О ПОГРЕШНОСТЯХ ГЕНЕРАТОРОВ ПОДНЕСУЩИХ ЧАСТОТ

Л. С. Кудрицкая
Киев

Генератор поднесущей частоты (ГПЧ) является основным звеном многократной частотной телеметрической системы, определяющим предельно достижимую точность всей системы. Точность ГПЧ характеризуется величиной предельно допустимой погрешности, которую можно определить следующим образом.

Пусть $f = kx$ расчетная преобразовательная характеристика ГПЧ в рабочем диапазоне (прямая P на рис. 1). Тогда смещение этой характеристики (прямая Φ на рис. 1) за счет дестабилизирующих факторов приводит к возникновению погрешности

$$\delta f = f_1' - f_1.$$

Согласно ГОСТу 9486—60, ошибка линейного преобразователя рассматривается как сумма аддитивной составляющей δ_a, являющейся результатом параллельного смещения характеристики и независящей от текущего значения измеряемого параметра x, и мультипликативной $\delta_м(f)$, возникающей при изменении крутизны преобразования по диапазону.

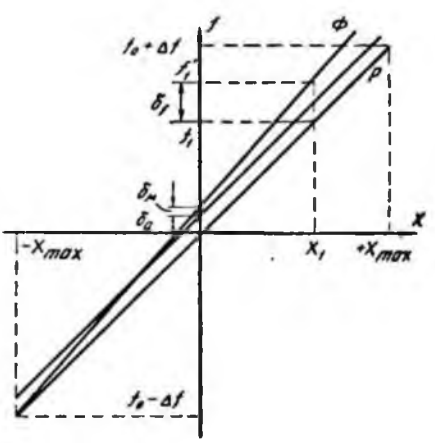

Рис. 1. Преобразовательные характеристики ГПЧ
(P — расчетная; Φ — фактическая).

Тогда абсолютная ошибка линейного преобразователя определяется как

$$\delta f = \delta_a + \delta_м(f).$$

Очевидно, что погрешность δ_a вызвана нестабильностью частоты ГПЧ f_0, соответствующей нулевому значению измеряемого параметра. Мультипликативная погрешность обусловлена изменением наклона преобразовательной характеристики, и ее абсолютная величина меняется с изменением x, а следовательно и частоты

$$\delta_м(f) = (k' - k)\,x = \frac{k' - k}{k} f = \gamma f. \qquad (1)$$

Здесь γ — действительная относительная погрешность преобразования.

Отсюда

$$\delta f = \delta f_0 + \gamma f.$$

Приведенная к диапазону изменения погрешность линейного преобразователя при этом запишется в виде

$$d_д = \frac{\delta f}{2\Delta f} = \frac{\delta f_0}{2\Delta f} + \gamma \frac{f}{2\Delta f}.$$

Метрологической характеристикой преобразователя является величина максимальной приведенной погрешности, которая, как следует из (рис 1), достигается при $f = f_0 + \Delta f$. Тогда

$$d_{л\,max} = \frac{\delta f_0}{2\Delta f} + \gamma\left(\frac{f_0}{2\Delta f} + \frac{1}{2}\right).$$

Обозначим коэффициент девиации, определяющий максимальное относительное отклонение частоты ГПЧ,

$$k_д = \frac{\Delta f}{f_0}.$$

Окончательно имеем

$$d_{л\,max} = \frac{1}{2k_д}\left[\frac{\delta f_0}{f_0} + \gamma\,(k_д + 1)\right]. \qquad (2)$$

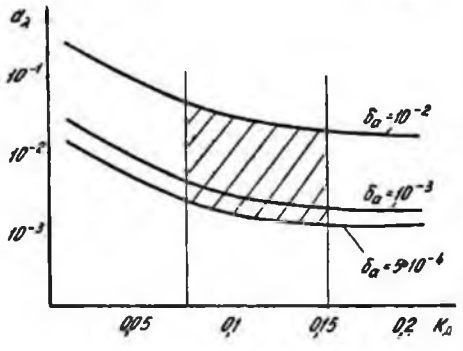

Рис. 2. Зависимость аддитивной погрешности ГПЧ от коэффициента девиации.

Полученное выражение позволяет определить величину максимальной приведенной погрешности линейного частотного преобразователя. Если же мультипликативная погрешность нелинейна, то это выразится в соответствующей зависимости коэффициента γ от измеряемой величины. Так, уравнение (2) может быть использовано для оценки предельных значений точности существующих ГПЧ.

В настоящее время для передачи информации в многократных частотных телеметрических системах используются коэффициенты девиации $k_д = 0{,}075$ и $k_д = 0{,}15$ [1]. Следовательно,

$$d_{л\,0.15} = 3{,}3\left[\frac{\delta f_0}{f_0} + 1{,}15\gamma\right].$$

Если полагать, что все источники нестабильности коэффициента преобразования устранены ($\gamma = 0$), то окажется, что погрешности преобразователя определяются стабильностью частоты генератора и, таким образом, именно эта характеристика определяет потенциальный предел точности частотных преобразователей. По литературным данным стабильность частоты генераторов с самовозбуждением на полупроводниковых триодах находится в пределах $10^{-2} - 5 \cdot 10^{-4}$. На рис. 2 приведена зависимость погрешности ГПЧ при $\gamma = 0$ от величины $k_д$. Заштрихованная область на рисунке соответствует потенциальной точности ГПЧ при практически используемых коэффициентах девиации. Как следует из этого рисунка, предельно достижимая максимальная приведенная погрешность частотных преобразователей составляет 0,15%. В то же время практически достигнутые точности частотных преобразователей находятся в пределах 1—2,5% [2], т. е. далеко не достигают своего теоретического предела. Такое положение объясняется тем, что мультипликативная ошибка, определяемая вторым слагаемым (2), значительно (на порядок) больше аддитивной и растет с увеличением $k_д$.

Погрешности, обусловленные изменением коэффициента преобразования γ, могут быть разбиты на три большие группы: обратимые изменения коэффициента преобразования, связанные с нестабильностью условий эксплуатации преобразователя; погрешности от нелинейности реаль-

ной характеристики ГПЧ и отличия ее от теоретической; динамические погрешности, возникающие при передаче быстроменяющихся сигналов, обусловленные переходным процессом установления частоты ГПЧ.

Погрешности первой группы носят случайный характер, борьба с ними сводится к стабилизации режима работы ГПЧ известными методами (например, термостабилизацией режима работы транзисторов). Погрешности второй группы в значительной степени зависят от схемного решения модулятора и выбора его параметров. Погрешности третьей группы характеризуются выбором модуляционных параметров, определяющих частоту поднесущей.

При частотном преобразовании медленно меняющихся величин скорость изменения собственной частоты ГПЧ весьма мала. Можно полагать, что частота генерируемых колебаний в каждый момент времени совпадает с собственной частотой ГПЧ. Иначе говоря, процесс преобразования в данном случае является квазистационарным.

Мгновенная частота квазистационарного преобразования ГПЧ определяется как

$$\omega(t) = \omega_0 + \frac{\Delta\omega}{\Omega}\cos\Omega t. \qquad (3)$$

Здесь Ω — частота наивысшей спектральной составляющей преобразуемой информации; $\omega_0 = 2\pi f_0$; $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$.

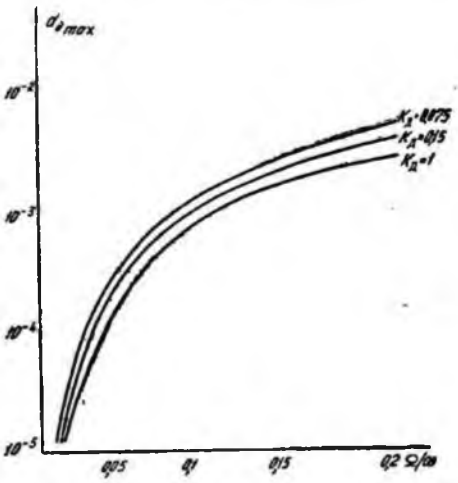

Рис. 3. Зависимость максимальной динамической погрешности от величины отношения преобразуемой и преобразовывающей частоты.

Возникающий при преобразовании быстроменяющихся величин (когда скорость изменения частоты $\frac{d\omega}{dt}$ велика) процесс установления частоты ГПЧ приводит к искажению выходного сигнала. Согласно [3], частоту искаженного выходного сигнала в этом случае можно представить в виде

$$\omega'(t) = \omega_0 + \frac{\Delta\omega}{\Omega}\cos\Omega t + \Delta\omega\frac{\Omega^2}{8\omega_0^2}\frac{2\cos\Omega t + 2k_д + k_д\sin^2\Omega t}{1 + 3k_д\cos\Omega t}. \qquad (4)$$

Учитывая (3) и (4), приведенную погрешность, обусловленную этими искажениями, определим как разность мгновенных частот выходных сигналов ГПЧ, приведенную к диапазону изменения частоты $2\Delta\omega$,

$$d_\partial(t) = \frac{\omega'(t) - \omega(t)}{2\Delta\omega} = \frac{\Omega^2}{16\omega_0^2}\frac{2\cos\Omega t + 2k_д + k_д\sin^2\Omega t}{1 + 3k_д\cos\Omega t}. \qquad (5)$$

Исследование функции (5) на максимум позволяет определить максимальную величину динамической погрешности при заданных ω_0, Ω и $k_д$. Максимальная ошибка возникает при $\Omega t = 2\pi n$, $n = 0, 1, 2, 3, \ldots$ Отсюда

$$d_{\partial\,max} = \frac{\Omega^2}{16\omega_0^2}\frac{2(1 + k_д)}{1 + 3k_д}.$$

Рассчитанные по этой формуле кривые зависимости максимальной динамической погрешности ГПЧ от отношения $\frac{\Omega}{\omega_0}$ при различных значениях $k_д$ приведены на рис. 3. Полученные кривые дают возможность выбирать поднесущую частоту ГПЧ ω_0 по заданным величинам Ω и

$d_{д\,max}$, а также сделать вывод, что при правильном выборе модуляционных параметров ГПЧ (всегда практически осуществимо) динамическая погрешность может быть доведена до исчезающе малой величины.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. М. Тепляков. Радиотелеметрия. Изд-во «Сов. радио», 1966.
2. А. В. Фремке. Телеизмерения. Изд-во «Высшая школа», 1968.
3. А. Д. Артым. Теория и методы частотной модуляции. ГЭИ, 1961.

МЕТОД ОБОБЩЕННОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ДИСКРЕТНОЙ ИНФОРМАЦИИ

А. Б. Попов, В. Л. Булгач, С. Н. Шавловский
Киев

Изучение статистических характеристик ошибок и выбор метода их анализа в системах передачи дискретной информации (СПДИ) одна из основных задач, возникающих при проектировании системы, испытании опытных образцов и в процессе эксплуатации серийной аппаратуры.

Известно, что основными практическими критериями оценки помехоустойчивости систем служат допустимые суммарные искажения и вероятности появления ошибок. Метод анализа краевых искажений предусматривает выяснение статистической структуры искажений посылок анализаторами искажений. С помощью анализаторов можно выяснить смещение характеристических моментов (ХМВ), построить гистограмму и определить оценку вероятности неправильной регистрации по формуле

$$h_{ош} = 1 - \int_{-\mu}^{\mu} \varphi(x)\,dx, \qquad (1)$$

где μ — эффективная исправляющая способность;
$\varphi(x)$ — закон распределения смещения (ХМВ).

Метод анализа дроблений дает возможность выяснить закон распределения дроблений с помощью вычислительных устройств и в общем случае определяет вероятность неправильной регистрации по формуле

$$P(A) = \iint_S \varphi(x)\,\varphi(y)\,dxdy, \qquad (2)$$

где $\varphi(y)$ — распределение начальных моментов дробления;
S — область интегрирования.

Метод анализа распределения вероятностей ошибок предусматривает выяснение закона распределения одиночных и смежных ошибок, безошибочных интервалов и измерение параметров потока ошибок.

Каждый из рассмотренных методов предусматривает сбор статистики в течение выделенного интервала функционирования системы, и в связи с этим представляют значительный интерес вопросы, связанные с построением метода комплексного автоматизированного исследования всей системы и ее основных функциональных узлов.

Так как суммарный коэффициент ошибок в системе передачи данных определяется ее различными функциональными элементами, то вероятность неправильной регистрации (вероятность ошибки) определится

$$P_{ош} = P_{ош\,ИС} + P_{ош\,АПД} + \left[1 - \int_{-\mu}^{\mu} \varphi(x)\,dx\right] + \iint_S \varphi(x)\,\varphi(y)\,dxdy + P_{ош\,ПС}, \qquad (3)$$