

УДК 621.317

Метод визначення частоти СВІП-генератора панорамного вимірювача частотних характеристик

Кононов С. П., Негур А. А.

Вінницький національний технічний університет

E-mail: andrii.negur@vntu.net

В статті на основі відомого методу з двома опорними генераторами наведено базову структурну схему вимірювача частоти СВІП-генератора з одноканальним частотно-часовим перетворювачем, основним вузлом якого є стробоскопічний змішувач. Доведено, що використання як опорних генераторів на кварцових резонаторах суттєво знижує вплив складової похибки визначення частоти, яка обумовлена частотною нестабільністю генераторів. Вдосконалено метод з двома опорними генераторами, базову структурну схему вимірювача доповнено третім опорним генератором. Встановлено, що при застосуванні вдосконаленого методу складова похибка визначення частоти свіп-генератора, яка викликана нелінійністю розгортки, зменшується на порядок. Знайдено взаємозв'язок між множителем та коефіцієнтами нелінійності розгортки свіп-генератора, який може бути використаний при проектуванні вимірювача для формування вимог до частот опорних генераторів.

Ключові слова: частотний характеріограф; свіп-генератор; частотно-часове перетворення; стробоскопічний змішувач; опорний генератор

Вступ

Використання панорамних вимірювачів частотних характеристик або частотних характерографів значно підвищує продуктивність праці регулювальників та експлуатаційників радіоелектронних і телекомунікаційних систем.

Однією з головних функцій частотного характерографа є формування ним частотного масштабу, тобто визначення частоти свіп-генератора, який входить до його складу. Високоякісні характерографи повинні в широкому частотному діапазоні мати малу похибку формування масштабних міток, автоматично, незалежно від смуги хитання свіп-генератора, визначати їх частоту.

Відомі різні способи визначення частоти свіп-генератора. До основних відносять: застосування цифрових частотних синтезаторів з ідентифікацією частоти за відомим кодом керування [1], прямий вимір частоти свіп-генератора без зупинки або із зупинкою хитання [2], непрямий вимір частоти за відомими напругою або струмом керування. Цифрові синтезатори ускладнюють вимірювальне обладнання, непрямий вимір без зупинки хитання потребує встановлення високостабільного діапазонного генератора, прямий вимір із зупинкою хитання знижує швидкодію характерографа. Визначення частоти за відомими напругою, струмом керування не забезпе-

чує високої точності формування частотного масштабу і в сучасних приладах не використовується.

У статті пропонується метод визначення частоти свіп-генератора шляхом використання в характерографі частотно-часового перетворення. Його перевагою є перенесення без втрати точності вимірів з області малого часу в область великого часу, що спрощує обладнання. Також в статті детально аналізується вплив на похибку визначення частоти нелінійності розгортання свіп-генератора.

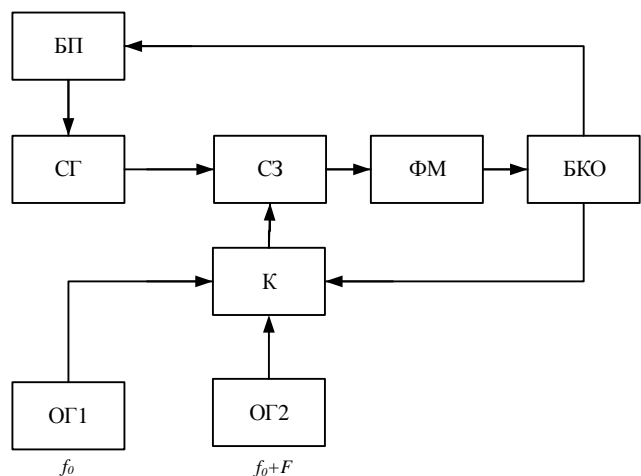


Рис. 1. Вимірювач частоти міток

1 Постановка задачі

З метою автоматизації та зменшення часу вимірювання в [3] запропоновано визначати частоту свіп-генератора за методом з двома опорними генераторами. Базова одноканальна структурна схема з частотно-часовим перетворенням, яка реалізує цей метод, наведена на рис. 1.

Частота вихідної напруги свіп-генератора (СГ), підключеного до одного з входів стробоскопічного змішувача (СЗ) змінюється за лінійним законом під час прямого ходу напруги від блоку перестройки (БП). На інший вхід змішувача через ключ (К), керований від блоку керування та обчислення (БКО), подається напруга з першого опорного генератора (ОГ1), гармоніки якого розподілені рівномірно у робочому діапазоні частот з кроком f_0 . Отже, на виході формувача міток (ФМ), підключеного до виходу змішувача будуть з'являтися імпульси міток. Вони відповідають моментам часу, коли $f = nf_0$, де f — миттєва частота свіп-генератора, $n = 1, 2, 3 \dots$. Поява імпульсів на виході формувача пояснюється тим, що він складається з послідовно з'єднаних фільтра нижніх частот, детектора і, наприклад, компаратора. Фільтр виділяє з виходу змішувача низькочастотну напругу з різницевою частотою. Детектор разом з компаратором формують на виході останнього короткі відеоімпульси міток, які надходять на вхід БКО.

Нехай після першої мітки опорна частота стає рівною $f_0 + F$. Тоді наступний імпульс мітки буде, коли $f = nf_0 + F$.

Таким чином, якщо після першої мітки, яка відповідає частоті свіп-генератора $f = nf_0$, змінити опорну частоту f_0 на $f_0 + F$, то можна виміряти часовий інтервал τ (рис. 2) до наступної другої мітки. Після появи другої мітки повернути опорну частоту знову до f_0 і виміряти ще один інтервал τ_0 до третьої мітки. Тоді за відомими τ і τ_0 частота першої мітки визначається за формулою:

$$f_M = nf_0 = \frac{\tau}{\tau_0} \frac{f_0^2}{F}.$$

Для усунення неоднозначності номера гармоніки n необхідно правильно обирати частоту зсуву F . Позначимо через f_{max} максимальну вимірювану частоту мітки. Необхідно виконати умову $F \leq \frac{f_0^2}{f_{max}}$. Наприклад, якщо $f_{max} = 2500$ МГц, $f_0 = 50$ МГц, то максимально можлива значення F дорівнює 1 МГц.

Точність визначення частоти свіп-генератора залежить від похибки, що викликана нелінійністю розгортки блока перестройки, похибки встановлення частот f_0 , $f_0 + F$ опорних генераторів, динамічних явищ, що виникають у вузькосмуговому формувачі міток.

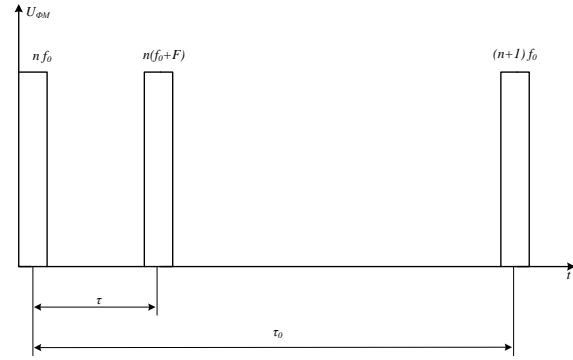


Рис. 2. Послідовність міток у вимірювачі з двома опорними генераторами

В [3] оцінено максимальну відносну похибку визначення частоти міток f_M , викликану нестабільністю опорних генераторів. Обчислене значення частоти мітки $f_M^* = f_M + \frac{f_0}{F} 2n\Delta$, де f_M — точна частота мітки, Δ — абсолютна частотна нестабільність генераторів. Максимальна відносна похибка $\gamma = \frac{f_M^* - f_M}{f_M} = \frac{2\Delta}{F} \cdot 100\%$. Наприклад, якщо частоти першого і другого опорних генераторів на кварцових резонаторах 50 МГц і 51 МГц, а $\Delta \leq 100$ Гц, то максимальна відносна похибка визначення частоти міток $\gamma = 0,02\%$.

Таким чином, використовуючи в частотно-часових перетворювачах високостабільні кварцові генератори, можна досягти точного та автоматичного визначення частоти свіп-генератора панорамного вимірювача частотних характеристик.

Відчутно більший вплив на точність визначення частоти може чинити нелінійність розгортки свіп-генератора. У випадку, коли абсолютна похибка виміру перевищить половину частоти f_0 , номер гармоніки після його заокруглення буде знайдено неправильно. Необхідність встановлення високочастотного свіп-генератора обмежує сферу застосування базової схеми (рис. 1). Тому актуальним є вдосконалення вимірювача з метою зниження впливу на результат не лінійності розгортки свіп-генератора.

2 Результати досліджень

З метою зменшення похибки визначення частоти внаслідок нелінійності свіп-генератора пропонується вдосконалити метод з двома опорними генераторами, для чого одноканальний вимірювач з частотно-часовим перетворенням доповнюємо третім опорним генератором з частотою $f_0 - F$ (рис. 3).

Внаслідок комутації опорних генераторів, на виході формувача ФМ з'являються мітки, послідовність яких наведено на рис. 4. Тоді частота третьої мітки, що вимірюється:

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

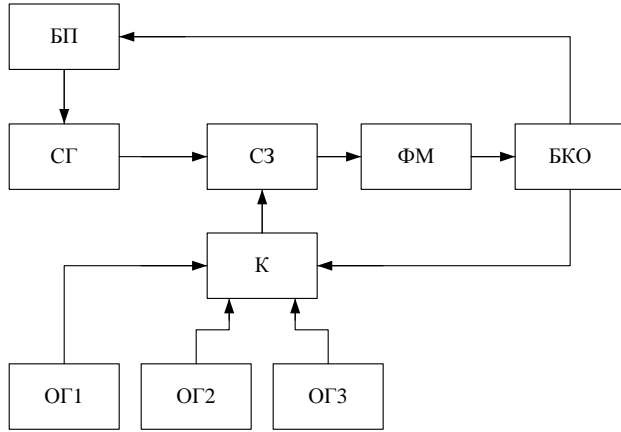


Рис. 3. Вимірювач частоти міток

Усі сигнали керування формуються БКО послідовно програмним шляхом. В залежності від швидкості зміни частоти спів-генератора часові інтервали τ_-, τ_+, τ_1 і τ_2 приймають різні значення для однієї і тієї ж мітки f_M . У випадку сталої швидкості зміни частоти $\tau_+ = \tau_- = \tau, \tau_1 = \tau_2 = \tau_0$, а формула для частоти третьої мітки f_M , співпадає з отриманою для вимірювача (рис. 1).

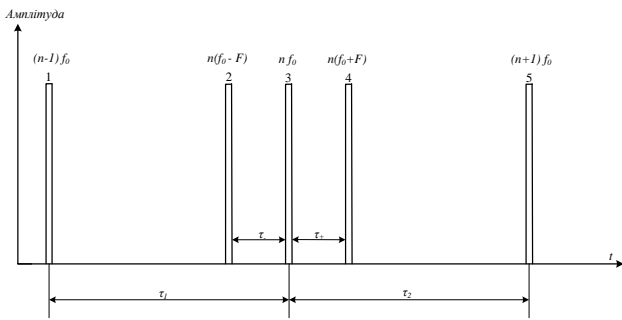


Рис. 4. Послідовність міток у вимірювачі з трьома опорними генераторами

Точність визначення частоти спів-генератора зростає у зв'язку з тим, що у вимірювачі на трьох опорних генераторах компенсується вплив нелінійності розгортки спів-генератора на розрахунок f_M . З метою кількісної оцінки для найгіршого варіанту впливу нелінійності (зміна частоти f за період розгортки від $(n-1)f_0$ до $(n+1)f_0$) введемо нормування часової залежності частоти f спів-генератора за віссю ординат до $y = \frac{f}{f_{max}}$, за віссю абсцис — до $x = \frac{t}{T_p}$, де T_p — період розгортки частоти (рис. 5).

Тоді для лінійної зміни частоти f (рис. 5, крива 1) у вимірювачах з двома і трьома опорними генераторами номер гармоніки знаходиться, відповідно, з виразів

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

та

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

де $n_{max} = f_0/F$ — максимальний номер гармоніки, який відповідає максимальній частоті спів-генератора f_{max} .

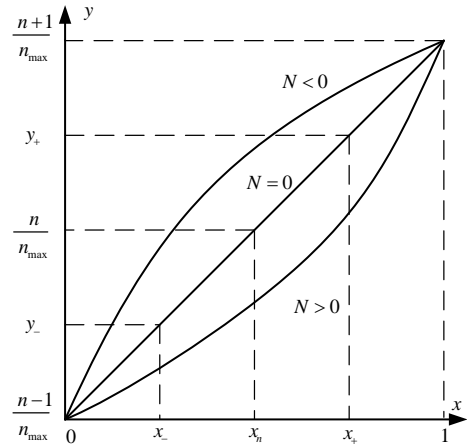


Рис. 5. Лінійна та нелінійна зміна частоти спів-генератора

Ретельно досліджена похибка вимірювання, коли частота спів-генератора f змінюється за експоненціальним законом (рис. 5, криві 2 та 3),

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

де N — множник нелінійності розгортки.

Така форма нелінійності є характерною для керування генераторів і пояснюється наявністю в їх схемах реактивних елементів з експоненціальним законом перезаряду.

Відомо два визначення коефіцієнта нелінійності розгортки частоти спів-генератора [4, 5]. За першим визначенням коефіцієнт нелінійності визначається за похідними функції y :

$$K_{н1} = \frac{y'(0) - y'(1)}{y'(0)} = 1 - e^N, \text{ якщо } N < 0.$$

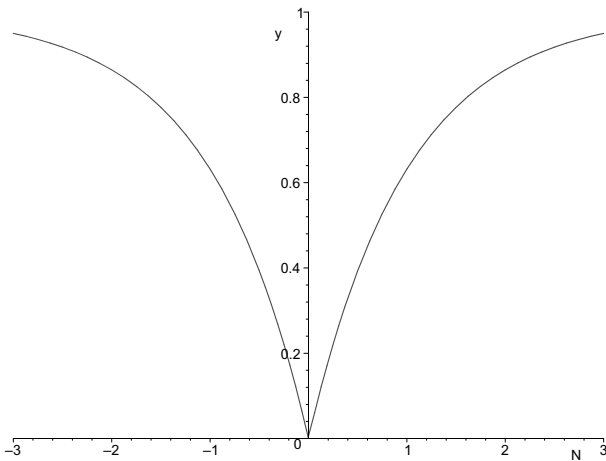
У випадку, якщо множник $N > 0$, коефіцієнт нелінійності визначається за формулою:

$$K_{н1} = \frac{y'(1) - y'(0)}{y'(1)} = 1 - e^{-N}.$$

Згідно з другим визначенням коефіцієнт нелінійності визначається за виразом $K_{н2} = (\Delta f_{max})/\Pi_{max}$, де Δf_{max} — максимальне відхилення частоти від лінійного закону розгортки, Π_{max} — максимальна смуга хитання спів-генератора.

Отримані вирази та залежності, які зв'язують між собою три параметри нелінійності $N, K_{н1}, K_{н2}$. Це допоможе сформулювати вимоги до основних характеристик вимірювача частоти спів-генератора при його проектуванні.

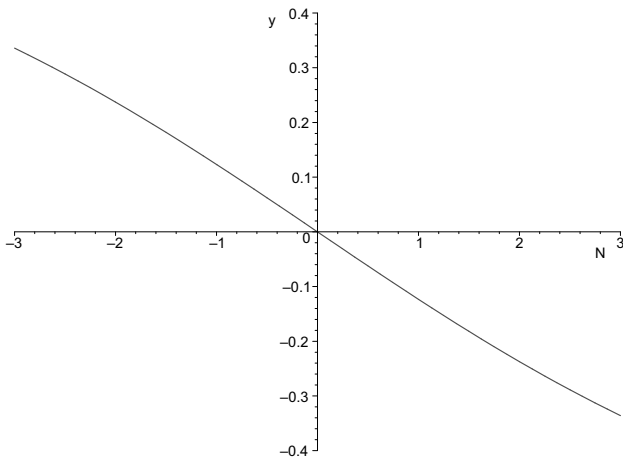
Аналіз коефіцієнта $K_{н1}$ показує, що коли $|N| \leq 0.2$, то $K_{н1} \approx |N|$, (рис. 6). Якщо множник нелінійності інший і знаходиться в межах $0.2 < |N| \leq 3$ то $K_{н1} = (0.2 \dots 0.95) \cdot |N|$.

Рис. 6. Коефіцієнт нелінійності $K_{н1}$

Коефіцієнт нелінійності

$$K_{н2} = \frac{e^{\ln(e^N - 1)/N} - 1}{e^N - 1} - \frac{1}{N} \ln \frac{e^N - 1}{N}$$

у випадку, коли множник нелінійності $|N| \leq 3$ знаходиться з графіка (рис. 7). З нього випливає, що якщо свіп-генератор має $|K_{н2}|$ до 0.35, то це відповідає зміні множника нелінійності N в межах від -3 до 3. Також з непоганою точністю розрахунків можна скористатись взаємозв'язком $K_{н2} \approx 0,125 \cdot |N|$.

Рис. 7. Коефіцієнт нелінійності $K_{н2}$

Всі залежності, які наведені в статті (рис. 6-11), є результатом використання програмного пакета аналітичних обчислень MAPLE.

Позначимо через n_{max} максимальний номер гармоніки опорного генератора з частотою f_0 , при якій абсолютна похибка визначення частоти свіп-генератора ще не перевищує $f_0/2$.

Знайдемо, як залежить n_{max} від $z = n/n_{max}$ для різних значень множника нелінійності у випадках застосування у вимірювачі частоти міток двох і трьох опорних генераторів. Для вимірювача з двома опорними генераторами (рис. 1)

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

для вимірювача з трьома опорними генераторами (рис. 3):

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

Залежності (рис. 8, 9) пов'язують між собою такі основні параметри свіп-генератора, як робочий діапазон частот, частотний крок міток, смугу хитання.

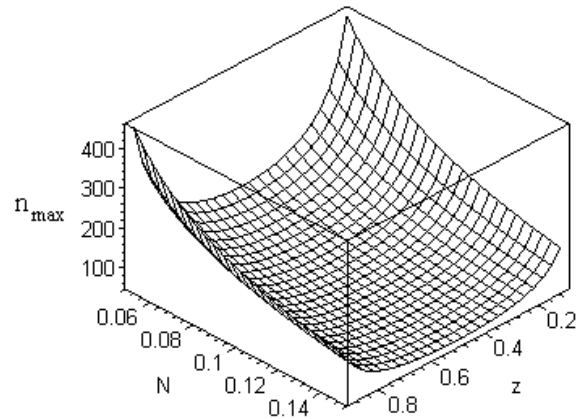


Рис. 8. Максимальний номер гармоніки у вимірювачі з двома опорними генераторами

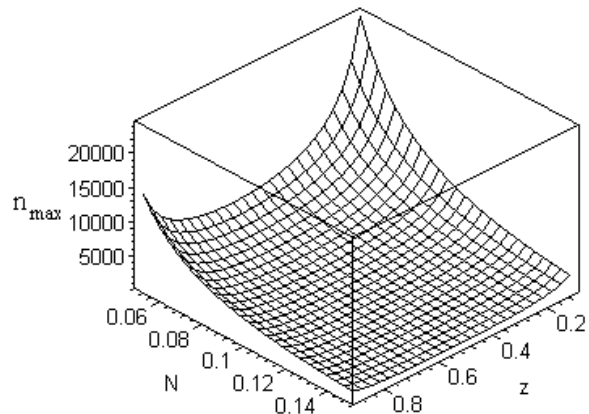


Рис. 9. Максимальний номер гармоніки у вимірювачі з трьома опорними генераторами

Отримані криві мають мінімуми, які відповідають умові $\frac{\partial n_{max}}{\partial z} = 0$. Можна говорити про те, що для кожного множника нелінійності свіп-генератора існує свій граничний номер гармоніки $n_{гр}$. Якщо максимальний номер гармоніки буде перевищувати граничне значення, то в усьому частотному діапазоні разом з правильно сформованими мітками будуть такі, частота яких визначена з абсолютною похибкою f_0 або більше. На рис. 10 наведені залежності граничного номера гармоніки $n_{гр}$ від множника нелінійності свіп-генератора N .

Отримані залежності (рис. 10) можуть бути використані для знаходження мінімального частотного кроку характерографа f_0 і мінімальної смуги хитання f_0 або $2f_0$ свіп-генератора. За відомим

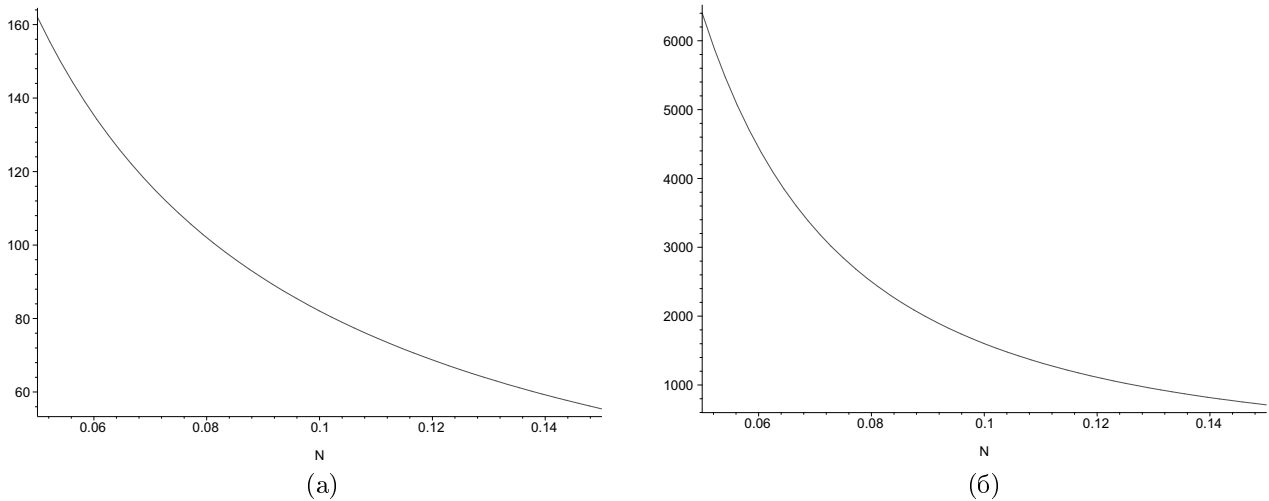


Рис. 10. Граничний номер гармоніки опорного генератора з частотою f_0 (а — два опорних генератора, б — три опорних генератора)

множником знаходимо граничний номер гармоніки (рис. 10). По максимальній робочій частоті f_{max} розраховуємо частоту $f_0 = \frac{f_{max}}{0,8 \cdot n_{гр}}$ і частоту зсуву, на яку різняться частоти опорних генераторів, $F = \frac{f_{max}}{0,8 \cdot n_{гр}^2}$.

Наприклад, нехай максимальна робоча частота свіп-генератора $f_{max} = 20$ ГГц, а множник нелінійності $N \leq 0,1$. Для базової схеми (рис. 1) знаходимо $n_{гр} = 84$ (рис. 10а). Визначаємо крок міток $f_0 = 250$ МГц, частоту зсуву $F \approx 3$ МГц, і мінімальну смугу хитання 250 МГц. Сучасні стробоскопічні змішувачі частотно-часових перетворювачів широкосмугові і можуть працювати з $n_{гр} > 200$. Тому використання вдосконаленого методу, тобто доповнення базової схеми третім опорним генератором (рис. 3) в даному прикладі є доцільним. Навіть при зменшенні вимог до нелінійності ($N \leq 0,13$) маємо $n_{гр} = 1000$ (рис. 10б), крок міток $f_0 = 25$ МГц, частоту зсуву $F = 25$ кГц і мінімальну смугу хитання 50 МГц.

У наведеному прикладі в доповненій третім опорним генератором базовій схемі абсолютна похибка визначення частоти не перевищує половини кроку міток. Відносна похибка при цьому дорівнює або менша 0,0625%. Для порівняння панорамні характеристикографи коефіцієнта відбиття і передачі Р4-МВМ-20, Р2-МВМ-25 виробництва фірми MWM LAB (Білорусь) того ж частотного діапазону мають відносну похибку визначення частоти більшу, вона знаходиться в межах (0,1 — 0,5)%.

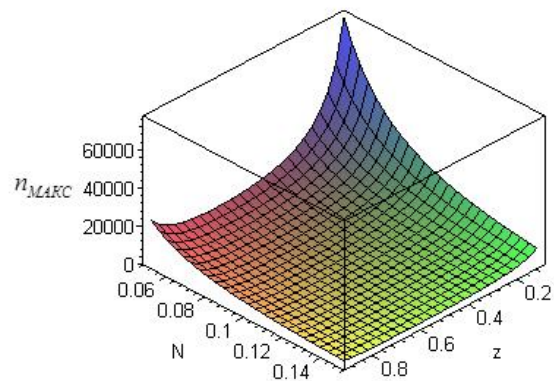
Подальшим покращенням вимірювача частоти з трьома опорними генераторами є застосування розрахункових формул (рис.11а)

$$n_M = \frac{1}{2} n_{max} \cdot \left(\frac{x_1 - x_-}{x_1} + \frac{x_+ - x_1}{1 - x_1} \right)$$

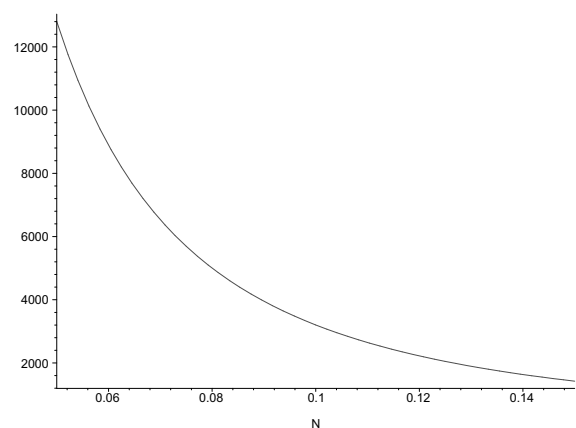
та

$$n_{max} = \left(\frac{x_1 - x_-}{x_1} + \frac{x_+ - x_1}{1 - x_1} - 2 \cdot z \right)^{-1}$$

Відповідно, залежність граничного номера гармоніки від множника нелінійності наведена на рис. 11б.



(а)



(б)

Рис. 11. Максимальна кількість гармонік (а) та граничний номер гармоніки (б)

З отриманих залежностей (рис. 11) видно, що у покращеному вимірювачі частоти свіп-генератора ще в два рази зменшується похибка визначення

номера гармоніки, тобто суттєво зростає точність виміру при значних нелінійностях розгортки частоти свіп-генератора.

Висновки

На основі методу з двома опорними генераторами [3] у статті наведено базову структурну схему вимірювача частоти свіп-генератора з одноканальним частотно-часовим перетворювачем, основними вузлами якого є два опорних генератори і стробоскопічний змішувач. Доведено, що використання в якості опорних генераторів на кварцових резонаторах суттєво зменшує складову похибки визначення частоти, обумовлену частотною нестабільністю генераторів.

З метою компенсації впливу нелінійності розгортки свіп-генератора на точність визначення частоти вдосконалено метод з двома опорними генераторами, базову структурну схему вимірювача доповнено третім опорним генератором, змінено алгоритм роботи блоку керування та обчислення. Отримані розрахункові формули для частоти свіп-генератора, проаналізовано вплив його нелінійності на точність результатів. В результаті встановлено, що при застосуванні вдосконаленого методу складові похибки визначення частоти свіп-генератора, яка викликана нелінійністю розгортки, зменшується на порядок.

Знайдено взаємозв'язок між множителем та коефіцієнтами нелінійності розгортки свіп-генератора, він може бути використаний при проектуванні вимірювача частоти і формуванні вимог до частот опорних генераторів.

Вдосконалена структурна схема вимірювача з одноканальним частотно-часовим перетворювачем може бути застосована у високочастотних характеристиках діапазону 20 ГГц і вище. Його перевагою є простота, відсутність, за винятком стробоскопічного змішувача, швидкодіючих вузлів, перенесення вимірів в область великого часу, тобто на низькі частоти.

Перелік посилань

1. Кувшинов В. ЖИГ-генераторы и синтезаторы частот компании Micro Lambda Wireless / В. Кувшинов, А. Майстренко // Компоненты и технологии. — 2015. — № 9. — с. 34-38.
2. Нефедов В.И. Метрология и радиоизмерения / В.И. Нефедов, А.С. Сигов, В.А. Битюков и др.; под ред. В.И. Нефедова. — М. : Высш. шк., 2006. — 526 с.
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. Kononov S.P. Panoramic curve-tracing oscilloscope marker blocks and relationship between frequency sweep nonlinearity parameters / S. P. Kononov, M. V. Mentynskiy, R. S. Lykha // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 2014. — №1. — с. 72-77.
5. Хромой Б.П. Метрология и измерения в телекоммуникационных системах / Б.П. Хромой. — М. : ИРИАС, 2007. — 542 с.

References

- [1] Kuvshinov V. and Maistrenko A. (2015) ZhIG-generatory i sintezatory chastot kompanii Micro Lambda Wireless [Iron-yttrium Garnet Generators and Frequency Synthesizers of Micro-Lambda Wireless Company]. *Komponenty i tekhnologii*, No 9, pp. 34-38.
- [2] Nefedov V.I. ed., Sigov A.S. and Bityukov V.A. (2006) *Metrologiya i radioizmereniya* [Metrology and radio measurements]. Moscow, Vyssh. shk., 526 p.
- [3] Kofanov V.L., Kononov S.P. and Velhus Ye.M. (2009) Vyznachennia chastoty mitok u NVCh vymiriuvalnykh chastotnykh kharakterystyk [Determination of the frequency of tags in microwave frequency response meters]. *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh*, No 1, pp. 59-64.
- [4] Kononov S. P., Mentynskiy M. V. and Lykha R. S. (2014) Panoramic curve-tracing oscilloscope marker blocks and relationship between frequency sweep nonlinearity parameters. *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh*, No 1, pp. 72-77.
- [5] Khromoi B.P. (2007) *Metrologiya i izmereniya v telekommunikatsionnykh sistemakh* [Metrology and measurements in telecommunication systems]. Moscow, IRIAS, 542 p.

Метод определения частоты свіп-генератора панорамного измерителя частотных характеристик

Кононов С. П., Негур А. А.

В статье на основе известного метода с двумя опорными генераторами приведена базовая структурная схема измерителя частоты СВИП-генератора с одноканальным частотно-временным преобразователем, основным узлом которого является стробоскопический смеситель. Доказано, что использование как опорных генераторов на кварцевых резонаторах существенно снижает влияние составляющей погрешности определения частоты, которая обусловлена частотной нестабильностью генераторов. Усовершенствован метод с двумя опорными генераторами, базовая структурная схема измерителя дополнена третьим опорным генератором. Установлено, что применение усовершенствованного метода уменьшает на порядок составляющую погрешности определения частоты свіп-генератора, которая вызвана нелинейностью развертки. Найдена взаимосвязь между множителем и коэффициентами нелинейности развертки свіп-генератора, которая может быть использована при проектировании измерителя для формирования требований к частотам опорных генераторов.

Ключевые слова: частотный характериограф; свип-генератор; частотно-временное преобразование; стробоскопический смеситель; опорный генератор; частотная метка

Frequency Determination Method of the Sweep-Generator of the Panoramic Frequency Characteristics Meter

Kononov, S. P., Nehur, A. A.

Usage of the panoramic meters of frequency-response characteristics or frequency-response characteristic tracers significantly increases work productivity of adjusters and operators of radioelectronic and telecommunication systems.

One of the main functions of the frequency-response characteristic tracer is formation of frequency-response scale, that is determining sweep generator frequency, which is a part of it. High-quality frequency-response characteristic tracers must have little error of scale bars formation in the broad frequency range, automatically and independently define their frequency of the swing band of the sweep generator.

There is a basic structural scheme of the sweep generator frequency meter with a single-channel frequency-time converter, the main units of which include two reference-frequency generators and stroboscopic mixer. It is proved that usage of reference-frequency generators

on quartz-crystal resonators reduces to zero the error component of frequency defining, provided by frequency instability of the generator.

To compensate the deflection non-linearity influence of the sweep generator on frequency determination accuracy, the basic scheme of the meter was added with the third reference-frequency generators, as well as the operating procedure of the control and evaluation unit was changed. The evaluating formulas were received for the sweep generator frequency, on their basis the mathematical models for deflection non-linearity cases were created. As a result of the analysis it was found that in the new meter in comparison with the basic one the error component of frequency determination of the sweep generator caused by deflection non-linearity is decreased by times.

Interrelation between the multiplication factor and deflection non-linearity coefficient was found, it can be used by designing of the sweep generator frequency meter and formation of the requirements to frequencies of reference-frequency generators.

The developed meter with a single-channel frequency-time converter can be used in high-frequency characteristic tracers of 20 GHz and higher range. Its advantages include: simplicity, absence of fast-speed units, except for the stroboscopic mixer, transfer of measurements to great time range, that is to low frequencies.

Key words: frequency-response characteristic tracers; sweep-generator; frequency-time convert; stroboscopic mixer; reference oscillator; frequency mark