N .

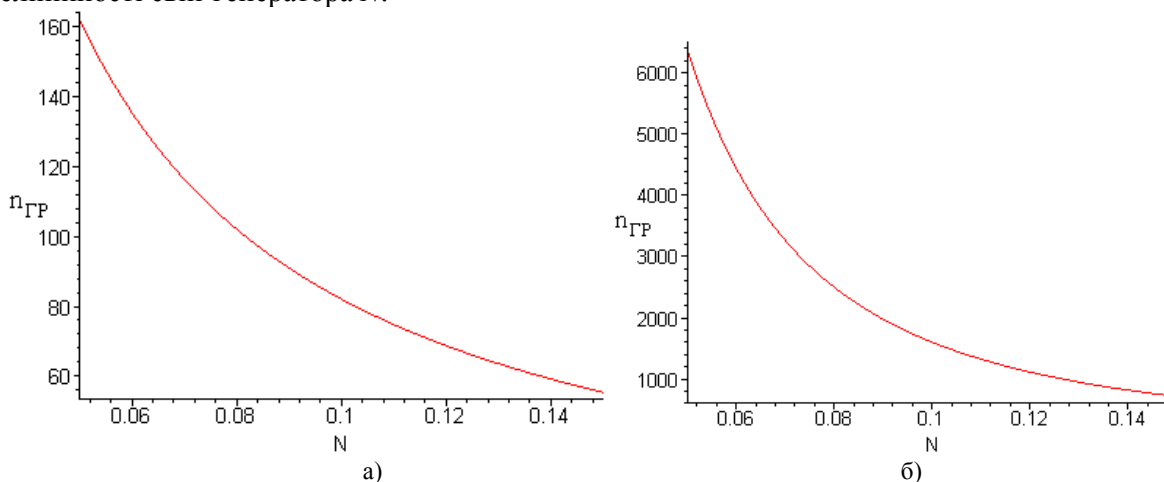


Рис. 9. Граничний номер гармоніки опорного генератора з частотою f_0 (а – два опорних генератори, б – три опорних генератори)

Можна запропонувати таке використання розглянутих залежностей при проектуванні пристроїв на основі свіп-генератора. За відомим коефіцієнтом нелінійності свіп-генератора N знаходимо граничний номер гармоніки $n_{ГР}$. Потім за відомою максимальною робочою частотою f_{MAX} розраховуємо частоту $f_0 = f_{MAX} / (0,8 \cdot n_{ГР})$ і частоту зсуву, на яку різняться частоти опорних генераторів, $F = f_{MAX} / (0,8 \cdot n_{ГР}^2)$. Таким чином, стають відомими мінімально допустимий крок міток вимірювача частоти f_0 і мінімальна смуга гойдання свіп-генератора

$3f_0$. Наприклад, нехай максимальна робоча частота свіп-генератора $f_{MAX} = 10$ ГГц, а коефіцієнт нелінійності $N \leq 0,1$. Знаходимо $n_{ГР} = 84$ (рис. 9, а). Визначаємо крок міток $f_0 = 10 \cdot 10^3 / (0,8 \cdot 84) \approx 150$ МГц, частоту зсуву $F = (10 \cdot 10^3) / [0,8 \cdot (84)^2] = 1,7715$ МГц. Мінімальна смуга гойдання свіп-генератора становить $\Pi_{MIN} = 3f_0 = 450$ МГц.

Висновки

1. Розглянуті основні методи визначення частоти міток у пристроях на основі свіп-генератора. Запропоновані методи побудови вимірювача з двома і трьома опорними частотами. Вимірювання здійснюються за період розгортки, тобто в області великого часу. Можливе визначення частоти міток у свіп-генераторах зі значною швидкістю зміни частоти.

2. Проаналізовані похибки вимірювання, що викликані нелінійністю розгортання частоти свіп-генератора. Запропоновано порядок розрахунку основних параметрів пристроїв на основі свіп-генератора, таких як крок міток, частота зсуву, смуга гойдання. Доведено, що вимірювач з трьома опорними частотами при рівних коефіцієнтах нелінійності має менший крок міток, тобто меншу похибку визначення частоти свіп-генератора у порівнянні з вимірювачем з двома опорними частотами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений / Ф. Мейзда; пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 535 с.
2. Ридико Л. DDS: прямой цифровой синтез частоты / Л. Ридико // Компоненты и технологии. – 2001. – №7. – С. 50 – 54.
3. Кофанов В. Л. Визначення частоти міток у НВЧ вимірювачах частотних характеристик / В. Л. Кофанов, С. П. Кононов, Є. М. Вельгус // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2009. – №1. – С. 59 – 64.
4. Ерофеев Ю. Н. Импульсная техника / Ю. Н. Ерофеев – М.: Высшая школа, 1984. – 391 с.

Кононов Сергій Павлович – к. т. н., доцент кафедри телекомунікаційних систем і телебачення.

Росохай Вероніка Дмитрівна – магістрант кафедри телекомунікаційних систем та телебачення. Вінницький національний технічний університет.