

На правах рукописи



УДК 621.373.5

ЛИЩИШИН ВИКТОР ПЕТРОВИЧ

**Методика проектирования мощных стабильных,
перестраиваемых по частоте транзисторных каскадов
высокочастотных автогенераторных устройств**

Специальность 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2013

Работа выполнена на кафедре радиотехнических устройств
ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель: **Богданов Александр Сергеевич**,
кандидат технических наук, доцент,
Рязанский государственный радиотехнический
университет, доцент кафедры радиотехнических устройств

Официальные оппоненты: **Кулешов Валентин Николаевич**,
доктор технических наук, профессор,
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
г. Москва, профессор кафедры формирования колебаний и
сигналов

Семенюк Анатолий Федорович,
кандидат технических наук, доцент,
Рязанское высшее воздушно-десантное командное
училище (военный институт) им. генерала армии
В.Ф. Маргелова, г. Рязань, доцент кафедры радио, радио-
релейной, тропосферной, спутниковой и проводной связи

Ведущая организация: **ОАО «Рязанский радиозавод»**, г. Рязань

Защита состоится « 06 » декабря 2013г. в 11 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.211.04 в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГРТУ.

Автореферат разослан « 05 » ноября 2013г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук



Г.В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. При разработке радиотехнических устройств, в том числе средств подвижной и фиксированной связи, ВЧ и ОВЧ-диапазонов большое внимание уделяется улучшению энергетической эффективности, надежности мощных каскадов радиопередающих устройств, а также снижению их массогабаритных показателей.

В технической литературе описываются стабильные по частоте автогенераторы (АГ), используемые в генераторных и радиопередающих устройствах, выполняемые на различных типах транзисторных активных приборов (АП).

Вопросам разработки генераторных устройств, в том числе, стабильных АГ, посвятили свои работы С.И. Евтянов, М.С. Нейман, О.В. Алексеев, Г.Б. Альтшуллер, М.В. Благовещенский, В.М. Богачев, С.И. Бычков, А.А. Дворников, С.А. Дробов, В.И. Каганов, В.Н. Кулешов, А.Ф. Плонский, Ю.И. Судаков, Г.М. Уткин, В.В. Шахгильдян, Г.Т. Шитиков, М. Левис, Р. Митчелл, Т. Паркер, П. Хартманн и другие.

Выходная мощность автогенераторов на одиночных транзисторах, со стабилизирующим частоту кварцевым резонатором (КР) на объемных типах колебаний, составляет, как правило, единицы мВт (ограничивается допустимой мощностью рассеивания на КР). Также при использовании АГ с таким КР в генераторных устройствах ВЧ и ОВЧ-диапазонов требуется включать в состав аппаратуры умножители частоты, что нарушает чистоту спектра сигнала, повышает массогабаритные показатели и снижает КПД генераторных устройств в целом.

При использовании для стабилизации частоты АГ резонатора или линии задержки на поверхностных акустических волнах (ПАВ) решается задача повышения вибропрочности и, частично, снижения массогабаритных показателей (из-за отсутствия умножителей частоты), но при этом выходная мощность АГ остается на уровне десятков мВт при условии использования одиночного транзистора в качестве его активного прибора.

Таким образом, для создания генераторного устройства с мощными высокостабильными выходными колебаниями необходимо использовать в нём большое количество усилительных каскадов, что приводит к увеличению габаритов аппаратуры и сложности ее настройки.

Одним из способов улучшения вышеприведённых параметров является использование в источниках стабильных колебаний составных активных приборов (САП), представляющих собой два и более одиночных транзистора, соединенных по составной схеме с нарастающей от входа к выходу структуры номинальной мощностью. Это позволяет существенно повысить выходную мощность таких автогенераторных каскадов, как следствие, значительно сократить количество промежуточных каскадов усиления в таких генераторных трактах, и, таким образом, улучшить энергетические показатели генераторной и радиопередающей аппаратуры, снизить ее габариты, повысить надежность, упростить настройку и уменьшить затраты на ее эксплуатацию.

В настоящее время в технической литературе описаны мощные АГ на САП с КР как на объемных типах колебаний, так и на ПАВ, работающие на фиксированных частотах. Однако, в радиотехнических устройствах и системах часто необходимо осуществлять перестройку частоты задающих АГ для обеспечения их диапазонных свойств.

До настоящего времени вопросы проектирования и расчета основных параметров мощных стабильных, перестраиваемых по частоте автогенераторов на САП с устройством на ПАВ в качестве стабилизирующего частоту элемента изучены не были.

В связи с этим работа по исследованию мощных стабильных, перестраиваемых по частоте транзисторных каскадов высокочастотных автогенераторов актуальна.

Цель и задачи работы. Целью данной работы является разработка методики проектирования и новых схемотехнических решений транзисторных высокочастотных автогенераторных каскадов с расширенным диапазоном перестройки, повышенной температурной стабильностью частоты и выходной мощностью, составляющей единицы Вт.

Поставленная цель предполагает решение следующих задач:

1) разработка и применение методики, позволяющей анализировать нелинейные однокаскадные транзисторные резонансные усилители мощности (ТРУМ) с низкочастотными цепями согласования (ЦС) в полосе рабочих частот;

2) проведение анализа фазовых соотношений токов в общей нагрузке генераторных каскадов на САП при работе последних в пределах рабочей полосы частот;

3) проведение частотного анализа каскадов на составных активных приборах. Разработка структуры САП с контролируемой в полосе рабочих частот устойчивостью (САП с КУ), предназначенных для использования в ТРУМ и АГ;

4) исследование энергетических соотношений в цепях перестраиваемого автогенератора с линией задержки на ПАВ на САП с КУ в установившемся режиме;

5) проведение теоретического анализа эффектов расширения полосы перестройки и уменьшения относительной температурной нестабильности частоты генерируемых колебаний мощных автогенераторов с линией задержки на ПАВ на САП с КУ;

6) разработка методики инженерного расчета мощного стабильного, перестраиваемого по частоте автогенератора с линией задержки на ПАВ на САП с КУ;

7) проведение численного моделирования и экспериментального исследования усилителей мощности и автогенераторов на САП с КУ.

Методы проведения исследований. Для проведения теоретических исследований в диссертационной работе использовались матричный метод, методы нелинейной теории колебаний, теории электрических цепей. Численное математическое моделирование осуществлялось в программе *MatLab*, а схемотехническое – в среде *Micro-Cap*.

Научная новизна. Научная новизна работы состоит в следующем.

1) определена связь между типами цепей согласования и частотной зависимостью коэффициента устойчивости нелинейных транзисторных резонансных усилителей мощности, что позволяет получать повышенный на 10 ... 30 % коэффициент усиления по мощности при заданных значениях коэффициента устойчивости.

2) разработаны способы обеспечения в пределах полосы пропускания стабилизирующего частоту элемента устойчивой работы составных активных приборов при работе последних в автогенераторах;

3) доказана целесообразность применения фазовых корректоров в структуре составных активных приборов, предназначенных для использования в мощных, перестраиваемых по частоте автогенераторах, для расширения его полосы перестройки.

Практическая значимость. Представленные в работе методики и результаты исследования, полученные для проектирования мощных стабильных, перестраиваемых по частоте АГ предназначены для практического использования при разработке генераторной и радиопередающей техники. Практическая ценность заключается в следующем:

1) разработана методика проектирования нелинейных транзисторных резонансных усилителей мощности с низкочастотными цепями согласования, применение которой позволяет обеспечивать допустимое изменение коэффициента устойчивости в пределах полосы рабочих частот при максимально возможных значениях коэффициента усиления по мощности;

2) разработаны схемотехнические решения, предлагаемые при разработке схем нелинейных транзисторных резонансных усилителей мощности, позволяющие существенно повысить коэффициент усиления по мощности в полосе рабочих частот проектируемых усилителей благодаря использованию специально подобранной конфигурации их цепей согласования;

3) разработана методика инженерно-технического расчета мощных стабильных, перестраиваемых по частоте автогенераторов на составных активных приборах, применение которой приводит к расширению полосы перестройки генерируемых такими автогенераторами колебаний;

4) предложены схемотехнические решения мощных стабильных, перестраиваемых по частоте в пределах полосы пропускания линии задержки на ПАВ автогенераторов, вы-

полненных на составных активных приборах, обладающих расширенной полосой рабочих частот и повышенной температурной стабильностью генерируемых колебаний.

Практическая значимость подтверждается соответствующими актами внедрения.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы обеспечивается применением при проведении исследований апробированных методов нелинейной теории колебаний, теории электрических цепей, а также сходимостью полученных результатов с результатами схемотехнического моделирования и натурального эксперимента.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) методика проектирования нелинейных транзисторных резонансных усилителей мощности с низкодобротными цепями согласования, позволяющая разрабатывать усилители с уменьшенным в 3...16 раз в зависимости от конфигурации цепей согласования диапазоном изменения коэффициента устойчивости в пределах рабочей полосы частот;

2) схемотехнические решения составных активных приборов, обеспечивающие при рекомендованных значениях коэффициента устойчивости (5...10 единиц) повышенный (на 10 ... 30 %) коэффициент усиления, предназначенных для использования в автогенераторных каскадах;

3) схемотехнические решения мощных стабильных, перестраиваемых по частоте в пределах полосы пропускания линии задержки на ПАВ автогенераторов, обеспечивающие расширение на 45 % полосы рабочих частот и повышение температурной стабильности генерируемых колебаний.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1) 38-й научно-технической конференции РГРТА, Рязань, РГРТА, 2004г;

2) Научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, посвященной 100-летию со дня рождения М.С. Неймана, Москва, МАИ, 2005г.;

3) Всероссийском научно-практическом семинаре «Сети и системы связи», Рязань, Рязанское высшее военное командное училище связи, 2005 г.;

4) 5-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика - 2006», Москва, МАИ, 2006 г.;

5) Межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Системы управления и передачи информации», СПб, Балтийский гос. техн. университет, 2007г.;

6) 2-ой Международной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации», Москва, РНТО РЭС им. А. С. Попова, 2007г.;

7) Межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Системы управления и передачи информации», СПб, Балтийский гос. техн. университет, 2009г.;

8) 41-й научно-технической конференции РГРТУ, Рязань, РГРТУ, 2010г;

9) Научно-технической конференции молодых специалистов ОАО ГРПЗ, Рязань, ОАО «Государственный Рязанский приборный завод», 2012г.

По теме диссертационной работы опубликовано 13 работ, из них 2 статьи в рецензируемом научном журнале из перечня ВАК РФ, патент РФ на изобретение, 3 статьи в сборниках научных трудов, 1 депонированная статья, 6 тезисов докладов на научно-технических конференциях.

Результаты диссертационной работы внедрены на ФГУП «Государственный Рязанский приборный завод», используются в учебном процессе ФГБОУ ВПО «РГРТУ», что подтверждается соответствующими актами.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 124 наименований и 9 приложений. Она содержит 285 листов, в том числе 152 листа основного текста, 78 рисунков, 7 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проектирования мощных стабильных, перестраиваемых по частоте транзисторных каскадов высокочастотных автогенераторных устройств. Здесь же поставлена цель и определены задачи исследований, перечислены новые научные результаты, полученные в работе; представлены ее практическая ценность и апробация; раскрыта структура диссертации.

В первой главе работы проводится обзор современного состояния и перспектив применения мощных высокочастотных полевых и биполярных транзисторов разных типов в генераторных каскадах радиоэлектронной аппаратуры. Рассматриваются возможности использования САП для проектирования мощных автогенераторных устройств. Проанализированы достоинства и недостатки автогенераторов со стабилизацией частоты выходных колебаний, выполненных по схеме с запаздывающей обратной связью на основе линий задержек на ПАВ, а также одноконтурных автогенераторов на основе трехточечных схем с резонаторами на объемных типах колебаний. Рассмотрены различные способы перестройки частоты автогенераторов.

Сделан вывод о том, что для получения стабильных по частоте АГ с максимальной перестройкой, необходимо использовать схему с запаздывающей обратной связью на линии задержки на ПАВ, а для управления частотой генерируемых колебаний применять, например, метод селекции мод. Такой АГ на САП позволит вырабатывать достаточно стабильные мощные автоколебания вплоть до частот ОВЧ и большей части УВЧ диапазонов.

Во второй главе диссертационной работы рассматривается САП с КУ (рисунок 1), анализ которого удобно проводить, разделив его условно на две составляющие части, между которыми находится цепь, обеспечивающая фазирование выходных токов транзисторов в общей нагрузке (цепь коррекции):

- выходная часть, выполненная на транзисторе $VT2$ по схеме с общим эмиттером (ОЭ);
- часть на транзисторе $VT1$ с разделенной нагрузкой.

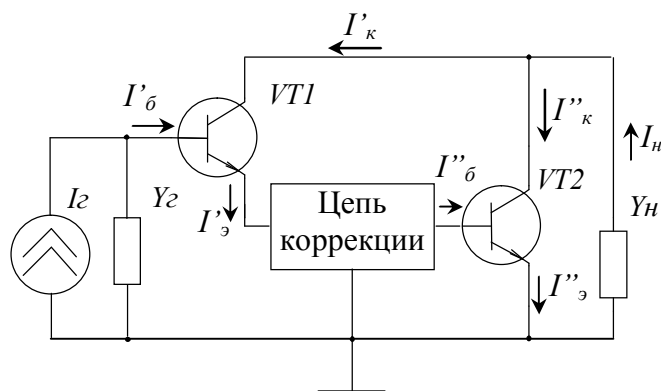


Рисунок 1 – Эквивалентная схема САП

мости источника возбуждения и нагрузки.

Важно знать, как ведет себя в получаемой при использовании низкодобротных цепей согласования, достаточно широкой, полосе рабочих частот K_y , учитывающий шунтирующее действие приведенных ко входу и выходу активного прибора иммитансов. При значениях K_y , превышающих 5 единиц, не требуется применять дополнительных мер по обеспечению устойчивой работы каскада.

В процессе анализа усилителей использована нелинейная П-образная схема замещения транзистора с полигональной аппроксимацией его характеристик.

Предлагаемая методика проектирования нелинейных однокаскадных ТРУМ с низкодобротными ЦС описывается алгоритмом, представленным на рисунке 2. Алгоритм состоит из цикла, учитывающего изменение частоты входного сигнала, и вложенного в него дополнительного цикла, учитывающего режимную зависимость параметров транзистора,

При частотном анализе частей САП, кроме уровня выходной мощности, контролировался другой не менее важный параметр – коэффициент устойчивости K_y :

$$K_y = \frac{2 \cdot \operatorname{Re}(Y_{11}^{CT} + Y'_z) \cdot \operatorname{Re}(Y_{22}^{CT} + Y'_n) - \operatorname{Re}(Y_{12}^{CT} Y_{21}^{CT})}{|Y_{12}^{CT} Y_{21}^{CT}|},$$

где Y_{ij}^{CT} – значения Y -параметров транзистора, усредненные по первой гармонике коллекторного тока; Y'_z , Y'_n – приведенные к электродам транзистора комплексные проводи-

усредненных по первой гармонике коллекторного тока. Анализ начинается с резонансной частоты до достижения границ полосы рабочих частот.

Блок 1. Рассчитываем параметры нелинейных усилителей мощности на резонансной частоте, на максимальный номинальный коэффициент передачи по мощности $K_{p,n}$ при заданном K_{γ} . По заданной выходной мощности, определяем мощность, необходимую для возбуждения активного прибора ТРУМ на резонансной частоте $P_{ex,рез}$.

Затем рассчитываем значение тока источника возбуждения, обеспечивающее на резонансной частоте необходимую входную мощность (с учетом наличия входных ЦС):

$$I_z = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{ex,рез}}{Y_{ex}} \cdot (Y_{ген} + Y_{ex})^2}; \quad (1)$$

где $Y_{ген}$ - входной иммитанс цепи согласования;

$$Y_{ex} = Y_{11} - \frac{Y_{12} \cdot Y_{21}}{Y_{22} + Y'_n} - \text{входная проводимость транзистора.}$$

Далее выбираются вид и схема входной и выходной ЦС, их добротности и рассчитываются номинальные величины элементов данных цепей.

Блок 2. На частоте анализа рассчитываем по выражениям, выведенным для выбранных схем ЦС, новые значения приведенных к электродам транзистора иммитансов источника возбуждения $Y'_z(f)$ и нагрузки $Y'_n(f)$.

Блок 3. Находим новые значения матрицы Y -параметров транзистора, Y_{ex} ; и используя значения приведенных иммитансов $Y'_z(f)$ и $Y'_n(f)$, по выражению

$$K_{p(n+1)} = \frac{4 \cdot |Y_{21}|^2 \cdot \text{Re}(Y'_z(f)) \cdot \text{Re}(Y'_n(f))}{|(Y_{11} + Y'_z(f)) \cdot (Y_{22} + Y'_n(f)) - Y_{12} \cdot Y_{21}|^2},$$

определяется новое значение $K_{p,n}$.

Блок 4. Пересчитываем значение мощности на входе АП P_{ex} , используя значение тока, рассчитанное по формуле (1), и пересчитанное для этой частоты значение Y_{ex} :

$$P_{ex(n+1)} = \left| \frac{1}{2} \cdot \left(I_z \cdot \left(\frac{Y_{ex}}{Y_{ex} + Y_{ген}} \right) \right)^2 \cdot \frac{1}{Y_{ex}} \right|.$$

Блок 5. Значение выходной мощности на частоте анализа находится по выражению

$$P_{вых(n+1)} = K_{p(n+1)} \cdot P_{ex(n+1)}. \quad (2)$$

Описанная выше часть алгоритма учитывает частотную зависимость Y -параметров транзистора; приведенных к электродам транзистора иммитансов генератора и нагрузки, а также уменьшение входной мощности вследствие расстройки входной ЦС.

Блок 6. Для учета режимной зависимости Y -параметров транзистора от значения первой гармоники коллекторного тока I_{k1} , организовывается дополнительный цикл: по полученному значению выходной мощности $P_{вых(n+1)}$, определяем значение первой гармоники коллекторного тока $I_{k1(n+1)}$ по выражению:

$$I_{k1(n+1)} = 0,5 \cdot \alpha_1(\Theta) \cdot S_{kp} \cdot E_k \cdot (1 - \sqrt{1 - x}), \quad (3)$$

где $x = \frac{16 \cdot P_{вых(n+1)}}{S_{kp} \cdot E_k^2}$ – нормированная высота импульса тока;

$\alpha_1(\Theta)$ - коэффициент Берга для первой гармоники коллекторного тока;

S_{kp} - крутизна критического режима;

E_k - напряжение коллекторного питания.

Блок 7. Рассчитываем значения элементов матрицы Y -параметров транзистора, $Y_{ex(n+1)}$ и величину номинального коэффициента передачи по мощности $K_{p(n+2)}$ по формуле

$$K_{p(n+2)} = \frac{4 \cdot |Y_{21нов}|^2 \cdot \text{Re}(Y'_z(f)) \cdot \text{Re}(Y'_n(f))}{|(Y_{11нов} + Y'_z(f)) \cdot (Y_{22нов} + Y'_n(f)) - Y_{12нов} \cdot Y_{21нов}|^2}.$$

Блок 8. Определяем значение входной мощности по выражению:

$$P_{\text{вх}(n+2)} = \left| \frac{1}{2} \cdot I_c \cdot \left(\frac{Y_{\text{вх}(n+1)}}{Y_{\text{вх}(n+1)} + Y_{\text{ген}}} \right) \right|^2 \cdot \frac{1}{Y_{\text{вх}(n+1)}}.$$

Блок 9. Находим уточненное значение выходной мощности $P_{\text{вых}(n+2)}$:

$$P_{\text{вых}(n+2)} = K_{p(n+2)} \cdot P_{\text{вх}(n+2)}.$$

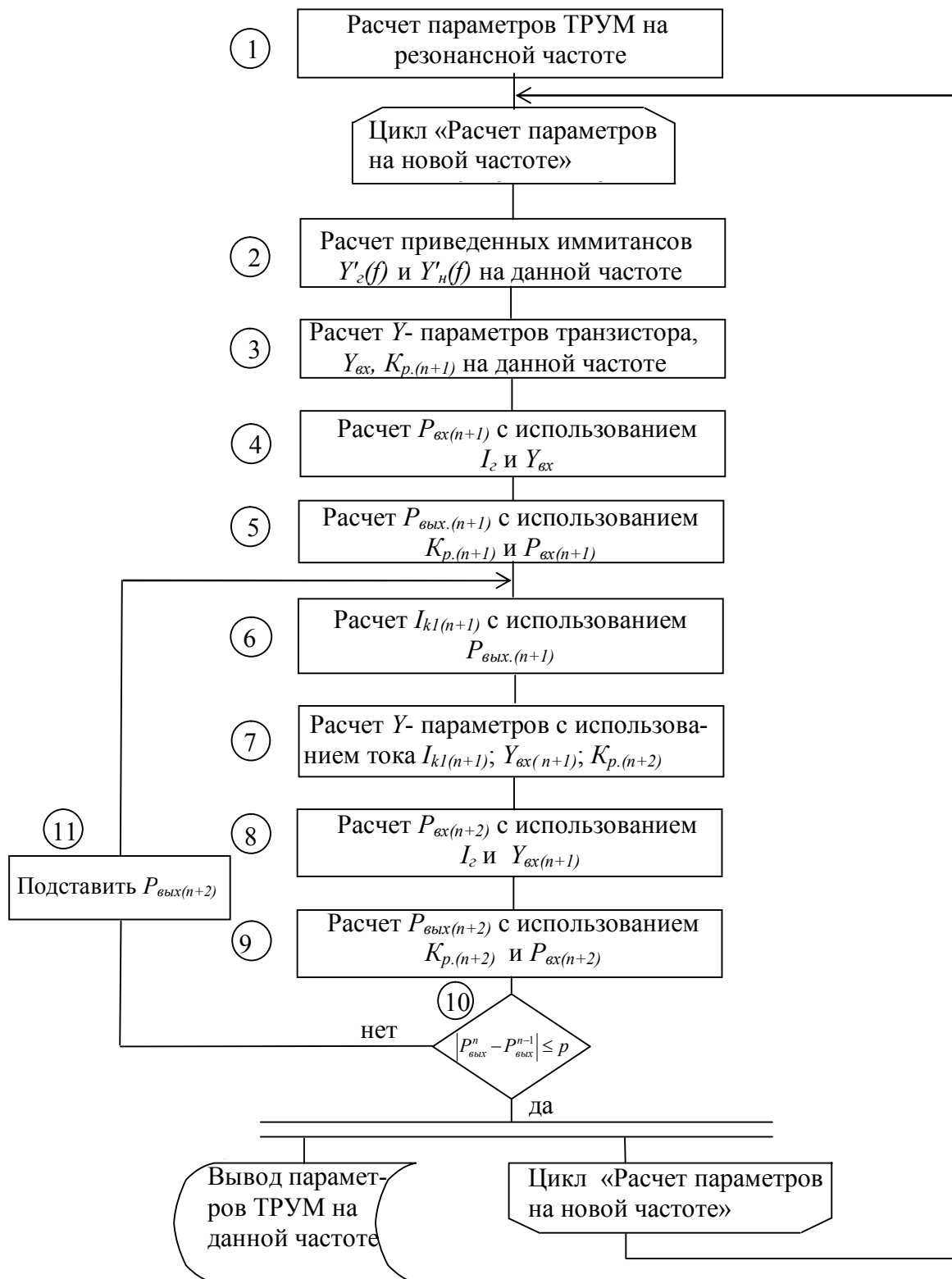


Рисунок 2 – Алгоритм вычислений, соответствующий методике проектирования высокочастотного однокаскадного нелинейного ТРУМ с низкодобротными ЦС

Блок 10. Условием выхода из дополнительного цикла является выражение

$$\left| P_{\text{вых}(n+2)} - P_{\text{вых}(n+1)} \right| \leq p,$$

где p – необходимая точность расчета выходной мощности.

Блок 11. В случае, если данное условие не выполняется, необходимо подставить значение выходной мощности $P_{\text{вых}(n+2)}$ в выражение (3).

Проведенный по разработанной методике частотный анализ нелинейного ТРУМ, собранного по схеме с ОЭ, с низкодобротными входной и выходной ЦС в виде ФНЧ, выявил снижение ниже минимально допустимого уровня коэффициента устойчивости при увеличении, относительно резонансной, рабочей частоты (см. рисунок 3). Данное обстоятельство вдвое ограничивает рабочую полосу пропускания ТРУМ со стороны ее верхней границы, что объясняется влиянием приведенных к входному и выходному электродам транзистора иммитансов ЦС.

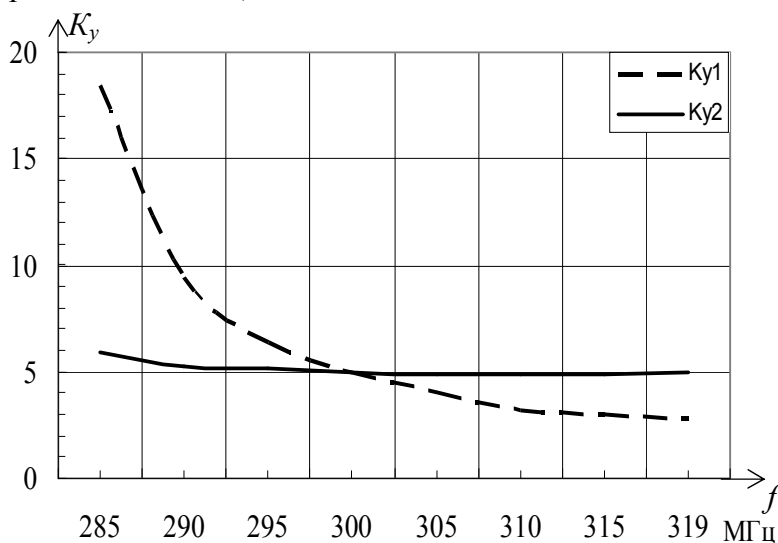


Рисунок 3 – Частотные зависимости K_y каскадов ТРУМ: линия K_{y1} – ЦС каскада выполнены в виде ФНЧ; линия K_{y2} – входная ЦС каскада выполнена в виде ФВЧ, выходная – ФНЧ

Для характеристики равномерности частотной зависимости K_y введен коэффициент N_{K_y} , равный разности максимального и минимального значений коэффициента устойчивости в пределах полосы рабочих частот ТРУМ.

На основе проведенного анализа данной схемы сделан вывод о необходимости контроля за значением K_y , который может быть осуществлен, например, взаимной компенсацией влияния приведенных к электродам транзистора иммитансов за счет использования

комбинации входной ЦС в виде ФВЧ (частотная зависимость приведенного к электродам транзистора иммитанса имеет возрастающий характер) и выходной ЦС в виде ФНЧ (частотная зависимость приведенного к электродам транзистора иммитанса имеет убывающий характер) при проектировании нелинейных ТРУМ с низкодобротными ЦС. Вышеизложенное подтверждается сравнительным анализом зависимостей K_y нелинейных ТРУМ с различными видами низкодобротных ЦС, представленных на рисунке 3 и в таблице 1.

Т а б л и ц а 1 – Результаты частотного анализа нелинейных ТРУМ

Вид входной / выходной ЦС	$f_{\text{нижняя}}$ по $P_{\text{вых}}$ МГц	$f_{\text{верхняя}}$ по $P_{\text{вых}}$ МГц	Полоса по мощности $\Delta f_{P_{\text{вых}}}$ МГц	$f_{\text{нижняя}}$ по K_y МГц	$f_{\text{верхняя}}$ по K_y МГц	Полоса по устойчивости Δf_{K_y} МГц	$K_{y,\text{макс}}$	$K_{y,\text{мин}}$	N_{K_y}
ФНЧ/ФНЧ	288	318	30	288	300	12	11	3	8
ФВЧ/ФНЧ	287	316	29	287	316	29	5,5	5	0,5

Частотный анализ входной части САП – каскада с разделенной нагрузкой, работающего в линейном режиме, проведен с учетом того, что его колебательная система, включенная в цепь эмиттера, является одновременно цепью коррекции САП, ЦС в цепи коллектора – выходной ЦС САП, ЦС в цепи базы – входной ЦС САП. Поэтому очевидно, что на входе и в коллекторной цепи каскада с разделенной нагрузкой должны стоять ЦС в ви-

де ФНЧ, а в эмиттерной – в виде ФВЧ. Результаты сравнительного частотного анализа данной схемы и схемы, в которой все ЦС выполнены в виде ФНЧ, приведены в таблице 2.

В результате исследований фазовых соотношений токов в общей нагрузке каскада на САП сформулированы требования к цепи коррекции:

1) согласование проводимостей в цепи эмиттер транзистора $VT1$ – база транзистора $VT2$ в полосе рабочих частот;

2) обеспечение постоянного (с заданной точностью) в полосе рабочих частот фазового сдвига между токами эмиттера $VT1$ и базы $VT2$, равного по модулю и противоположного по знаку фазовому сдвигу, вносимому выходным транзистором $VT2$ на резонансной частоте.

Т а б л и ц а 2 – Результаты частотного анализа каскадов с разделенной нагрузкой

Вид входной / коллекторной/ эмиттерной ЦС	Полоса по $K_{p,n}$ в коллекторную часть, МГц	Полоса по $K_{p,n}$ в эмиттерную часть, МГц	Полоса по K_y в коллекторной цепи, МГц	Полоса по K_y в эмиттерной цепи, МГц	Полоса по общему K_y , МГц	N_{K_y} по эмиттерной цепи
ФНЧ/ФНЧ/ФВЧ	18,5МГц	12МГц	18,5МГц	12МГц	12МГц	0,5
ФНЧ/ФНЧ/ФНЧ	22МГц	9МГц	22МГц	5МГц	5МГц	7

Составной активный прибор с комбинацией ЦС, выполненной по рекомендованному выше способу и цепью коррекции, отвечающей поставленным требованиям, назван САП с контролируемой в полосе рабочих частот устойчивостью.

На основании результатов, полученных в главе 2 диссертационной работы, предложены схемы ГВВ на САП с КУ, одна из которых представлена на рисунке 4.

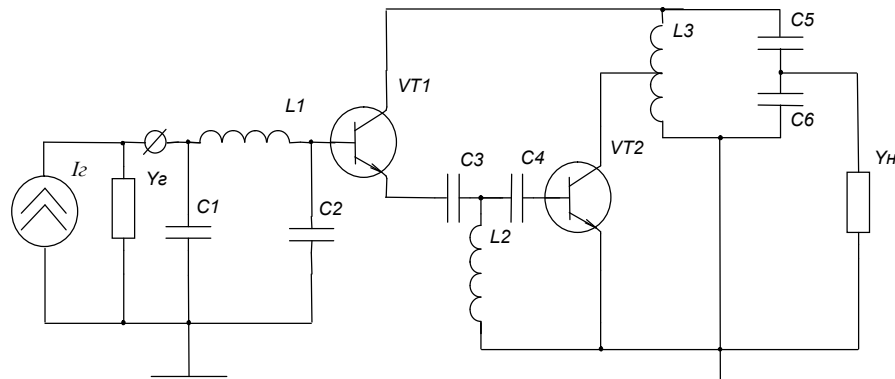


Рисунок 4 – Эквивалентная по переменному току схема ГВВ на САП с КУ

В третьей главе работы рассматриваются мощные стабильные, перестраиваемые по частоте автогенераторы с запаздывающей обратной связью, построенные на составных активных приборах. Анализ АГ с линией задержки на ПАВ в цепи обратной связи проведен по описанной в технической литературе методике с учетом использования в схеме АГ САП с КУ.

Линейная часть САП с КУ описывается матрицей Y -параметров:

$$\|Y_{CT}\| = \begin{vmatrix} Y_{11}^{CT} & Y_{12}^{CT} \\ Y_{21}^{CT} & Y_{22}^{CT} \end{vmatrix},$$

нагружена на пассивную нагрузку, описываемую матрицей

$$\|Y_H\| = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & Y_H \end{vmatrix},$$

и цепь обратной связи, состоящую из входной согласующей цепи АГ и линии задержки на ПАВ. Указанные четырехполюсники представлены матрицами проводимостей

$$\|Y_{П}\| = \begin{vmatrix} Y_{11П} & Y_{12П} \\ Y_{21П} & Y_{22П} \end{vmatrix} \quad \text{и} \quad \|Y_{ПАВ}\| = \begin{vmatrix} Y_{11ПАВ} & Y_{12ПАВ} \\ Y_{21ПАВ} & Y_{22ПАВ} \end{vmatrix} \quad \text{соответственно.}$$

Входная согласующая цепь АГ может быть выполнена в виде П-звена ФНЧ и рассчитывается с учетом необходимости согласования емкости выходного встречно-штыревого преобразователя линии задержки на ПАВ и входной емкости САП, подавления высших гармоник в цепи ПОС АГ и должна иметь достаточную добротность для осуществления модовой селекции при перестройке частоты АГ.

Введем проводимость Y_n в матрицу, описывающую АП АГ, тогда совокупный четырехполюсник описывается следующей матрицей

$$\|Y_{CT}\| = \begin{vmatrix} Y_{11}^{CT} & Y_{12}^{CT} \\ Y_{21}^{CT} & Y_{22}^{CT} + Y_n \end{vmatrix}.$$

Определим входную проводимость линии задержки на ПАВ:

$$Y_{вх\ ПАВ} = Y_{11\ ПАВ} - Y_{12\ ПАВ}^2 / (Y_{11\ ПАВ} + Y_n\ ПАВ),$$

где $Y_n\ ПАВ = Y_{22}^{CT} + Y_n$ – проводимость, подключаемая непосредственно к выходу цепи обратной связи АГ.

Обозначив матрицу Y -параметров, соответствующую каскадному соединению входной согласующей цепи АГ и линии задержки на ПАВ, через

$$\|Y_{OC}\| = \begin{vmatrix} Y_{11OC} & Y_{12OC} \\ Y_{12OC} & Y_{22OC} \end{vmatrix}, \quad \text{определяем ее элементы}$$

$$\begin{aligned} Y_{12OC} &= Y_{12\ ПАВ} / (a_{11П} + a_{12П} \cdot Y_{11\ ПАВ}), \\ Y_{11OC} &= (a_{21П} + a_{22П} \cdot Y_{11\ ПАВ}) / (a_{11П} + a_{12П} \cdot Y_{11\ ПАВ}), \\ Y_{22OC} &= (a_{11П} \cdot Y_{11\ ПАВ} + a_{12П} \cdot \Delta_{ПАВ}) / (a_{11П} + a_{12П} \cdot Y_{11\ ПАВ}), \end{aligned}$$

где $a_{11П} = -Y_{22П} / Y_{12П}$, $a_{12П} = -1 / Y_{12П}$, $a_{21П} = -\Delta_{П} / Y_{12П}$, $a_{22П} = -Y_{11П} / Y_{12П}$ – соответствующие A -параметры четырехполюсника, представляющего входную цепь,

$\Delta_{П}$, $\Delta_{ПАВ}$ – определители матриц $\|Y_{П}\|$ и $\|Y_{ПАВ}\|$.

Представим АГ с линией задержки на ПАВ на САП с КУ эквивалентной схемой (рисунок 5).

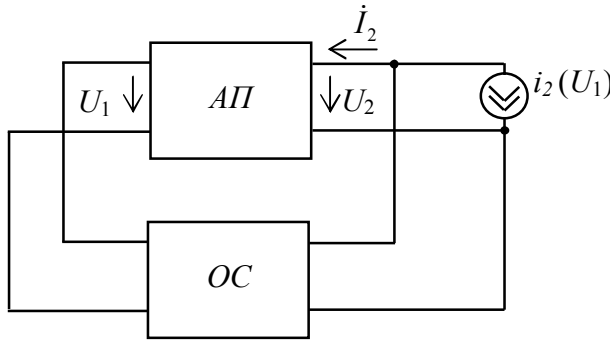


Рисунок 5 – Эквивалентная схема АГ с линией задержки на ПАВ на САП с КУ

Такой АГ описывается системой уравнений

$$\begin{cases} 0 = Y_{11}(p) \cdot U_1 + Y_{12}(p) \cdot U_2, \\ -i_2(U_1) = Y_{21}(p) \cdot U_1 + Y_{22}(p) \cdot U_2, \end{cases} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{где } Y_{11}(p) &= Y_{11}^{CT}(p) + Y_{11OC}(p), \\ Y_{12}(p) &= Y_{12OC}(p), \\ Y_{21}(p) &= Y_{21}^{CT}(p) + Y_{12OC}(p), \\ Y_{22}(p) &= Y_{22}^{CT}(p) + Y_n + Y_{22OC}(p), \\ p &= d/dt = j \cdot \omega, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

а его характеристическое уравнение АГ записывается следующим образом:

$$Y_{11}(j \cdot \omega) \cdot Y_{22}(j \cdot \omega) - Y_{12}(j \cdot \omega) \cdot Y_{21}(j \cdot \omega) = 0. \quad (6)$$

Допустив, что потери в линейной части АГ полностью компенсируются энергией, поставляемой САП, с помощью формул (5) перепишем (6) следующим образом.

$$Y_{11} \cdot Y_{22} - Y_{21}^{CT} \cdot Y_{12OC} - Y_{12OC}^2 = 0. \quad (7)$$

Запишем проводимость Y_{12OC} в виде

$$Y_{12OC} = \bar{h} \cdot Y_{12ПАВ} = \left| \bar{h} \right| \cdot \exp(j \cdot \varphi_h) \cdot Y_{12ПАВ},$$

где $\bar{h} = h_a + j \cdot h_p = -Y_{12П} / (Y_{22П} + Y_{11ПAB})$ - комплексный коэффициент пропорциональности между проводимостями $Y_{12ПAB}$ и Y_{12OC} .

После введения переменных $\operatorname{Re}[Y_{11} \cdot Y_{22}] = A$, $\operatorname{Im}[Y_{11} \cdot Y_{22}] = D$, $|Y_{12ПAB}| = M$, $|Y_{21}^{CT}| = S^{CT}$, $\omega \cdot T - \psi_0 = \psi$, $\arg(Y_{21}^{CT}) = \varphi_{CT}$ выражение (6) примет вид

$$A + j \cdot D = S^{CT} \cdot e^{j \cdot \varphi_{CT}} \cdot \bar{h} \cdot M \cdot e^{-j \cdot \psi} + \bar{h}^2 \cdot M^2 \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \psi}. \quad (8)$$

Поделив уравнение (8) на $e^{-j \cdot \psi}$ и перейдя к тригонометрической форме записи комплексных чисел, получим систему уравнений, позволяющую определить собственные частоты АГ ω_k и значение крутизны САП с КУ S_k , при которой потери в линейной части АГ с запаздывающей обратной связью полностью компенсируются внесением энергии САП:

$$\begin{cases} \cos \psi_k = S_k \cdot M \cdot \frac{[A + M^2 \cdot (h_a^2 + h_p^2)] \cdot (h_a \cdot \cos \varphi_{CT} - h_p \cdot \sin \varphi_{CT}) + (D + 2 \cdot M^2 \cdot h_a \cdot h_p) \cdot (h_a \cdot \sin \varphi_{CT} + h_p \cdot \cos \varphi_{CT})}{A^2 + D^2 - M^4 \cdot (h_a^2 + h_p^2)^2}, \\ \sin \psi_k = S_k \cdot M \cdot \frac{[A - M^2 \cdot (h_a^2 - h_p^2)] \cdot (h_a \cdot \sin \varphi_{CT} + h_p \cdot \cos \varphi_{CT}) - (D - 2 \cdot M^2 \cdot h_a \cdot h_p) \cdot (h_a \cdot \cos \varphi_{CT} - h_p \cdot \sin \varphi_{CT})}{A^2 + D^2 - M^4 \cdot (h_a^2 + h_p^2)^2}, \end{cases} \quad (9)$$

где $\psi_k = \omega_k \cdot T - \psi_0$.

Поделив (10) на (9) и разрешив полученное уравнение относительно ω_k , получим:

$$\omega_k = \frac{1}{T} \cdot \operatorname{arctg} \frac{[A - M^2 \cdot (h_a^2 - h_p^2)] \cdot (h_a \cdot \operatorname{tg} \varphi_{CT} + h_p) - (D - 2 \cdot M^2 \cdot h_a \cdot h_p) \cdot (h_a - h_p \cdot \operatorname{tg} \varphi_{CT})}{[A + M^2 \cdot (h_a^2 - h_p^2)] \cdot (h_a + h_p \cdot \operatorname{tg} \varphi_{CT}) + (D + 2 \cdot M^2 \cdot h_a \cdot h_p) \cdot (h_a \cdot \operatorname{tg} \varphi_{CT} + h_p)} - \frac{\psi_0}{T}.$$

Возведя в квадрат обе части уравнений (9) и (10), сложив их и разрешив полученное при этом уравнение относительно S_k , получим:

$$S_k = \frac{A^2 + D^2 - M^4 \cdot (h_a^2 + h_p^2)^2}{M \cdot \sqrt{(A^2 + D^2) \cdot (h_a^2 + h_p^2) + M^4 \cdot (h_a^2 + h_p^2)^3 + 2 \cdot M^2 \cdot (h_a^2 + h_p^2)^2 \cdot (A \cdot \cos 2 \cdot \varphi_{CT} + D \cdot \sin 2 \cdot \varphi_{CT})}}. \quad (11)$$

Уравнение (11) можно переписать в следующем виде

$$S_k = \frac{\sqrt{[(G_{11}^{CT} + G_{11OC})^2 + (B_{11}^{CT} + B_{11OC})^2] \cdot [(G_{22}^{CT} + G_h + G_{22OC})^2 + B_{22OC}^2]}}{M \cdot \sqrt{h_a^2 + h_p^2}}.$$

При условии слабого прохождения сигнала, имеющего вид $|Y_{11} \cdot Y_{22}| \gg M^2 \cdot (h_a^2 + h_p^2)$, характеристическое уравнение (7) можно переписать в более простом виде:

$$Y_{11} \cdot Y_{22} - Y_{21}^{CT} \cdot Y_{12OC} = 0, \quad (12)$$

или

$$|Y_{11}| \cdot |Y_{22}| \cdot \exp[j \cdot (\varphi_1 + \varphi_2)] - S^{CT} \cdot \exp(j \cdot \varphi_{CT}) \cdot \left| \bar{h} \right| \cdot \exp(j \cdot \varphi_h) \cdot M \cdot \exp[-j \cdot (\omega \cdot T - \psi_0)] = 0,$$

где $\varphi_1 = \arg Y_{11}$, $\varphi_2 = \arg Y_{22}$ - фазовые углы на входе и выходе АГ соответственно;

φ_h - аргумент множителя \bar{h} .

Уравнение (12) распадается на уравнение баланса амплитуд

$$S^{CT} = |Y_{11}| \cdot |Y_{22}| / |Y_{12OC}|$$

и уравнение баланса фаз

$$\varphi_1 + \varphi_2 = \varphi_{CT} + \varphi_{12OC}, \quad (13)$$

где $\varphi_{12OC} = \varphi_h + \psi_0 - \omega \cdot T$ - фазовый сдвиг, вносимый цепью обратной связи АГ.

Перепишем уравнение (13) следующим образом:

$$\varphi_1 + \varphi_2 = \varphi_{CT} + \varphi_h + \psi_0 - \omega \cdot T, \quad (14)$$

Собственные частоты АГ определим из (14):

$$\omega_k \cdot T = \varphi_{CT} - \varphi_1 - \varphi_2 + \varphi_h + \psi_0 + 2 \cdot k \cdot \pi, \quad (15)$$

где $k = 1, 2, 3 \dots$.

Из анализа уравнения (15) можно сделать вывод, что при достаточно большом времени задержки T линии задержки на ПАВ слагаемыми φ_{CT} , φ_1 , φ_2 , φ_h , ψ_0 можно пренебречь.

Тогда выражение (15) для АГ с линией задержки в цепи ПОС на САП с КУ значительно упрощается: $\omega_k \cdot T = 2 \cdot k \cdot \pi$ и собственные частоты можно найти по следующей формуле

$$f_k = T^{-1} \cdot k.$$

Таким образом, баланс фаз одновременно выполняется для целого ряда частот, образующих эквидистантный гребенчатый спектр с интервалом $\delta f = T^{-1}$. Из данного выражения видно, что чем больше время задержки T , тем больше мод возможных колебаний помещается в полосу пропускания линии задержки и тем уже интервал между ними.

С использованием уравнения (7) определены энергетические соотношения в цепях мощного АГ с линией задержки на ПАВ на САП с КУ в стационарном режиме.

Показано, что использование САП с КУ в качестве АП мощных стабильных, перестраиваемых по частоте АГ с запаздывающей обратной связью, выполненных по схеме, представленной на рисунке 6, приводит к увеличению в 1,45 раза полосы их перестройки, а также повышению температурной стабильности частоты генерируемых колебаний. Указанные свойства объясняются следующим образом. Пьезоэлектрические свойства ниобата лития, обычно используемого в качестве материала подложки мощных АГ на одиночном транзисторе, сильно зависят от температуры. Поднять температурную стабильность АГ с линией задержки на ПАВ можно, перейдя на применение кварцевой подложки, температурный коэффициент задержки которой имеет на порядок меньшее значение. При этом применение кварца требует при том же значении выходной мощности существенного повышения усиления от активного прибора АГ для компенсации потерь на преобразование электрической энергии в акустическую и обратно, что затруднительно получить от одиночного транзистора. Более того, при повышении коэффициента усиления АП до максимального значения неизбежно возникают проблемы с устойчивостью такого каскада. При перестройке по полосе генерируемых частот коэффициент устойчивости такого АП на границах рабочей полосы частот может принимать значения, при которых возможно возникновение паразитной генерации. Указанный эффект существенно ограничивает возможности перестройки частоты генерации АГ, выполненных на одиночных транзисторах.

Использование САП в качестве АП мощных АГ позволяет применять в АГ стабилизирующие элементы с кварцевой подложкой. Однако возможность применения САП, разработанных для одночастотных АГ, в перестраиваемых в пределах полосы пропускания стабилизирующего частоту элемента АГ, ограничивает тот факт, что цепь коррекции САП вносит собственный фазовый сдвиг, вызывающий расфазировку выходных токов транзисторов структуры при работе в полосе рабочих частот.

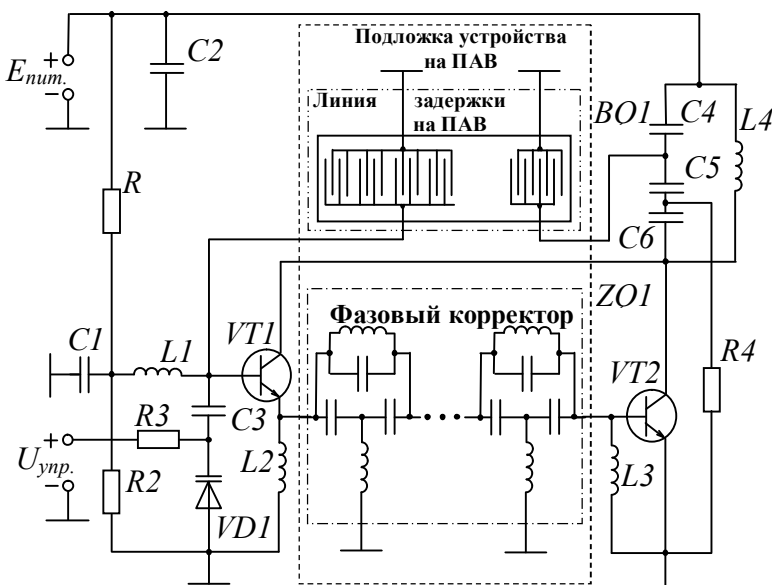


Рисунок 6 – Мощный перестраиваемый по частоте АГ на САП с КУ

Расширение полосы перестройки частоты АГ на САП с КУ до значения, определяемого результирующей полосой пропускания его колебательных цепей, обуславливается компенсацией фазового сдвига между первыми гармониками коллекторных токов транзисторов $VT1$, $VT2$ цепью коррекции (например, фазовым корректором) во всей полосе рабочих частот АГ. Применение САП с КУ в качестве активного прибора АГ с линией задержки на ПАВ позволяет дополнительно (к повышению стабильности из-за применения в качестве

материала подложки линии задержки на ПАВ кварца) повысить стабильность частоты генерируемых колебаний вследствие использования комбинации цепи коррекции САП с КУ и двух параллельных контуров (высокодобротного перестраиваемого на входе АП АГ и низкодобротного нагрузочного, эквивалентами которых могут являться П-звенья ФНЧ). Такая комбинация колебательных систем АГ реализует достаточное постоянство коэффициента устойчивости активного прибора АГ во всей полосе перестройки, так как взаимно компенсируются влияния приведенных к электродам АП иммитансов перестраиваемого и нагрузочного контуров АГ входным и выходным, соответственно, иммитансами цепи коррекции. Это обстоятельство исключает необходимость принудительно снижать коэффициент усиления мощности САП (известный пассивный способ повышения устойчивости). Высокое значение коэффициента усиления мощности активного прибора АГ, сохраняемое при перестройке частоты генерации при фиксированном значении уровня выходной мощности АГ обуславливает меньшее значение высокочастотной мощности, отбираемой в цепь ПОС (то есть, проходящей через линию задержки на ПАВ) и поступающей для возбуждения активного прибора АГ. А именно рассеивание проходящей через линию задержки на ПАВ мощности определяет температурный режим ее работы. Следовательно, чем меньше мощность в цепи ПОС АГ, тем выше температурная стабильность частоты колебаний, особенно для мощных автогенераторных каскадов.

В четвертой главе работы представлены результаты экспериментальных исследований САП с КУ и АГ на их основе. Моделирование САП с КУ, проведенное в среде *Micro-Cap*, показало, что выходные токи транзисторов складываются в нагрузку синфазно, вследствие чего достигается максимальная выходная мощность.

Проведено моделирование в среде *Micro-Cap* АГ с запаздывающей обратной связью на САП с КУ. Форма напряжения и тока в нагрузке такого АГ при его работе в полосе рабочих частот, при изменении сопротивления нагрузки от 30 до 75 Ом и изменении напряжения питания на $\pm 10\%$ является синусоидальной. Относительная полоса рабочих частот равна 0,275. Выходная мощность при увеличении сопротивления нагрузки до 75 Ом падает на 14 % от номинального значения; при использовании нагрузки, равной 30 Ом, выходная мощность практически не изменяется. Значение выходной мощности АГ при изменении напряжения питания на $\pm 10\%$ от номинального значения, лежит в пределах от 0,86 до 1,23 от значения мощности при номинальном напряжении питания.

Сравнение полученных в результате эксперимента значений энергетических параметров САП с КУ и автогенератора на нем с расчетными свидетельствует о пригодности теоретических предположений и методик проектирования, сделанных в предыдущих главах данной работы.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы, заключающиеся в следующем.

1. Разработана методика проектирования нелинейных ТРУМ с низкодобротными ЦС, позволяющая повысить коэффициент усиления по мощности в полосе рабочих частот проектируемых усилителей на 10...30 %.

2. Выявлены и исследованы особенности работы в пределах рабочей полосы частот ТРУМ на частотах ОВЧ диапазона в режимах, характерных для мощных АГ.

3. Исследованы частотные свойства каскадов с разделенной нагрузкой, а также САП с КУ в целом.

4. Предложен подход к построению схем САП, позволяющий разрабатывать усилители с уменьшенным в 3...16 раз в зависимости от конфигурации ЦС диапазоном изменения коэффициента устойчивости в пределах рабочей полосы частот.

5. Разработаны мощные стабильные, перестраиваемые по частоте в пределах полосы пропускания линии задержки на ПАВ однокаскадные АГ, выполненные на САП с КУ, обладающие повышенной относительной температурной стабильностью и расширенной до 45 % полосой перестройки частоты выходных колебаний.

6. Разработана и экспериментально подтверждена методика инженерно-

технического расчета мощных стабильных, перестраиваемых по частоте АГ с САП с КУ в качестве активного прибора.

7. Рассмотрены амплитудные и частотные соотношения в цепях мощных стабильных, перестраиваемых по частоте АГ, выполненных на САП с КУ, с запаздывающей обратной связью на линиях задержки на ПАВ.

8. Показано, что использование САП с КУ в качестве активных приборов мощных стабильных, перестраиваемых по частоте АГ с запаздывающей обратной связью, приводит к расширению их полосы перестройки в 1,45 раза, а также снижению относительной температурной нестабильности частоты генерируемых колебаний.

9. Экспериментально подтверждена работоспособность предложенных методик расчета и схемотехнических решений.

Основные положения диссертации опубликованы в работах

1. Баранов А.А., Лищишин В.П. Анализ каскада с разделенной нагрузкой в нелинейном режиме / Научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов, посвященная 100-летию со дня рождения М.С. Неймана. 17-18 марта 2005 г. – Москва: Тезисы докладов. – М.: Изд-во МАИ, 2005. – 43 с., с.29-30;

2. Баранов А.А., Богданов А.С., Лищишин В.П. Диапазонные свойства генераторных каскадов на сложном активном приборе типа составной транзистор / Научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов, посвященная 100-летию со дня рождения М.С. Неймана. 17-18 марта 2005 г. – Москва: Тезисы докладов. – М.: Изд-во МАИ, 2005. – 43 с., с. 30-32;

3. Богданов А.С., Лищишин В.П. Фазовые соотношения токов в цепях сложного активного прибора. Сети и системы связи: Материалы Всероссийского научно-практического семинара. Рязань: Рязанское высшее военное командное училище связи, 2005. – 405 с., с. 298-303;

4. Богданов А.С., Лищишин В.П. Частотные свойства резонансного усилителя мощности метрового диапазона радиоволн / Сборник рефератов НИОКР ВИМИ, серия РТ, выпуск 2 № Д08988, 2006;

5. Богданов А.С., Лищишин В.П., Волков В.С. Стабилизирующие устройства на ПАВ для автогенераторных устройств бортовой аппаратуры / 5-я международная конференция «Авиация и космонавтика - 2006». 23-26 октября 2006 г. – Москва: Тезисы докладов. – М.: Изд-во МАИ, 2006. – 388 с., с. 94-95;

6. Лищишин В.П., Васильев Е.В. Мощные стабильные автогенераторы для радиоэлектронных систем / Материалы межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Системы управления и передачи информации». 15 мая 2007 г.- Балтийский гос. техн. университет. – СПб. 2007г. – 104 с., с. 68 - 69;

7. Лищишин В.П., Богданов А.С. Частотные свойства мощного резонансного усилителя с низкодобротными колебательными системами / Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова / РНТО РЭС им. А. С. Попова, Ин-т радиотехники и электроники РАН, Рос. секция IEEE. – М., 2007.- 204 с., с. 81-85.

8. Богданов А.С., Лищишин В.П. Частотные свойства резонансного усилительного каскада с разделенной нагрузкой / Научно-технический журнал «Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета», Выпуск 23, 2008. – с. 56 - 62.

9. Лищишин В.П., Богданов А.С. Методика частотного анализа резонансного усилителя мощности ОВЧ-диапазона. Сборник научных трудов «Системы управления и передачи информации» / Балтийский гос. техн. университет. – СПб. 2008г. – 136 с., с. 20 - 27;

10. Лищишин В. П. Резонансный усилитель мощности с повышенной равномерностью коэффициента устойчивости в пределах полосы пропускания / Материалы межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Системы управления и передачи информации». 19 мая 2009 г.- Балтийский гос. техн. университет. – СПб. 2009г. – 56 с., с. 47 - 48;

11. Патент РФ №2394356 на изобретение «Автогенератор» / В.П. Лицишин, А.С. Богданов. Заявка 2009105100. Опубл. 10.07.2010г., Бюл. №19;

12. Лицишин В.П. Мощный перестраиваемый по частоте автогенератор с линией задержки на поверхностных акустических волнах в цепи положительной обратной связи. Методы и устройства формирования и обработки сигналов в информационных системах: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. Ю.Н. Паршина. – Рязань: РГРТУ, 2013. – 134 с., с. 68 – 73;

13. Богданов А.С., Лицишин В.П. Транзисторный автогенератор на составном активном приборе с линией задержки на ПАВ / Научно-технический журнал «Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета», Выпуск 46, 2013. – с.48- 53.

Лицишин Виктор Петрович

**Методика проектирования мощных стабильных,
перестраиваемых по частоте транзисторных каскадов
высокочастотных автогенераторных устройств**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 01.11.2013г.
Формат бумаги 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Ус. печ. л. 1,0.
Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 291.
ООО «Полиграф».
390025, Рязань, ул. Нахимова, 13.