

*Гершенков Д.И., Гридчин В.С., Курбонов С.Ш.,
Никитин Ю.А.*

*Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича*

Частотный метод анализа систем фазовой автоподстройки

Рассмотрен частотный метод анализа фильтрации помех в умножающих кольцах импульсно-фазовой автоподстройки частоты (ИФАП), позволяющий производить инженерный расчет кольца. Использование асимптотических логарифмических амплитудно-частотных и фазочастотных (соответственно, ЛАХ и ЛФХ) характеристик повышает наглядность расчетов и обеспечивает требуемую точность при относительной простоте. Приведен пример расчета фильтрации помех в умножающем кольце ИФАП.

Ключевые слова: умножающие кольца импульсно-фазовой автоподстройки частоты (ИФАП), системы автоматического регулирования, логарифмические асимптотические амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики.

Синтезаторы частоты применяют там, где необходима точная или программная установка рабочей (несущей) частоты, а также точное и гибкое управление выходным колебанием, например, при формировании информационных сигналов или при автоматизации измерений. Использование синтезаторов повышает потребительские свойства аппаратуры, улучшает ее технологичность при производстве и надежность при эксплуатации, расширяет и упрощает возможности применения.

При формировании колебаний в диапазоне до 3 ГГц возможно применение методов пассивного цифрового синтеза частот (ПЦС или *DDS*), но в более высокочастотных диапазонах используют устройства активного цифрового синтеза частот – умножающие (синтезаторные) кольца импульсно-фазовой автоподстройки (ИФАП или *PLL*).

Характерным признаком, отличающим активный синтезатор частот от пассивного, является наличие колебания на его выходе при отключении опорного колебания от его входа. Но выходная частота активного синтезатора в этом случае не будет когерентна опорному колебанию, т.е. соответствовать коду управления. Это обстоятельство заставляет постоянно контролировать наличие синхронизма в кольце [1].

В системах активного синтеза частот перестраиваемый генератор (ПГ) охватывают петлей автоматического регулирования, т.е. ПГ является элементом системы автоматического регулирования (САР) – рис.1.

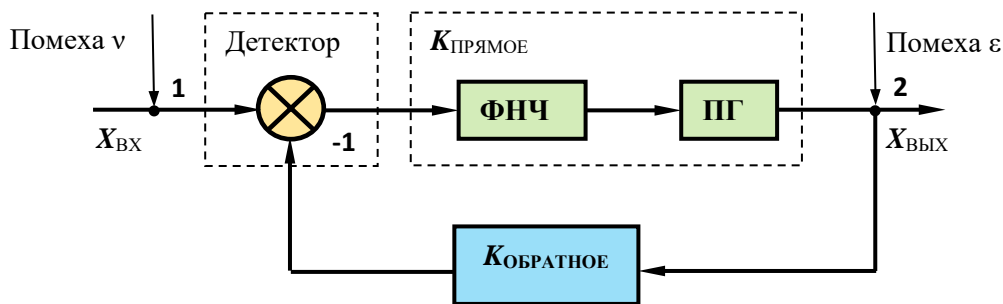


Рис. 1. Обобщенная структурная схема системы автоматического частотного регулирования с отрицательной обратной связью

В общем случае для приведения исходных дифференциальных уравнений, описывающих поведение нелинейной САР к форме в конечных приращениях используют формулу разложения аналитической функции в ряд Тейлора. Также считают, что движение происходит в пределах малых отклонений от установившегося состояния, а производные имеют единственное и конечное значение, отличное от нуля. Поэтому в статическом режиме нелинейную систему рассматривают в линейном приближении.

При инженерных расчетах линейные дифференциальные уравнения удобнее всего решать операторным методом.

При частотном синтезе помеховые воздействия на систему считают только внешними и вводят в две характерные точки структуры – на ее вход и на ее выход.

Запишем в операторном виде передаточную функцию $\Phi(s)$ замкнутой системы автоматического регулирования для помех, приходящих с опорным колебанием (точка 1 на рис. 1):

$$\Phi_v(s) = \frac{X_{\text{ВЫХ}}}{X_{\text{ВХ}}} = \frac{K_{\text{прямое}}(s)}{1 + K_{\text{прямое}}(s)K_{\text{обратное}}(s)} = \frac{K_{\text{прямое}}(s)}{1 + G(s)}, \quad (1)$$

где $X_{\text{ВЫХ}}$ и $X_{\text{ВХ}}$ – выходная и входная величины, $K_{\text{прямое}}(s)$ и $K_{\text{обратное}}(s)$ передаточные функции цепей прямой передачи (от входа к выходу замкнутой САР) и отрицательной обратной связи (от выхода САР ко входу опорного сигнала), $G(s) = K_{\text{прямое}}(s) \times K_{\text{обратное}}(s)$ – операторный коэффициент передачи условно разомкнутой САР; s (или p) – оператор Лапласа ($s \equiv \alpha + j\omega$), знак плюс в знаменателе означает, что обратная связь отрицательная; v – помехи, приходящие с опорным колебанием, ε – помехи, воздействующие на выход САР (ПГ). Здесь j – комплексное число, характеризующее единичный вектор, а ω – угловая частота.

Аналогично, для помех ε , воздействующих на ПГ можно записать (точка 2 на рис. 1):

$$\Phi_\varepsilon(s) = \frac{X_{\text{ВЫХ}}}{X_{\text{ВХ}}} = \frac{1}{1 + K_{\text{прямое}}(s)K_{\text{обратное}}(s)} = \frac{1}{1 + G(s)}. \quad (2)$$

Чтобы система автоматического регулирования была устойчивой необходимо, чтобы в знаменателях выражений (1) и (2) (в уравнении $1 + G(s) = 0$) не было корней с положительными α , т. е. расположенных в правой полуплоскости комплексной частоты s . В противном случае знаменатель обратится в нуль и система возбудится.

Другими словами, коэффициент передачи условно разомкнутого кольца $G(s)$ в не должен попадать в точку $(-1, j0)$ и ее окрестности при любом изменении α и ω на плоскости в прямоугольной системе координат, где по оси абсцисс откладывают действительные

значения комплексной частоты s , а по оси ординат – мнимые значения комплексной частоты s .

В теории САР доказано, что система будет устойчивой, если в области частот ω , где аргумент $G(j\omega)$ по абсолютному значению превышает или равен π , модуль $G(j\omega)$ меньше единицы [2].

При анализе и инженерных расчетах удобно разделить «интегральную» амплитудно-фазочастотную характеристику (диаграмму Найквиста) на две асимптотические – амплитудно-частотную (АЧХ) и фазочастотную (ФЧХ), причем представить эти две характеристики в логарифмическом масштабе по оси частот. При этом логарифмическую АЧХ (ЛАЧХ или ЛАХ) представляют в логарифмическом масштабе и по оси ординат [3].

Если передаточная функция системы является рациональной, тогда ЛАХ может быть аппроксимирована отрезками прямых линий (асимптотами), т. е. прямыми линиями конечной длины, полубесконечными или бесконечными; для построения асимптотических ЛАХ нужны весьма простые вычисления.

Частотный анализ петли ИФАП необходим для решения четырех задач:

1. определения коэффициента передачи кольца для помех, приходящих с опорным колебанием;
2. нахождения коэффициента передачи кольца для помех, воздействующих на перестраиваемый генератор;
3. формирования требуемой АЧХ кольца с точки зрения фильтрации помех;
4. вычисления запасов устойчивости кольца по фазе и по амплитуде.

На рис.2 приведена линеаризованная структурная схема кольца ИФАП с ЧФД, предназначенная для анализа его фильтрующих свойств со следующими обозначениями:

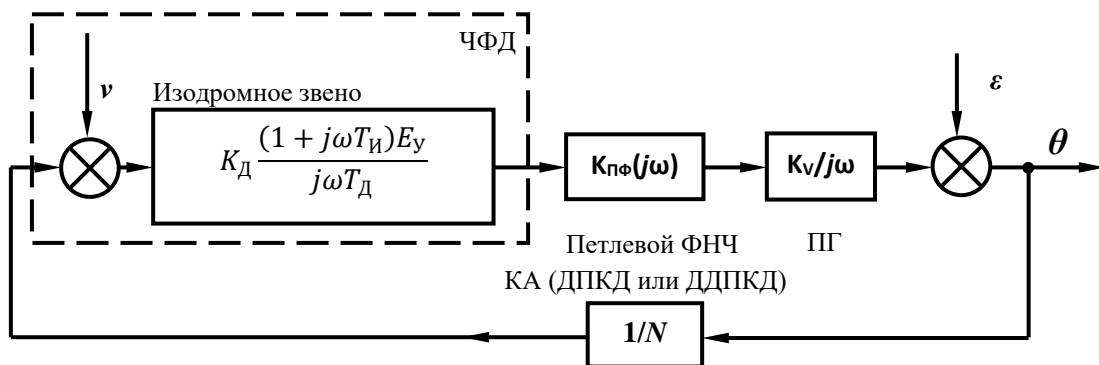


Рис.2. Структурная схема кольца ИФАП для анализа фильтрации помех

v – малые помехи, приходящие с опорным колебанием;

δ – малые помехи, воздействующие на вход управления ПГ;

ϵ – малые помехи, воздействующие на выходное колебание ПГ;

Измеритель (*Error Detector*) включает в себя собственно фазовый детектор *PD* (*Phase Detector*) и источник тока поддержания заряда *CP* (*Charge Pump*) с изодромным звеном;

K_D – крутизна статической характеристики ЧФД [рад/А] в точке устойчивого равновесия;

$K_H(s) = \frac{1+sT_I}{sT_D}$ – операторный коэффициент передачи изодромного (интегрирующего) звена;

T_I – постоянная времени изодромного звена;

T_D – постоянная времени ЧФД;

$K_{\text{ПФ}}(j\omega)$ - коэффициент передачи петлевого фильтра (*Loop Filter* – петлевого фильтра нижних частот ФНЧ);

E_y – управляющее напряжение на входе ПГ [В];

S_V – крутизна управляющей характеристики ПГ [Гц/В];

$K_V = f_{\text{ВыхВЧ Макс}} - f_{\text{ВыхВЧ Мин}} \approx S_{\text{ПГ}} \times E_y$ – полоса перестройки ПГ;

Θ – малые помехи в выходном колебании кольца;

$1/N$ – коэффициент передачи СИ (коэффициент деления ДПКД или ДДПКД) в ПП.

С помощью линеаризованной структурной схемы рис.2 можно составить уравнения разомкнутой САР для анализа помех и на его основе рассчитать коэффициенты передачи помех, воздействующих на различные точки кольца ФАП.

При инженерных расчетах фильтрации помех умножающим кольцом ИФАП с частотно-фазовым детектором ЛАХ $G_N(j\omega)$ и ЛФХ условно разомкнутой системы выглядит следующим образом – рис. 3 [4].

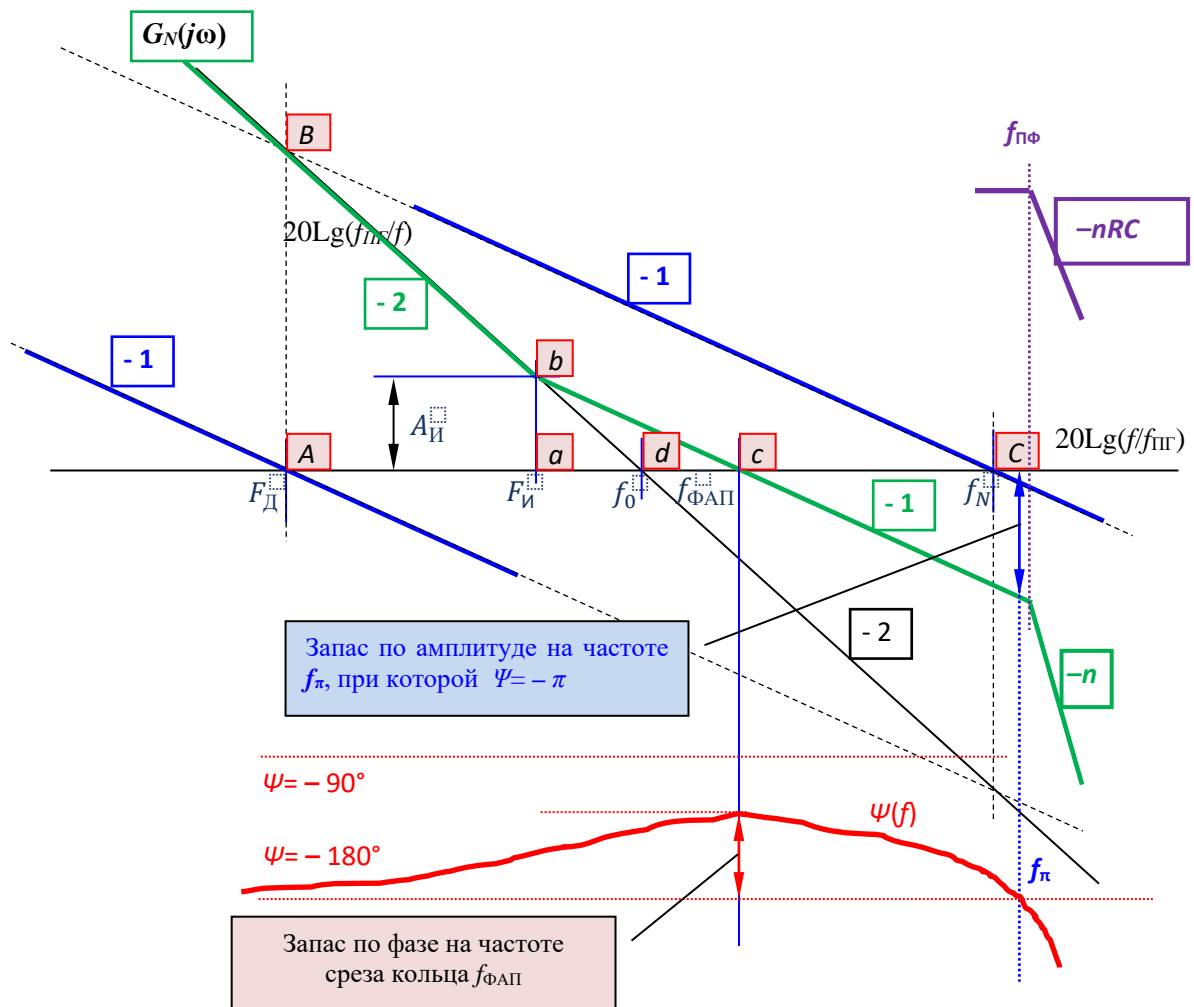


Рис.3. Построение ЛАХ и ЛФХ умножающего кольца ИФАП

Графоаналитический метод расчета позволяет легко, наглядно и, главное, точно рассчитать уровень помех в спектре выходного колебания синтезаторного кольца ИФАП

Библиографический список

1. Никитин, Ю. А. Частотный метод анализа синтезаторной системы импульсно-фазовой автоподстройки частоты // Современная электроника. – 2007. – № 4, 5, 6, 8, 9. – 2008. – № 1.
2. Куропаткин, П. В. Теория автоматического управления. – М. : Высшая школа, 1973. – 528 с.
3. Кузовков, Н. Т. Теория автоматического регулирования, основанная на частотных методах. – М. : Оборонгиз, 1960. – 447 с.
4. Никитин Ю.А. Схемотехника современных микроволновых синтезаторов частот. Часть 2. Активный синтез частот: учебное пособие / СПбГУТ. – СПб., 2015. 95с.