

УДК 621.36

# АВТОМАТИЧЕСКАЯ КОРРЕКТИРОВКА ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ФИДЕРНЫХ И УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

**В.Т. Царенко**

Кандидат технических наук, доцент\*

E-mail: info@rks.kh.ua

**В.Н. Савченко**

Кандидат технических наук, старший преподаватель\*

E-mail: savchenko@live.com

\*Кафедра радиоэлектроники и компьютерных систем  
Украинская инженерно-педагогическая академия  
ул. Университетская, 16, г. Харьков, Украина, 61003

*Наведено результати аналізу та виведення розрахункових співвідношень структурних схем фазових коректорів, засновані на використанні діодних фазообертачів, виконаних на базі варакторних СВЧ-діодів*

*Ключові слова: залишковий неузгодженість, граничне підсилення, фазовий детектор*

*Приведены результаты анализа и вывод расчетных соотношений структурных схем фазовых корректоров, основанные на использовании диодных фазовращателей, выполненных на базе варакторных СВЧ-диодов*

*Ключевые слова: остаточное рассогласование, граничное усиление, фазовый детектор*

*The results of analysis and display of calculated ratios block diagrams of phase correctors based on using diode phase inverters made on the basis of microwave varactor diodes are given in this article*

*Keywords: residual error, the boundary gain, phase detector*

## Постановка задачи исследования

В работе ставится задача на основе проведенного анализа разработать простейший алгоритм расчета соотношений структурной схемы фазового корректора СВЧ-тракта, в котором в качестве электрически управляемого фазовращателя (ЭУФ) используются варакторные диоды.

Такие задачи возникают в системах, где в качестве информационной или управляющей составляющей используется фаза сигнала или заданная величина ее приращения.

## Анализ известных публикаций

В [1] приведен обширный результат исследования систем автоматической подстройки разности фаз (АПФ) выходного сигнала относительно входного в различных радиотехнических устройствах, таких как: усилители, преобразователи частоты, системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и др. Вопросы анализа и расчета не относятся непосредственно к СВЧ-системам, что несколько сужает прикладную ценность работы.

В [2] рассмотрена математическая модель отражательного ЭУФ с плавной электрической перестройкой. Анализируются предельно достижимые параметры в отношении выходной мощности, фазы и потеря. Нет указаний на области использования фазовращателя как объекта регулирования в системе АПФ.

Справочник [3] содержит описание систем АПФ, в которых ЭУФ входит в контур регулирования, предназначенный для поддержания постоянства сдвига фаз двухканальной фазовой системы с обратной связью. Причем фазовращатель является узлом электромеханической системы астатического типа. В работе рассмотрены статический и динамический режимы, при условии, что объект регулирования – электромеханический, что сужает в известной мере использование полученных результатов для СВЧ-систем с диодными ЭУФ в качестве объектов регулирования.

Выполненный краткий обзор позволяет сделать вывод относительно актуальности предложенной работы и возможного ее использования разработчиками СВЧ-систем с фазой в виде одного из параметров информации.

## Основное содержание статьи

Фазочастотные характеристики (ФЧХ) различных радиоэлектронных устройств СВЧ можно корректировать с использованием общих принципов автоматического регулирования на основе обратных и прямых связей. Задачи корректирования ФЧХ обусловлены повышением требований к точности работы фазовых систем, в которых применяются элементы с потенциально неустойчивыми фазовыми узлами коэффициента передачи. К таким элементам в первую очередь следует отнести: усилители высокой частоты на лампах бегущей волны (ЛБВ), диодах Ганна и лавиннопролет-

ных диодах; усилители моноимпульсных приемников; антенны с электрическим сканированием; фидерные элементы с электрически управляемыми аттенуаторами (ЭУА); полупроводниковые ЭУА и др.

Автоматически корректировать ФЧХ можно двумя способами:

- непосредственным воздействием на дестабилизирующий объект (например, поддерживать стабильность питающих напряжений усилительных приборов или подстраивать емкость резонансного контура с помощью варактора;

- вводом в корректируемую цепь специально перестраиваемого фазовращательного элемента, фазовый набег  $\Delta\phi$  в котором автоматически изменяется в соответствии с вариацией во времени фазового сдвига между сигналами на входе и выходе корректируемого устройства.

С разработкой и совершенствованием электрически управляемых полупроводниковых СВЧ-фазовращателей (аналоговых и дискретных) появилась возможность более просто решать задачи по корректированию как ФЧХ, так и задачи компенсации фазовых набегов в устройствах, обусловленных различными дестабилизирующими факторами и электрическими помехами.

На рис. 1 а, б приведены две типичные схемы автоматической компенсации фазового набег в одноканальном устройстве передачи сигнала от источника И в нагрузку Н.

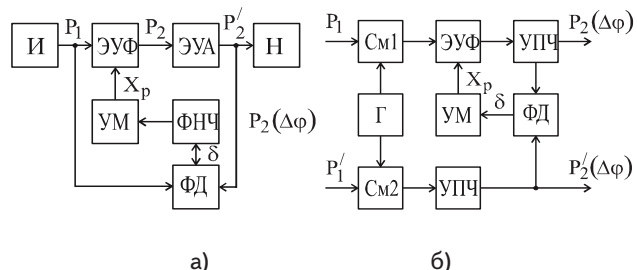


Рис. 1. Структурные схемы систем АПФ

В данной схеме (рис. 1а) паразитный фазовый набег  $\Delta\phi$  обусловлен работой электрически управляемого полупроводникового СВЧ-аттенуатора. Значение  $\Delta\phi$  поддерживается на уровне близком к нулевому за счет применения цепи обратной связи, включающей фазовый детектор ФД, фильтр низкой частоты ФНЧ, усилитель сигнала ошибки УМ и электрически управляемый фазовращатель ЭУФ. На фазовый детектор поступает сигнал  $P_2(\Delta\phi)$  с регулируемой фазой, а так как сдвиг по фазе  $\Delta\phi$  выходного сигнала  $P_2$  подстраивается относительно фазы входного  $P_1$ , то фаза сигнала  $P_1$  принята в качестве опорной. В рассматриваемой схеме система АПФ работает следующим образом. При возникновении разности фаз  $\Delta\phi$  сигналов на выходе  $P_2$  и входе системы, на выходе ФД появляется сигнал ошибки  $\delta$ , который после сглаживания ФНЧ преобразуется в сигнал управления  $X_p$ . Этот сигнал изменяет фазовый сдвиг в ЭУФ на величину  $\Delta\phi'$ , компенсирующую паразитный набег в ЭУФ в соответствии с равенством  $\Delta\phi + \Delta\phi' = 0$ .

В двухканальном приемнике с автоматическим выравниванием фазовых характеристик (рис. 1б) подстройка фазы используется только для сниже-

ния сдвига фаз между выходными сигналами каналов  $P_2$  и  $P_2'$  практически до нуля, при этом фаза сигнала  $P_2$  подстраивается к фазе сигнала  $P_2'$ . Такой эффект достигается включением в первый канал системы АПФ, аналогичной рис. 1а, но отличающейся от нее тем, что функцию опорного сигнала выполняет сигнал  $P_2'$  второго канала. В рассматриваемой схеме гетеродин Г обеспечивает работу смесителей См1 и См2, а промежуточная частота, усиленная в УПЧ, поступает на выходы приемника.

Анализ и расчет системы АПФ основаны на общем подходе к определению статической и динамической погрешностей системы регулирования с обратной связью. Сигнал регулирования  $X_p$  в системе (рис. 1 а, б) определяется обобщенным выражением

$$x_p = k_{y.m} \cdot W_{\phi}(S) \cdot \delta(\Delta\phi; P_1; P_2) \cdot x_{p.m}(P_1; P_2),$$

где  $k_{y.m}$  - усиление УМ;  $W_{\phi}(S)$  - передаточная функция ФНЧ;  $\delta(\Delta\phi; P_1; P_2)$  - сигнал рассогласования на выходе фазового детектора;  $x_{p.m}$  - максимальный сигнал на выходе фазового детектора, определяемый в большинстве случаев уровнем меньшего сигнала (в случае корректировки ФЧХ ЭУА этим сигналом должен быть сигнал на выходе  $P_2$ , а в случае корректировки ФЧХ усилительного устройства – сигнал на входе  $P_1$ ); величины, приведенные в скобках указывают на функциональную зависимость величины  $\delta$  и  $x_{p.m}$ .

В произвольной точке равновесия системы (рис. 2) режим характеризуется величинами:  $\Delta\phi = \Delta\phi^0$  и  $P_1 = P_1^0$ ,  $P_2 = P_2^0$ ,  $\delta = \delta^0$  и при этом сигнал  $X_p = X_p^0$  описывается соотношением

$$X_p^0 \approx k_m \cdot W_{\phi}(p) \cdot S_{\phi.d} P_2^0 \Delta\phi^0, \tag{1}$$

где  $S_{\phi.d}$  - крутизна фазового детектора в точке равновесия.

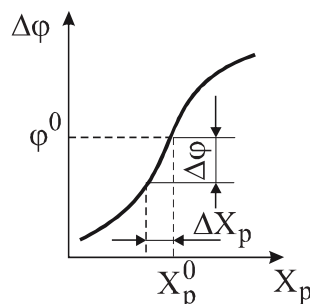


Рис. 2. Статическая регулировочная характеристика

Значение  $\Delta\phi$  на выходе ЭУФ в статическом режиме, можно записать с использованием вида регулировочной характеристики ЭУФ (рис. 2)

$$\Delta\phi = \phi^0 - S_p X_p, \tag{2}$$

или в стационарном режиме

$$\Delta\phi = \phi^0 - S_p X_p^0, \tag{3}$$

где  $S_p = \Delta\phi / X_p$  - крутизна регулировочной характеристики ЭУФ.

Переходя в (2) к приращениям, находим

$$\Delta X_p(X_p^0) = k_m \cdot W_\phi \cdot S_{\phi Д} P_2^0 \Delta(\Delta\phi^0), \tag{4}$$

где  $\Delta(\phi^0)$  следует из соотношения (3):

$$\Delta(\phi^0) = \Delta\phi^0 - S_p \Delta X_p(X_p^0). \tag{5}$$

Объединением (4) и (5) находится уравнение статики системы АПФ:

$$\frac{\Delta(\Delta\phi^0)}{\phi^0} = \frac{\Delta\phi^0 / \phi^0}{1+N}, \tag{6}$$

где  $N = k_m \cdot W_\phi \cdot S_{\phi Д} P_2^0 S_p$  - коэффициент усиления обратной связи.

Таким образом, крутизна фазовой характеристики регулируемой цепи  $\Delta\phi^0 / \phi^0$  (от входа ЭУФ до выхода УЭА) за счет действия отрицательной обратной связи уменьшается в  $(N+1)$  раз. Ошибка регулирования зависит от уровня СВЧ-сигнала на выходе. Поэтому при работе с УЭА максимальная погрешность по фазе будет при максимальном ослаблении  $L_3 = L_{3,м}$ , минимальная – при начальном  $L_3 = L_0$ . Усиление  $N$  следует рассчитывать по уровню сигнала  $P_2^0$  в точке  $L_3 = L_{3,м}$ .

Динамика системы АПФ при учете только инерционности ФНЧ (постоянная  $T_\phi$ ), представленная в операторном виде, описывается соотношением

$$\Delta\phi^0(S) = \Delta\phi^0 / \phi^0 (1 + N'(S)), \tag{7}$$

где  $N'(S) = N / (1 + T_\phi p)$ .

Для случая ступенчатого отклонения сдвига по фазе –  $\Delta\phi^0 = \Delta\phi_m$ , переходный процесс согласно решению (7)

$$\Delta\phi(t) = \frac{\Delta\phi_\phi}{1+N} \left( 1 + Ne^{-\frac{N+1}{T_\phi}t} \right). \tag{8}$$

При  $\Delta\phi_{уст}(t_y) \approx 1,1\Delta\phi_m / (1+N)$  из (8) длительность переходного процесса  $t_y(t_b)$ , характеризующего быстроедействие АПФ

$$t_y(t_b) = \frac{T_\phi}{1+N} \ln 10N. \tag{9}$$

При учете инерционности ЭУФ, детектора ФД и усилителя УМ динамика системы описывается операторным уравнением третьего порядка

$$qP_1^3 + (2q+1)p_1^2 + [2+N+q(1+tg^2\phi^0)]p_1 + (1+N)+tg^2\phi^0 = 0' \tag{10}$$

где  $q = T_\phi / T_{ЭУФ}$ ;  $p_1 = pT_{ЭУФ}$ ;  $T_\phi = T_M$ ;  $p = d/dt$ .

В рассматриваемом случае для простоты выкладок инерционность фильтра и усилителя приняты одинаковыми. Из (10) находится граничное усиление  $N = N_{ГР}$ , определяющее границу области ее устойчивости

$$N = N_{ГР} < 3(3 + T_\phi / T_{ЭУФ} + T_{ЭУФ} / T_\phi). \tag{11}$$

При  $T_\phi > (3...5)T_{ЭУФ}$  неравенство (11) упрощается

$$N = N_{ГР} < 3(3 + T_\phi / T_{ЭУМ}). \tag{12}$$

---

**Выводы**

---

Полученные математические модели и расчетные соотношения (5)-(11) открывают возможность осуществить параметрический синтез конкретной системы АПФ с расчетом на параметры серийного варакторного диода СВЧ, например типа АА610Б, АА618Б, АА637Г и др.

**Литература**

1. Автоматическая подстройка фазовых набегов в усилителях [Текст] / Г.М. Уткин, М.В. Капранов, Л.А. Белов ; под ред. М.В. Капранова. – М. : Сов. радио, 1972. – 174 с.
2. Бородулин А.А. Предельно допустимые параметры отражающего фазовращателя с плавной электрической подстройкой [Текст] / А.А. Бородулин // Антенны. Сборник №13. – М. : Связь, 1971. – С. 49-55.
3. Довідник з радіо автоматики [Текст] / Т.В. Бурсова, Н.В. Градобоева, М.В. Захарченко та інші. – К. : Техніка, 1992. – 246 с.
4. Царенко В.Т. Автоматические устройства СВЧ. Справочник [Текст] / В.Т. Царенко. – К. : Техніка, 1983. – 151 с.
5. Хижа Г.С. СВЧ фазовращатели и переключатели : Особенности создания на р-і-п-диодах в интегральном исполнении [Текст] / Г.С. Хижа, И.Б. Вендик, Е.А. Серебрякова. – М. : Радио и связь, 1984. – 184 с.