

Nechitaylo Grigory Anatolievich – Southern Federal University; e-mail: necgregory@gmail.com; 28, Garibaldi street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634393175; master of technical science; the department of microprocessor systems; postgraduate student.

УДК 629.7.028.6

Н.Н. Кисель, С.Г. Грищенко, Д.С. Дерачиц

ВИЗУАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВЧ-УСТРОЙСТВ НА ПРИМЕРЕ ФАЗОВРАЩАТЕЛЯ

В современных программах электромагнитного моделирования имеется возможность выполнить декомпозицию устройств, разбив их на более простые структуры. Особенностью исследуемого фазовращателя является набор одинаковых последовательно соединенных каскадов по T-схеме. Результатом электродинамического моделирования одного каскада являются S-параметры. Каждая из подобластей (каскад по T-схеме) с постоянными эффективными параметрами может быть представлен матрицей передачи. Матрица передачи всего устройства получается путем умножения матриц передачи составляющих его частей. Приведены результаты численного моделирования на основе метода декомпозиции. Реализация декомпозиционного подхода автоматизированного проектирования строится на основе преобразования моделей в одной из специализированных программ электромагнитного моделирования САПР СВЧ. Исследованное устройство оптимизировано по S-параметрам в диапазоне частот, исследованы фазовые и амплитудные характеристики обратных и вносимых потерь. Использование метода декомпозиции позволяет существенно снизить время численного моделирования.

Фазовращатель; варактор; микрополосковые устройства; антенные решетки.

N.N. Kisel, S.G. Grishchenko D.S. Derachits

VISUAL DESIGN OF AN EXAMPLE OF MICROWAVE PHASE SHIFTERS

Modern programs electromagnetic simulation it is possible to decompose devices, breaking them down into simpler structures. Feature of the test phase shifter is connected in the same set of cascades in T-scheme. Electrodynamic simulation result is a cascade S-parameters. Each of the sub (on T-stage scheme) with constant effective parameters can be represented by a matrix of transmission. Transfer matrix of the device is obtained by multiplying the transfer matrices of its parts. Implementation of the decomposition approach aided design is based on the transformation of models in one of the specialized programs electromagnetic modeling software. The results of numerical simulation based on the decomposition method. Investigated the device is optimized for S-parameters in the frequency range investigated phase and amplitude characteristics of return loss and insertion loss. Using the decomposition method can significantly reduce the time of numerical simulation

A phase shifter; varactor; microstrip device; arrays.

В последнее время увеличение количества разрабатываемых радиоэлектронных изделий СВЧ-диапазона связано с широким развитием таких сфер применения радиоэлектроники, как космическая, спутниковая, сотовая связь, телекоммуникации. Необходимость создания новых СВЧ-радиоэлектронных средств стимулируется непрерывно повышающимися требованиями к этим устройствам [1–3].

Проектирование СВЧ-устройств представляет собой сложную задачу, включающую взаимосвязанные этапы:

- ♦ системотехническое проектирование (выбор принципов работы и структурных схем устройств);

- ◆ схемотехническое проектирование (выбор и расчет принципиальной схемы устройства, моделирование);
- ◆ конструкторское проектирование (разработка топологии СВЧ-устройства, обеспечение тепловых режимов, расчет надежности и др.);
- ◆ технологическое проектирование (разработка технологического процесса изготовления устройства).

В связи со сложностью современных СВЧ-устройств и систем разработка возможна только с использованием средств автоматизированного проектирования, которые в основном ориентированы на задачи моделирования, конструкторского и технологического проектирования. Методы структурного синтеза разработаны только для ограниченного класса пассивных цепей на сосредоточенных и распределенных элементах. Для реализации задач синтеза общепринятой является интерактивная процедура проектирования СВЧ-устройств с использованием современных программных средств моделирования СВЧ-цепей. Процедура включает как использование специализированных программ, так и "ручные" методики проектирования. При этом выбор первоначальной схемы СВЧ-устройства, например фазовращателя (ФВ), выполняется на основе знаний и интуиции разработчика. Широко используются упрощенные инженерные методики расчета. Как правило, первоначальное схемотехническое решение не удовлетворяет всем требованиям технического задания и требует "доработки" путем многократного моделирования изменения значений элементов и структуры (схемы) устройства. Уточнение величин элементов, длин согласующих шлейфов выполняется на основе метода параметрического синтеза с использованием алгоритмов нелинейной оптимизации. Однако применение параметрического синтеза не позволяет изменять структуру цепи.

Очевидно, что задача проектирования СВЧ-устройств не может быть полностью автоматизирована и может решаться на основе интерактивного взаимодействия разработчика и ЭВМ.

При декомпозиционном синтезе полагается известной структурная схема устройства (рис. 1). Например, плавный ФВ состоит из каскадного соединения идентичных звеньев, построенных по Т-схеме. В схеме одного каскада указывается тип активного элемента (варактора) и задаются пассивные цепи. Декомпозиционный подход к проектированию ФВ основывается на следующей последовательности этапов синтеза:

- ◆ выбор структурной схемы устройства (одного каскада);
- ◆ построение математической модели выбранной структуры с цепями согласования; нахождение предельных (достижимых) значений характеристик для одного каскада по максимально возможному сдвигу фаз, по минимуму потерь при вариации параметров пассивных цепей на частотах рабочего диапазона;
- ◆ определение при анализе "области допустимых значений" к пассивным цепям.

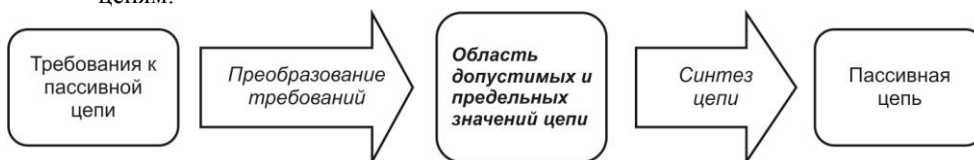


Рис. 1. Этапы проектирования пассивных цепей на основе декомпозиционного метода синтеза

На основе декомпозиционного подхода может быть решена также задача выбора рациональной (оптимальной) структурной схемы СВЧ-устройства. Решение этой задачи осуществляется путем перебора допустимых структур и сравнения их предельно достижимых характеристик.

При проектировании ФВ пассивные цепи проектируются на заданных частотах (или для заданной области).

Требования к пассивным цепям формулируются непосредственно разработчиком, исходя из желаемых характеристик проектируемого устройства. Требования к активному устройству обычно формируются диапазоном управления емкости, рабочим диапазоном частот и размерами варактора.

Декомпозиционный подход к синтезу СВЧ-устройств предполагает работу с некоторыми объектами, обладающими геометрическими и электрофизическими параметрами. При реализации такого подхода применяются средства графического интерфейса, служащего как для отображения и оценки результатов проектирования на промежуточных и окончательном этапах, так и в качестве инструмента "визуального проектирования" ("визуального синтеза"), в результате которого пользователь непосредственно управляет ходом проектирования (например, изменяет входные параметры) и одновременно наблюдает за результатами своих действий (рис. 2).



Рис. 2. Концепция "визуального" проектирования

Реализация декомпозиционного подхода автоматизированного проектирования строится на основе преобразования моделей в одной из специализированных программ электромагнитного моделирования САПР СВЧ. Существующие программы позволяют моделировать одно- и многослойные пассивные СВЧ-компоненты, такие как линии передачи, катушки индуктивности, конденсаторы, резисторы, переходные отверстия, воздушные мосты, трансформаторы и т.д. Программы дают возможность вычислить электромагнитные поля в любой структуре, а также учесть эффекты излучения, поверхностных волн и взаимодействия с соседними элементами схемы.

В таблице приведен обзор некоторых САПР СВЧ, используемых для анализа СВЧ-устройств в Научно-образовательном центре компьютерного моделирования и электронных САПР антенн и устройств СВЧ Южного федерального университета [4–7].

Для электромагнитного моделирования использовались базовые компоненты (ядра) программы **FEKO: CADFEKO** (создание проекта: 3D-моделирование и meshing геометрии, установка параметров входных и выходных параметров проекта, информация о модели сохраняется в файле **.cfm*, а топология – в файле

*.cfs); **OPTFEKO** (оптимизация параметров модели в соответствии с заданной целевой функцией оптимизации); **ADAPTFEKO** (подстройка изменения шага по частоте, выбирая наименьший шаг вблизи резонанса и наибольший шаг в области отсутствия резонанса); **POSTFEKO** (просмотр результатов решения (*.bof) в виде двумерных графиков или трехмерного представления, возможна анимационная визуализация результатов).

САПР для анализа полосковых СВЧ-устройств

| Компания | Название программного обеспечения | Тип анализируемой структуры | Метод анализа | Анализируемая область |
|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|---------------|-----------------------|
| EM Software & Systems-S.A. | FEKO | 3-D произвольная | MoM FEM | Частотная |
| Agilent | HFSS | 3-D произвольная | FEM | Частотная |
| Zeland Software | IE3-D | 3-D произвольная | MoM | Частотная |
| Applied Wave Research, Inc | Microwave Office EMSight | 2.5-D планарная | MoM | Частотная |
| RemCom | XFDTD | 3-D произвольная | FDTD | Временная |

Для оптимизации использовался **Simplex (Nelder Mead)**-метод Нелдера–Мида, также известный как метод деформируемого многогранника и симплекс-метод. В качестве целевой функции рассматривался критерий **S-parameter Goal** по следующим параметрам: по коэффициенту связи **Coupling coefficient** (S_{21}), по коэффициенту отражения **Reflection coefficient** (S_{11}).

В качестве исследуемой модели рассмотрена структура в виде последовательно соединенных каскадов, выполненных на основе Т-схемы [8–9]. Изменяемыми параметрами были ширина шлейфов и их длина, ширина и длина основной линии передачи.

Процесс визуального определения элементов ФВ заключается в том, что пользователь, управляя формой годографа идеальной цепи, добивается попадания в область допустимых значений точек годографа реального ФВ. На экране компьютера отображаются одновременно два взаимосвязанных годографа – идеальной цепи и соответствующему ему реальной модели ФВ (рис. 3).

В современных программах электромагнитного моделирования имеется возможность выполнить декомпозицию устройств, разбив их на более простые структуры. Особенностью ФВ является набор одинаковых последовательно соединенных каскадов по Т-схеме. Результатом электродинамического моделирования одного каскада являются S-параметры. Рассматриваемое устройство удобно описывать с помощью матрицы передачи. Поскольку каждая из подобластей с постоянными эффективными параметрами может быть представлена матрицей передачи, то матрица передачи всего устройства получается путем умножения матриц передачи составляющих его частей.

Оптимизация выполнялась для одного каскада ФВ, что было связано с уменьшением времени расчетов. На рис. 4 показаны изменения ширины и длины шлейфа, полученные в результате решения задачи оптимизации. Для оптимальных значений геометрических параметров одного каскада на рис. 5 приведены обратные и вносимые потери.

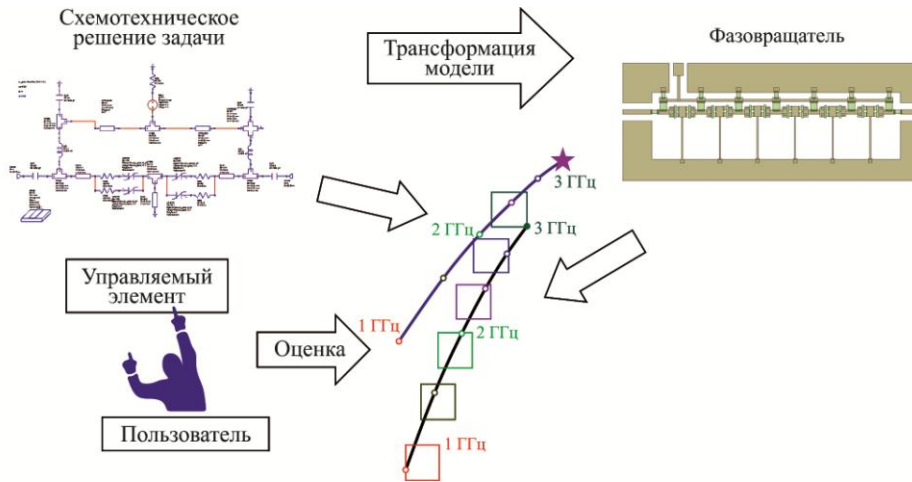


Рис. 3. Процедура интерактивного «визуального» проектирования ФВ

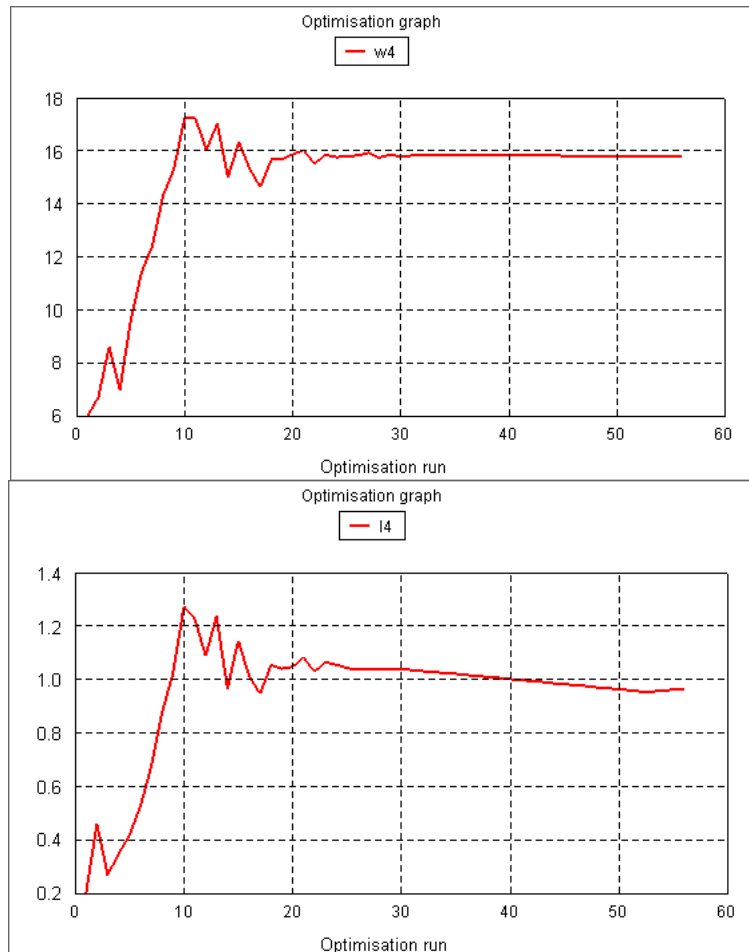


Рис. 4. Изменения значений оптимизируемых переменных – ширина шлейфа и длина шлейфа

Полученный уровень для параметров вносимых потерь для одного каскада S_{21} не превышает 0,32 дБ, а уровень обратных потерь S_{11} ниже -20 дБ в диапазоне частот от 1 до 3 ГГц. Однако очевидно, что последовательное соединение нескольких каскадов приведет к ухудшению характеристик структуры, что связано с отсутствием полного согласования между отдельными каскадами, а также с тем, что оптимизация выполняется для одного значения емкости варактора. При изменении емкости изменяется АЧХ и ФЧХ вносимых и обратных потерь, а также КСВ.

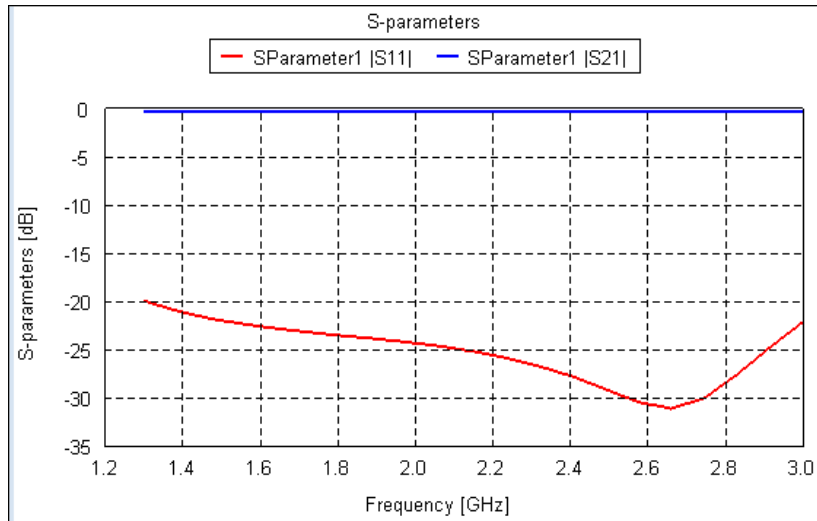


Рис. 5. Результат оптимизации по S -параметрам

Ниже представлены в сравнении результаты АЧХ (рис. 6) и ФЧХ (рис. 7) вносимых потерь для ФВ, полученные методом декомпозиции на основе однокаскадного ФВ после оптимизации (сплошная линия), и для шестикаскадного ФВ на основе полного электромагнитного моделирования (штриховая линия).

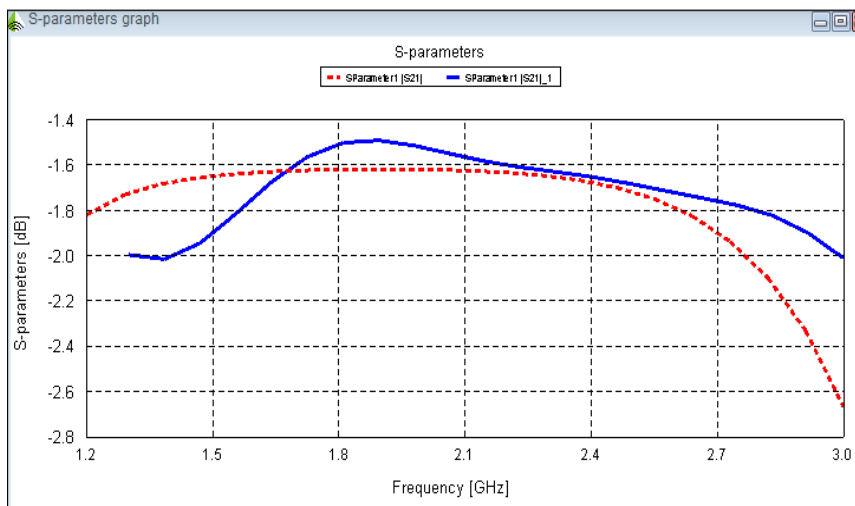


Рис. 6. Сравнение АЧХ обратных потерь путем каскадного соединения и полного электромагнитного моделирования

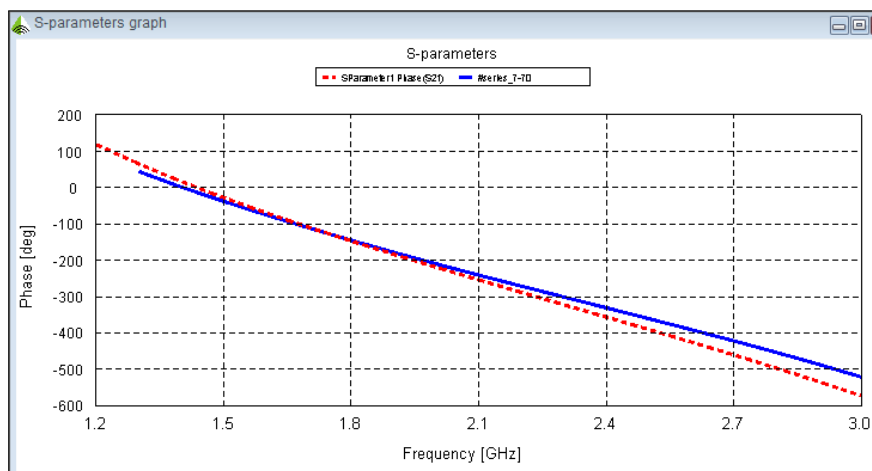


Рис. 7. Сравнение ФЧХ обратных потерь путем каскадного соединения и полного электромагнитного моделирования

Таким образом, выполнено моделирование ФВ в программной среде FEKO. Исследованное устройство оптимизировано по S-параметрам в диапазоне частот, исследованы фазовые и амплитудные характеристики обратных и вносимых потерь. Анализ ФВ методом декомпозиции выполнен на основе расчета одного каскада по Т-схеме. Возможность такого подхода позволяет существенно снизить время численного моделирования. Результаты показывают хорошее согласование при использовании различных подходов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фуско В. СВЧ-цепи. Анализ и автоматизированное проектирование: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1990. – 288 с.
2. Паньчев А.И. Учет поляризационных эффектов в канале системы WLAN // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 5 (142). – С. 215-220.
3. Паньчев А.И., Дубинская И.В. Анализ интенсивности сигналов локальной беспроводной сети связи в смежных помещениях // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 11 (148). – С. 44-50.
4. <http://www.appwave.com/products/si>.
5. <http://www.ansys.com>.
6. <http://www.cst.com>.
7. Кисель Н.Н. Моделирование прикладных задач электродинамики и антенн на супервычислительной системе в пакете FEKO: Учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – 326 с.
8. Кисель Н.Н., Грищенко С.Г., Богаченко Д.А. Моделирование электрически управляемого фазовращателя со структурой полосно-заграждающего фильтра // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 5 (142). – С. 105-111.
9. Kim H., Kozurev A.B., Karbassi A, D.W./ van der Weide Linear tunable shifter using a left-handed transmission line // IEEE Microwave and Wireless components letters. – 2005. – Vol. 15, № 5. – P. 366-369.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Е. Панич.

Кисель Наталья Николаевна – Южный федеральный университет; e-mail: dekanatrtf@tti.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, ГСП-17А; тел.: 88634371634; кафедра антенн и радиопередающих устройств; профессор; к.т.н.; доцент.

Грищенко Сергей Григорьевич – радиотехнический факультет; декан; к.т.н.; доцент.

Дерачиц Дмитрий Сергеевич – радиотехнический факультет, магистрант.

Kisel Natalia Nikolayevna – Southern Federal University; e-mail: dekanat-rtf@tti.sfedu.ru; GSP-17A, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371634; the department of antennas and radio transmitters; professor; cand. of eng. sc.; associate professor.

Grishchenko Sergey Grigorievich – the college of radio engineering; dean; cand. of eng. sc.; associate professor.

Derachits Dmitriy Sergeevich – the college of radio engineering; magister's.

УДК 621.316.726.078

Ю.А. Гелозе, П.П. Клименко, А.В. Максимов

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ КОНТУРА ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ, ФУНКЦИОНИРУЮЩЕГО ПРИ БОЛЬШИХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

Исследована устойчивость контура фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) цифровых синтезаторов частоты при воздействии на них больших возмущений. Анализируется динамика системы в случае, когда большие возмущения приводят к прерыванию процесса стабилизации частоты, и при этом набег фазы сигнала, приведенного к входу фазового дискриминатора, не превышает заданную величину. В представленных исследованиях нелинейность дискриминатора фазовой системы учитывается. Представленная система обладает свойством самоорганизации. Рассматриваемая задача решается с помощью математического метода анализа абсолютной устойчивости систем. В работе использован круговой критерий, обеспечивающий не только устойчивость равновесных состояний, но и вынужденных процессов. Также в работе выполнен анализ переходных процессов для нелинейной модели фазовой автоподстройки частоты цифрового синтезатора.

Цифровой синтезатор частоты; фазовый дискриминатор; биномиальный фильтр; внеполосное излучение; фазовая автоподстройка частоты; нелинейный критерий устойчивости; устойчивое состояние; статистическая устойчивость.

Yu.A. Ghelozhe, P.P. Klimenko, A.V. Maksimov

RESEARCHING ALGORITHMS CONTROL ANGLE LIST BEING PROVIDED REQUIREMENT DINAMICS CHARACTERES OF SYSTEM IN CRITICAL SITUATION

In small-sized digital frequency synthesizers constructed on the basis of a frequency stabilization phase contour (FSPC) with digital, frequency dividers the level of non-harmonic components largely depends on control voltage pulsation of the pulse-phase discriminator (PPD). To reduce the influence of these pulses on the quality of a signal the inertial filters of the low frequencies (FLF) smoothing the pulses up to the necessary level are included into the contour FSPC. The problem is to develop the strategy of transient control that ensures leading of the system in an equilibrium from the initial free conditions, the solution of non-linear differential equation of FSPC base system being available.

Digital frequency synthesizer; pulse-phase discriminator; inertial filters.

Для нелинейных систем высокого порядка при нулевых задающем и возмущающем воздействиях и характеристики нелинейного элемента, укладывающейся в сектор $[0, K]$, румынским математиком В.М. Поповым решена задача асимптотической устойчивости в целом состояний равновесия [1]. Устойчивость такого рода в современной теории управления называют абсолютной устойчивостью равновесных состояний.