

УДК 621.317

С. П. Кононов, к. т. н., доц.; В. Д. Росохай**ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ МЕТОК В УСТРОЙСТВАХ НА ОСНОВЕ
СВИП-ГЕНЕРАТОРА**

В статье предложены методы определения частоты свип-генератора с помощью формирования частотных меток опорными генераторами, проанализирована погрешность измерения частоты меток, обусловленная нелинейностью свип-генератора.

Ключевые слова: свип-генератор, частотная метка, стробоскопический смеситель, опорный генератор, коэффициент нелинейности развертки, формирование и анализ часовых интервалов, максимальный и граничный номера гармоник.

Введение

При определении параметров электронных устройств и линий связи важно знать их частотные характеристики, определение которых является сравнительно сложной операцией. Чтобы упростить измерения частотных характеристик, используют панорамные приборы, основанные на свип-генераторах, при этом возникает проблема формирования сетки частотных меток и определения их частот.

Существует несколько методов определения частоты меток, таких как сопоставление напряжения управления свип-генератором с его частотой, остановка развертки свип-генератора и измерение его частоты с помощью частотомера, использование прямого цифрового синтеза [1, 2]. Первый способ обеспечивает высокую производительность при широкой полосе качания свип-генератора, но точность определения частоты низкая. Остановка развертки свип-генератора и измерение частоты меток частотомером дает точные результаты, но требует больше времени для определения частотных характеристик. Прямой цифровой синтез позволяет однозначно сопоставить цифровой код управления с частотой свип-генератора, но приборы, выполненные по технологии прямого синтеза, имеют частотные ограничения.

Возникает задача разработки методов, которые позволили бы с высокой производительностью и малой погрешностью измерять частоту меток в панорамных приборах со свип-генераторами диапазонов УВЧ, СВЧ.

Методы измерения частоты меток

В [3] предложен метод измерения частоты меток и устройство на основе двух опорных генераторов, которые позволяют решить поставленную задачу.

С целью уменьшения погрешности измерения частоты метки предлагается в устройство [3] ввести третий опорный генератор с частотой $f_0 - F$ (рис. 1).

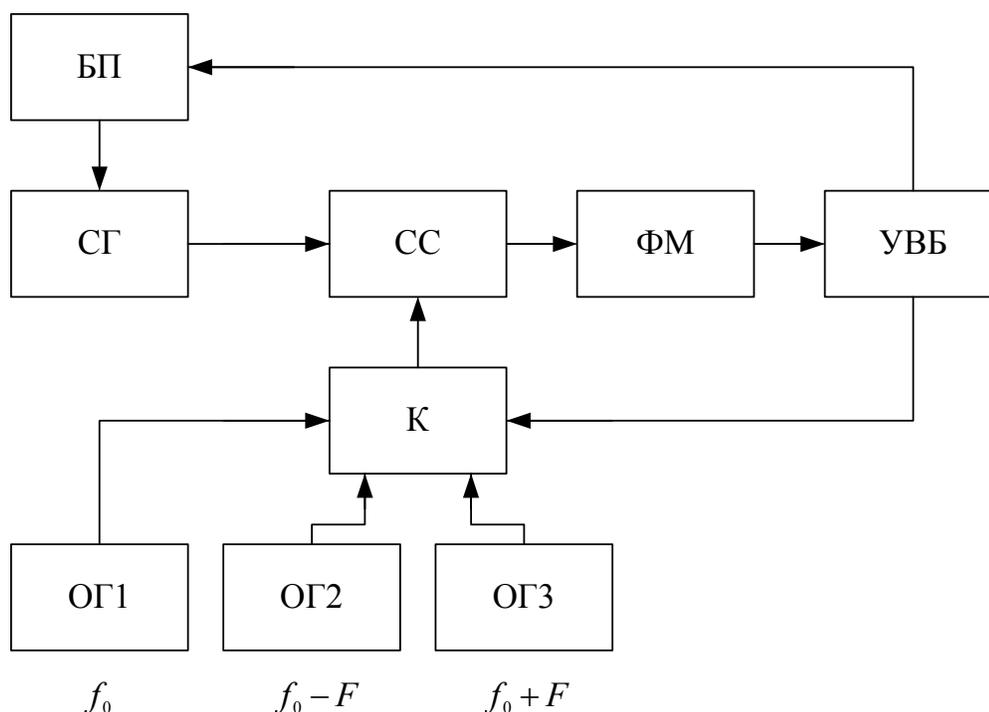


Рис. 1. Измеритель частоты меток

Частота f выходного напряжения свип-генератора (СГ), подключенного к входу стробоскопического смесителя (СС), изменяется во время прямого хода напряжения развертки блока перестройки (БП) по линейному закону. На другой вход смесителя подается напряжение одного из трех опорных генераторов (ОГ). Гармоники выходного напряжения опорных генераторов ОГ1 – ОГ3 равномерно распределены в рабочем диапазоне частот с шагом f_0 , $f_0 - F$, $f_0 + F$ соответственно. Следовательно, на выходе смесителя будут наблюдаться «нулевые биения», с помощью которых формирователь меток (ФМ) создает импульсы меток на входе управляюще-вычислительного блока (УВБ). При подключенном ОГ1 первая метка соответствует моменту времени, когда $f = (n - 1)f_0$, где $n = 2, 3, 4, \dots$. После первой метки ключ (К) переключает вход смесителя на генератор ОГ2, поэтому вторая метка появится, когда $f = n(f_0 - F)$. Затем УВБ снова переводит ключ в положение, при котором на вход смесителя подается напряжение от генератора ОГ1 и последующая третья метка будет соответствовать моменту времени, когда $f = nf_0$. Интервал времени между второй и третьей метками

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

где η – скорость изменения частоты свип-генератора.

После того, как сформирована третья метка, ключ с помощью УВБ присоединяет к смесителю генератор ОГ3. Четвертая метка появится при $f = n(f_0 + F)$, временной интервал между третьей и четвертой меткой

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

Далее УВБ переводит ключ в положение, при котором на смеситель подается напряжение от генератора ОГ1, и появление пятой метки будет соответствовать моменту времени, когда

$$f = (n+1)f_0.$$

Интервалы между первой и третьей метками, третьей и пятой метками будут составлять соответственно

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

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

Тогда частота третьей метки

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

Точность измерения частоты метки возрастет в связи с тем, что в измерителе, в отличие от [3], компенсируется влияние нелинейности развертки свип-генератора на результат.

Последовательность формируемых меток приведена на рис. 2. Все сигналы управления формируются УВБ последовательно программным путем. В зависимости от скорости изменения частоты свип-генератора и его коэффициента нелинейности τ_- , τ_+ , τ_1 и τ_2 принимают разные значения для одной и той же метки f_M . В случае постоянной скорости изменения частоты свип-генератора η

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

$$\tau_1 = \tau_2 = \tau_0.$$

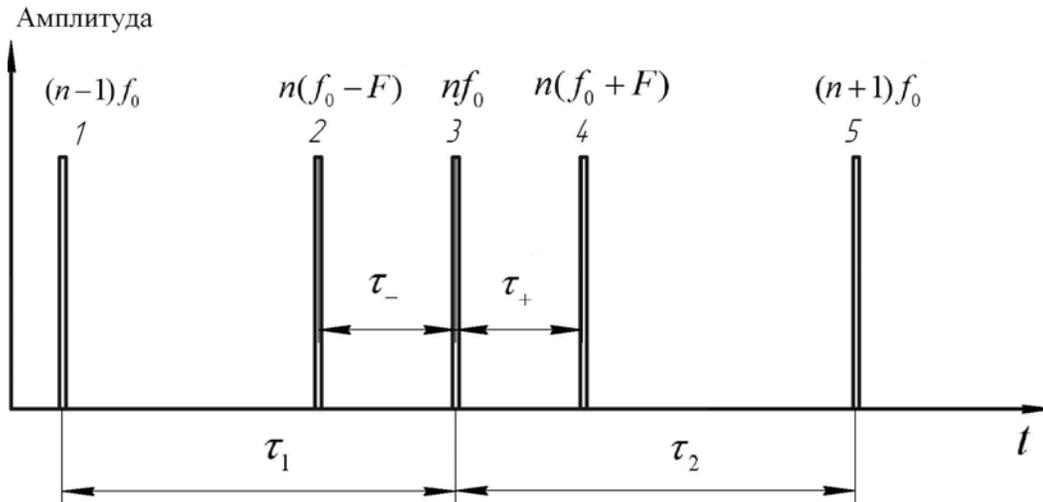


Рис. 2. Последовательность формируемых меток

Формула для частоты третьей метки

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

совпадает с формулой, по которой определяется частота метки в [3]. Последовательность меток в устройстве [3] изображена на рис. 3.

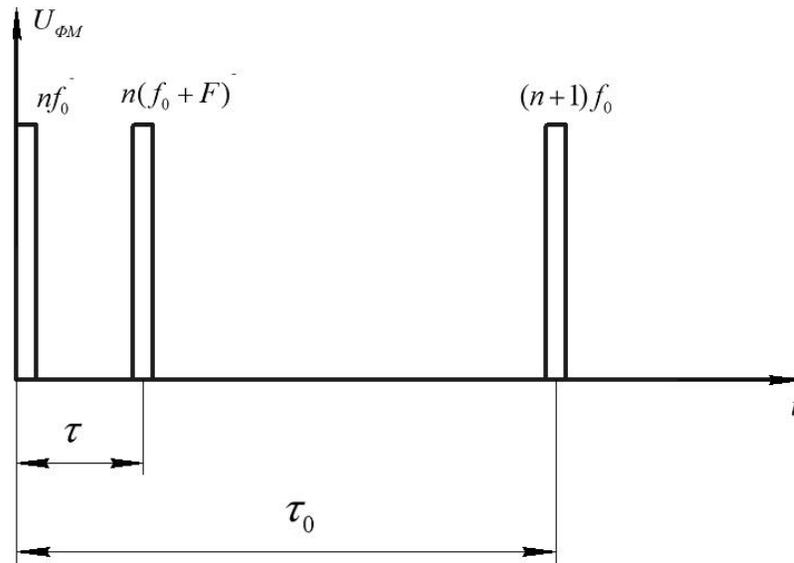


Рис. 3. Последовательность меток в устройстве [3]

Выполним нормирование временной зависимости частоты f свип-генератора по оси ординат до $y = f/f_m$, по оси абсцисс – до $x = t/T_p$, где f_m – максимальная частота, а T_p – период развертки частоты свип-генератора. Наихудший, с точки зрения влияния нелинейности развертки на точность определения частоты, случай – это изменение частоты f за период развертки от $(n-1)f_0$ до $(n+1)f_0$ (рис. 4).

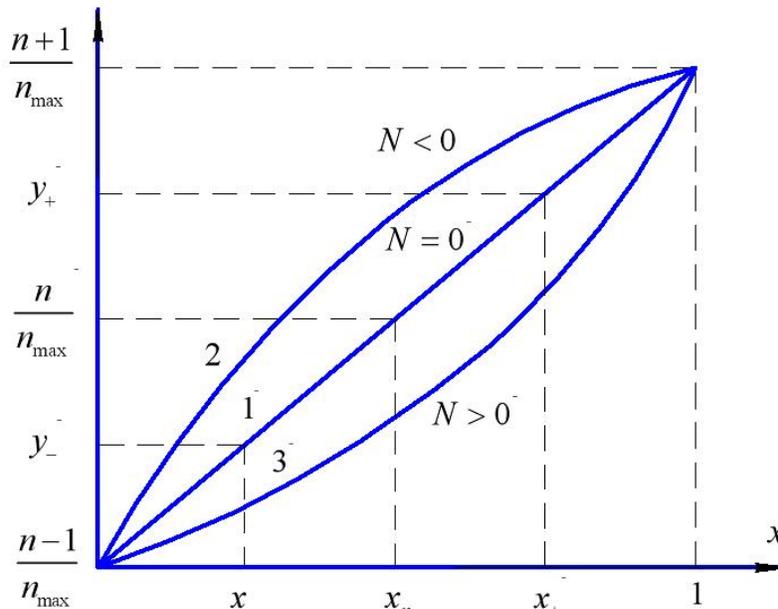


Рис. 4. Линейное и нелинейное изменение частоты свип-генератора

Тогда для линейного изменения частоты f (рис. 4, кривая 1) в измерителе с двумя опорными генераторами [3] номер гармоники

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

где $n_{\max} = \frac{f_0}{F}$ – максимальный номер гармоники, который соответствует максимальной

частоте свип-генератора f_{\max} . Для измерителя (рис. 1)

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

Лишь теоретически изменение во времени частоты свип-генератора происходит по линейному закону. Поэтому частота метки находится из (1, 2) с погрешностью, которая зависит от коэффициента нелинейности реального свип-генератора [4]. Для создания в блоке перестройки напряжения, которое линейно изменяется, используют способ перезаряда конденсатора постоянным током [4]. Несмотря на специальные схемные решения (применение начального участка экспоненты, отрицательной обратной связи в интеграторе, е. р. с. компенсации и др.) получить нулевой коэффициент нелинейности не удается.

Погрешность измерения, обусловленная нелинейностью свип-генератора

Напряжение перестройки и, соответственно, частота f свип-генератора изменяются по экспоненциальному закону (рис. 4, кривые 2, 3)

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

где N – коэффициент нелинейности развертки.

Найдем выражения для x_n , x_- , x_+ в случае нелинейности свип-генератора. Подставив в (3) значение $y(x_n) = \frac{n}{n_{\max}}$, получим:

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

откуда

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

Значения y в момент времени x_- равно

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

или

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

После преобразований получим

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

Аналогично момент времени

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

Подставив (4 – 6) в (1), (2), будем иметь расчетные формулы для нахождения номера гармоники n_p , а соответственно, частоты метки f_M .

Точное значение номера гармоники определяется по формуле $n = n_{\max} y(x_n)$, тогда
Наукові праці ВНТУ, 2010, № 4

погрешность определения номера гармоники $\Delta n = n_p - n$.

На рис. 5, 6 представлены зависимости абсолютной погрешности Δn определения номера гармоники от $z = \frac{n}{n_{\max}}$ для разных значений коэффициента нелинейности свип-генератора в случаях использования в измерителе частоты меток двух [3] и трех (рис. 1) опорных генераторов.

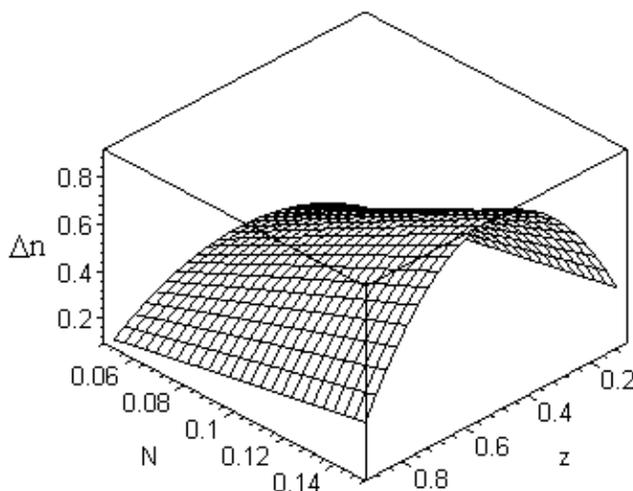


Рис. 5. Абсолютная погрешность определения номера гармоники измерителя с двумя опорными генераторами

Номер гармоники будет определяться корректно, когда выполняется условие $\Delta n < 0,5$. Связано это с тем, что номер гармоники может быть только целым числом. После измерения часовых интервалов x_n , x_- , x_+ и вычисления n_p точное значение номера гармоники n будет найдено с помощью операции округления.

Проведем исследование зависимости максимально возможного количества гармоник n_{\max} опорного генератора с частотой f_0 от z для разных коэффициентов нелинейности свип-генератора, если применяются измерители частоты меток с двумя (рис. 7) и тремя (рис. 8) опорными генераторами. Анализ зависимостей поможет связать между собой такие основные параметры свип-генератора, как рабочий диапазон частот, частотный шаг меток, полосу качания.

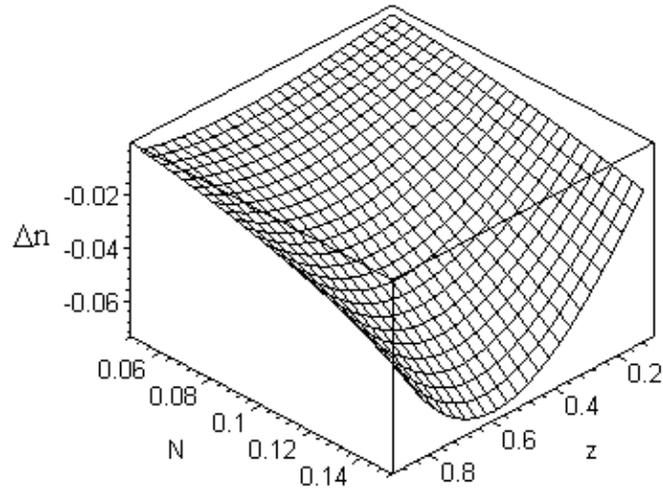


Рис. 6. Абсолютная погрешность определения номера гармоники измерителя с тремя опорными генераторами

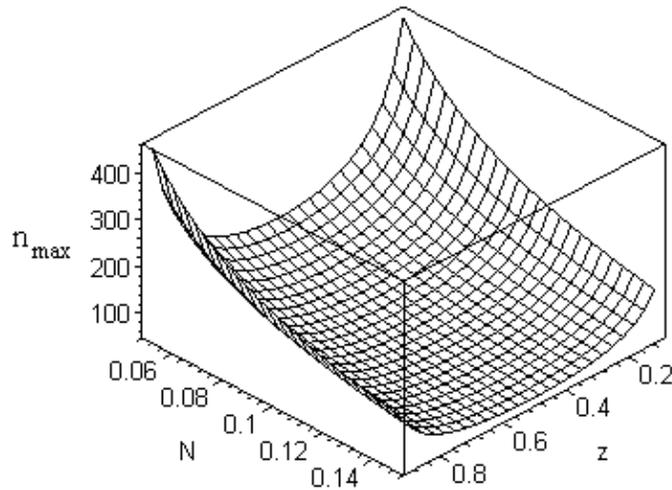


Рис. 7. Максимальное количество гармоник измерителя с двумя опорными генераторами

Проведем нормирование погрешности Δn к n_{\max} , тогда условие корректного определения частоты будет иметь вид

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

Тогда для измерителя с двумя опорными генераторами [3] получим такое выражение для максимального номера гармоники

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

а для измерителя с тремя опорными генераторами (рис. 1)

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

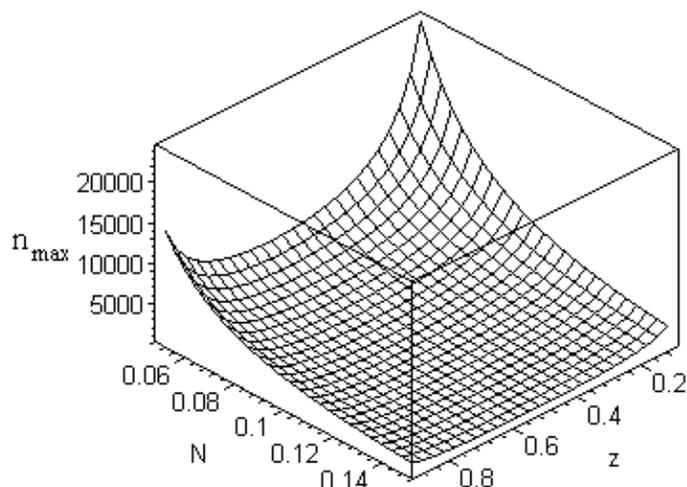
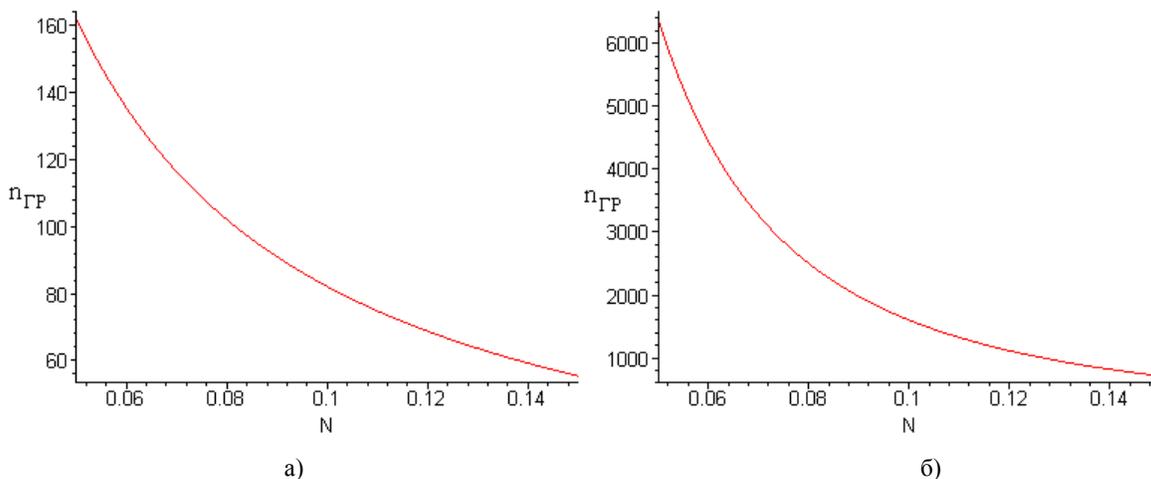


Рис. 8. Максимальное количество гармоник измерителя с тремя опорными генераторами

Полученные кривые имеют минимумы, которые соответствуют условию $\frac{\partial n_{\max}}{\partial z} = 0$. Можно говорить о том, что для каждого коэффициента нелинейности свип-генератора существует свой граничный номер гармоники $n_{ГР}$. Если максимальный номер гармоники n_{\max} будет превышать граничное значение, то во всем частотном диапазоне свип-генератора вместе с правильно сформированными метками, будут такие, частота которых определена с абсолютной ошибкой f_0 или больше. На рис. 9 приведена зависимость граничного номера гармоники $n_{ГР}$ от коэффициента нелинейности свип-генератора N .

Рис. 9. Граничный номер гармоники опорного генератора с частотой f_0 (а – два опорных генератора, б – три опорных генератора)

Можно предложить такое использование рассмотренных зависимостей при проектировании устройств на основе свип-генератора. По известному коэффициенту нелинейности свип-генератора N находим граничный номер гармоники $n_{ГР}$. Затем по известной максимальной рабочей частоте f_{MAX} рассчитываем частоту $f_0 = f_{MAX} / (0,8 \cdot n_{ГР})$ и

частоту сдвига, на которую отличаются частоты опорных генераторов, $F = f_{MAX} / (0,8 \cdot n_{ГР}^2)$. Таким образом, становятся известными минимально допустимый шаг меток измерителя частоты f_0 и минимальная полоса качания свип-генератора $3f_0$. Например, пусть максимальная рабочая частота свип-генератора $f_{MAX} = 10$ ГГц, а коэффициент нелинейности $N \leq 0,1$. Находим $n_{ГР} = 84$ (рис. 9, а). Определяем шаг меток $f_0 = 10 \cdot 10^3 / (0,8 \cdot 84) \approx 150$ МГц, частоту сдвига $F = (10 \cdot 10^3) / [0,8 \cdot (84)^2] \approx 1,7715$ МГц. Минимальная полоса качания свип-генератора составляет $\Pi_{MIN} = 3f_0 = 450$ МГц.

Выводы

1. Рассмотрены основные методы определения частоты меток в устройствах на основе свип-генератора. Предложены методы построения измерителя с двумя и тремя опорными частотами. Измерения осуществляются за период развертки, то есть в области большого времени. Возможно определение частоты меток в свип-генераторах со значительной скоростью изменения частоты.

2. Проанализированы погрешности измерения, которые вызваны нелинейностью развертки частоты свип-генератора. Предложен порядок расчета основных параметров устройств на основе свип-генератора, таких как шаг меток, частота сдвига, полоса качания. Доказано, что измеритель с тремя опорными частотами при одинаковых коэффициентах нелинейности имеет меньший шаг меток, то есть меньшую погрешность определения частоты свип-генератора в сравнении с измерителем с двумя опорными частотами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 Сергей Павлович – к. т. н., доцент кафедры телекоммуникационных систем и телевидения.

Росохай Вероника Дмитриевна – магистрант кафедры телекоммуникационных систем и телевидения.

Винницкий национальный технический университет.