

**ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ
ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ**

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ԱԶՈՅԱՆ ՄԻՔԱՅԵԼ ՍԱՐԳՍԻ

**ԳԵՐԲԱՐԶԻ ՀԱՃԱԽՈՒԹՅԱՆ ԱԶԴԱՆՇԱՆՆԵՐԻ ԶԵՎԱՓՈԽԻՉ ԵՎ
ՀԱՂՈՐԴԻՉ ՍԱՐՔԵՐԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ԵՎ ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

Ե.12.03 - « Հեռահաղորդակցական ցանցեր, սարքավորումներ և համակարգեր»
մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական
աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՄԵՂՍԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2016

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

АЗОЯН МИКАЕЛ САРКИСОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРЕОБРАЗУЮЩИХ И
ПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ СИГНАЛОВ НА СВЕРХВЫСОКИХ
ЧАСТОТАХ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 05.12.03- “ Телекоммуникационные сети, приборы и системы”

ЕРЕВАН 2016

Ատենախոսությունը անթեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային պրոֆեսորական համալսարանում

Գիտական դեկանը՝ տ.գ.դ. Վ. Ե. Առուստամյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ տ.գ.դ. Վ.Գ. Ավետիսյան

Ֆ.-մ.գ.թ. Հ.Վ.
Բաղդասարյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ Երևանի Կապի
միջոցներին ԳՀԻ

Ատենախոսությունը պաշտպանությունը տեղի կունենա 2016թ. հունիսի 1-ին ժամը 14⁰⁰, ՀԱՊՀ-ում գործող «Կառավարման, ավտոմատացման և էլեկտրոնիկայի» 032 Մասնագիտական խորհրդի նիստում (հասցեն՝ 0009, Երևան, Տերյան փ., 105, 17 մասնաշենք): Ատենախոսությունը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ-ի գրադարանում: Սեղմագիրն առաքված է 2016թ. մայիսի 31-ին:

032 Մասնագիտական խորհրդի
Գիտական քարտուղար, տ.գ.դ.՝

Ա.Գ.
Ավետիսյան

Тема диссертации утверждена в национальном политехническом университете армении

Научный руководитель: д.т.н. В.Е. Арустамян

Официальные оппоненты: д.т.н. В.Г. Аветисян
к.ф.-м.н. О.В. Багдасарян

Ведущая организация: Ереванский НИИ средств связи

Защита диссертации состоится 1-го июля 2016г. в 14⁰⁰ ч. на заседании Специализированного совета 032 - "Управления, автоматизации и электроники", действующего при Национальном политехническом университете Армении - НПУА (адрес: 0009, г. Ереван, ул. Теряна, 105, корпус 17).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.

Автореферат разослан 31-го мая 2016г.

Ученый секретарь

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в связи с развитием телекоммуникации появилась потребность в создании надежных и малогабаритных устройств сверхвысоких частот (СВЧ) с широкими функциональными возможностями. Исходя из этого, разработка и исследование новых, а также усовершенствование уже известных СВЧ устройств с целью применения их в таких областях, как космическая, спутниковая и сотовая связь, радиовещание, телевидение, радиолокация, телеметрия, измерительная техника, беспроводные системы передачи данных и др., представляют собой актуальную проблему.

Особенностью современного этапа развития СВЧ устройств является все более широкое использование полупроводниковых приборов на основе р-п переходов. Помимо улучшения основных технических параметров СВЧ устройств, таких как точность и дальность действия, пропускная и разрешающая способности, применение полупроводниковых приборов позволяет кардинально снизить массу и габариты, повысить надежность и КПД, уменьшить стоимость при серийном производстве и т.д.

Процесс эффективной разработки новых и улучшенных СВЧ устройств и их функциональных блоков должен быть комплексным, начиная от исследований, расчетов и проектирования и кончая изготовлением опытных образцов. На каждом этапе этого процесса необходимы поиск и выбор оптимальных вариантов схмотехнических, расчетных и аппаратурных решений. Этим вопросам посвящены многочисленные научные работы, результаты которых упрощают процесс анализа и расчета, увеличивают надежность и эффективность СВЧ устройств. Тем не менее, в настоящее время имеется острая потребность в несложных математических моделях и инженерных методиках расчета СВЧ устройств, разработке и реализации новых схмотехнических и конструкторских решений. Сказанное особенно относится к преобразующим и передающим СВЧ устройствам на полупроводниковых приборах с произвольными вольт-амперной и вольт-кулоновой характеристиками (соответственно ВАХ и ВКХ). Этим и обусловлена необходимость проведения соответствующих исследований, что и подтверждает актуальность данной диссертационной работы.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является разработка инженерных методов расчета, проектирование и реализация преобразующих и передающих устройств сигналов СВЧ на полупроводниковом р-п переходе с произвольными ВАХ и ВКХ нелинейного элемента.

Для достижения намеченной цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

- исследование и комплексный анализ работы нелинейного элемента при воздействии многочастотного сигнала на $p-n$ переход с произвольными ВАХ и ВКХ;
- вывод основных энергетических соотношений для преобразующих и передающих устройств сигналов СВЧ;
- параметрическая оптимизация амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) транзисторных параметрических умножителей и делителей частоты (соответственно ТПУЧ и ТПДЧ);
- разработка и экспериментальное исследование малогабаритных преобразующих и передающих устройств сигналов СВЧ;
- реализация СВЧ информационного элемента с частотно-модулированным выходным сигналом.

Методы исследования. Вывод основных соотношений для токов и напряжений сигналов устройств СВЧ проводился классическим методом с использованием теоретических основ анализа нелинейных электрических цепей. Исследование полупроводниковых умножителей и делителей частоты базировалось на представлении нелинейных зависимостей емкости и проводимости диода в виде конечных рядов по степеням напряжения. При изучении устойчивости решений, а также режимов установления колебаний использовался метод медленно меняющихся амплитуд.

Предложена и использована упрощенная методика расчета СВЧ устройств на основе решения нелинейного дифференциального уравнения с переменными коэффициентами l -го порядка. Для этого достаточно графически найти производные от ВАХ и ВКХ в рабочей точке. При этом ВКХ и ВАХ нелинейного элемента могут быть определены как произвольными аппроксимирующими функциями, так и экспериментальными графиками. Предложенная методика существенно сокращает время схемного расчета СВЧ устройств, позволяет легко определить полный спектр тока.

Научная новизна. В процессе проведения работ получены результаты, отличающиеся новизной:

1. Разработана методика анализа и расчета нелинейных радиотехнических схем на полупроводниковом $p-n$ переходе с произвольными ВАХ и ВКХ.
2. Исследованы режимы работы ТПУЧ и ТПДЧ, определены условия генерации и возбуждения субгармонических колебаний.
3. Определена и исследована АЧХ по параметрам $//XYZ//$, где X - относительная расстройка контура, Y - амплитуда выходного сигнала, Z - амплитуда сигнала накачки.
4. Разработан и реализован СВЧ информационный элемент – датчик давления с частотно-модулированным выходным сигналом для телекоммуникационных средств связи.

Достоверность полученных результатов. Достоверность основных положений и выводов подтверждена расчетом тестовых примеров и сравнением с результатами, полученными другими методами, а также экспериментальными испытаниями макетных и созданных СВЧ устройств.

Теоретическая и практическая ценность работы. Результаты исследований и предложенные технические решения могут способствовать проектированию и изготовлению преобразующих и передающих устройств СВЧ сигналов, которые востребованы в современных телекоммуникационных системах. Предложенная расчетная методика позволяет оптимально реализовать СВЧ преобразователи на любом полупроводниковом приборе с р–п переходом.

Даны практические рекомендации по реализации миниатюрных умножителей и делителей на транзисторах, автогенераторов гармоник на заданную частоту, а также СВЧ информационного элемента с частотно-модулированным выходным сигналом. Разработанные на полосковых линиях транзисторные автогенераторы гармоник и параметрические умножители по своим эксплуатационным параметрам удовлетворяют техническим требованиям, предъявляемым к современным аналогичным устройствам.

Полученные результаты использованы в учебных курсах кафедры "Конструирование и производство радиоаппаратуры" НПУА.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Расчетные соотношения для проектирования преобразователей частоты на р–п переходе с произвольными ВАХ и ВКХ при многочастотном воздействии на нелинейный элемент (коллекторный переход).
2. Результаты теоретического анализа энергетических характеристик и условия устойчивости коллекторной цепи ТПДЧ.
3. Особенности АЧХ транзисторных преобразователей частоты в зависимости от напряжения накачки сигнала, параметров расстройки и добротности контура.
4. Обобщенное соотношение, описывающее АЧХ по введенным параметрам //XYZ//.
5. Результаты экспериментального исследования разработанных образцов параметрических умножителей, делителей частоты и генераторов гармоник на полосковых линиях.
6. Принципы конструирования и реализации СВЧ информационного элемента с частотным выходом (прецизионный датчик) для многопрофильного применения.

Апробация работы. Основные научные и практические результаты диссертации докладывались на:

- ежегодных научных конференциях НПУА (2012-2015 гг.);
- семинарах кафедры "Конструирование и производство радиоаппаратуры" НПУА (2013-2015 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано шесть научных работ и получен один патент на авторское свидетельство, список которых приводится в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов и результатов, списка литературы из 109 наименований. Общий объем диссертации составляет 126 страниц, включая 71 рисунок и 11 таблиц. Диссертация написана на русском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая ценность полученных результатов, а также основные положения, выносимые на защиту. Кратко изложено содержание основных разделов диссертации.

Первая глава состоит из трех разделов. В разделе 1.1 проведен краткий аналитический обзор литературы посвящённой методам расчета и параметрической оптимизации полупроводниковых преобразователей частоты. Отмечены наиболее существенные проблемы, с которыми приходится сталкиваться при их проектировании. Обоснована важность анализа нелинейных радиотехнических параметрических схем без задания конкретного вида характеристик полупроводникового прибора.

В разделе 1.2 проанализированы известные методы расчета преобразующих свойств контактов и р-п переходов при многочастотном воздействии с учетом комплексной нелинейной проводимости. Отмечается, что для анализа ряда параметрических устройств широко применяется метод И.В. Басика. Показано, что данный метод достаточно прост и в диапазоне малых и средних амплитуд переменных напряжений позволяет снизить погрешность определения основных параметров твердотельных устройств до практически любой требуемой величины путем учета большого количества производных от ВАХ и ВКХ. Предложена методика и обоснована возможность ее использования для расчета преобразователей частот на р-п переходе без задания конкретного вида их характеристик на основе решения нелинейного дифференциального уравнения с переменными коэффициентами l -го порядка. Указывается, что для этого требуется графическое определение определенных производных в рабочей точке ВАХ и ВКХ, причем эти характеристики могут быть построены как произвольными аппроксимирующими функциями, так и на основе экспериментальных измерений. Дается оценка точности расчета по этой методике.

В разделе 1.3 рассмотрен механизм преобразования частоты сигналов в параметрических умножителях и делителях при двухчастотном воздействии на контакт полупроводникового р-п перехода. Рассчитаны проводимости контуров частоты накачки и преобразованного сигнала, вносимые от нелинейного контакта:

- для контура сигнала накачки:

$$G_1 = -G_n^1 \sin n\varphi, C_1 = C_0^1 + \frac{1}{n\omega} G_n^1 \cos n\varphi, G_1^{1'} = G_0^{1'} + G_n^{1'} \cos n\varphi, n\omega C_1^{1'} = G_n^{1'} \sin n\varphi;$$

- для контура сигнала субгармоники:

$$G_n = G_{n-1}^n \sin n\varphi, C_n = C_1^n + \frac{1}{\omega} G_{n-1}^n \cos n\varphi, G_n' = G_1^{n'} + G_{n-1}^{n'} \cos n\varphi, \\ \omega C_n' = -G_{n-1}^{n'} \sin n\varphi.$$

В этих выражениях квазилинейные коэффициенты зависят от производных ВАХ и ВКХ и представлены в виде ряда $C_{0,1,n}^{1,1,n}$ и $G_{n,n-1}^{n,n}$. На их основе построены

эквивалентные схемы делителя частоты как для сигнала накачки, так и для сигнала субгармоники.

Во второй главе проанализированы энергетические характеристики ТПУЧ и ТПДЧ, определены условия генерации и возбуждения субгармонических колебаний, построены эквивалентные схемы.

В разделе 2.1 проведен подробный анализ ТПДЧ, эквивалентная схема которого показана на рис. 1. Здесь $L1$ и G_1 – параметры контура выходной частоты ω ; $G(u)$ и $C(u)$ – нелинейная емкость и проводимость полупроводникового р-п перехода. Полагаем, что на р-п переход воздействуют постоянное напряжение U_0 , напряжение накачки U_1 и его субгармоники U_n , а ток через диод есть сумма токов емкости и проводимости р-п перехода.

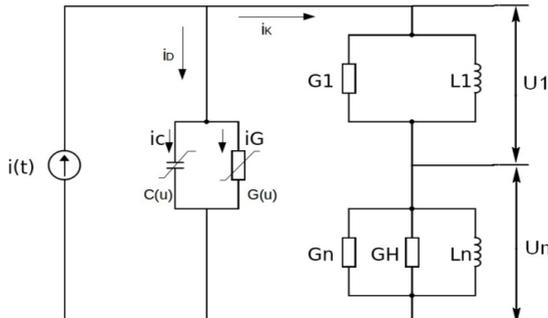


Рис.1. Эквивалентная схема ТПДЧ

Получено дифференциальное уравнение для полного тока через диод:

$$\frac{di_d}{dt} = [G(u) + U \frac{dG(u)}{dU}] \frac{du}{dt} + C(u) \frac{d^2U}{dt^2} + \frac{dC(u)}{dU} \left(\frac{dU}{dt}\right)^2.$$

Решение представленного уравнения находится в виде напряжения:

$$U = U_1 \cos(n\omega t + \varphi_1) + U_n \cos(\omega t + \varphi_n).$$

Полагая, что за период колебания производные фаз и амплитуд являются медленно меняющимися функциями по времени, получена система укороченных уравнений для амплитуд и фаз сигналов накачки и ее субгармоники:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\frac{1}{2n\omega_{10}C_1} [n\alpha l_3 \sin \varphi_1 - (G_{s1} + G_1 + \dot{G}_1)U_1]; \\ \dot{\varphi}_1 &= \frac{1}{2n\omega_{10}C_1 u_1} \{n\alpha l_3 \cos \varphi_1 - [\frac{1}{n\omega L_1} - n\omega(C_1 + \dot{C}_1)]U_1\}; \\ \dot{U}_n &= -\frac{1}{2\omega_{n0}C_n} [G_{sn} + G_n + \dot{G}_n + G_H]U_n; \\ \dot{\varphi}_n &= \frac{1}{2\omega_{n0}C_n} [\frac{1}{n\omega L_n} - \omega(C_n + \dot{C}_n)]. \end{aligned}$$

Полученные укороченные уравнения можно использовать как для анализа, так и для синтеза ТПУЧ и ТПДЧ при произвольных ВКХ и ВАХ коллекторного р-п перехода. С инженерной точки зрения, эти уравнения позволяют оптимально, без

сложного математического аппарата, легко рассчитать нужный компонент тока гармоники или субгармоники, для чего находится соответствующая производная от ВКХ или ВАХ в рабочей точке.

На основе укороченных уравнений построены эквивалентные электрические схемы контуров ТПДЧ для сигнала накачки и ее субгармоники.

В разделе 2.2 исследованы частотные и энергетические свойства коллекторной цепи ТПДЧ. Получено обобщенное выражение для АЧХ выходного контура с учетом расстройки контуров основного и выходного сигналов:

$$U_1 = naI_3 b_1 \times 1 / \{ [G_{\Sigma 1} + \lambda_n U_1^{\frac{-2(n-1)}{n-2}}]^{n-2} \sqrt{1 + Q_n^2 (\delta_n + \Delta_n - K_n U_1^2)^2} \} \times \sqrt{1 + Q_1^2 (\delta_1 + \Delta_1 - K_1 U_1^2 - K_2 U_1^{\frac{-2(n-1)}{n-2}})^2}.$$

Это выражение намного упрощается, если учесть, что расстройка в контуре субгармоники почти не влияет на АЧХ. В этом случае для АЧХ основного сигнала и добротности контура накачки соответственно получены следующие простые выражения:

$$U_1 = naI_3 b_1 \times 1 / [G_{\Sigma 1} + \lambda_n U_1^{\frac{-2(n-1)}{n-2}}] \sqrt{1 + Q_1^2 (\delta_1 + \Delta_1 - K_1 U_1^2)^2};$$

$$Q_1 = 1 / n\omega_0 L_1 (G_{s1} + Y_1 + a_1 X_1 + U_1^{\frac{-2(n-1)}{n-2}}).$$

АЧХ коллекторной цепи в зависимости от сигнала накачки и расстройки позволяет построить семейство характеристик выходного контура при фиксированных значениях сигнала накачки aI_3 . На рис. 2 приведено семейство АЧХ выходного контура, которое отличается от классических случаев асимметрией и наличием гистерезиса, что обусловлено нелинейной емкостью выходного контура.

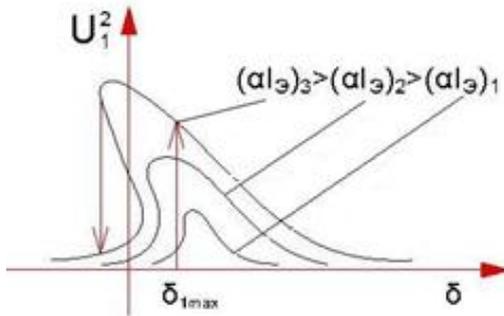


Рис. 2. Семейство АЧХ выходного контура ТПДЧ

Исследована устойчивость коллекторной цепи в зависимости от расстройки выходного контура. Определен предельно максимальный ток накачки, при котором отсутствует гистерезис.

С учетом расстройки контуров выходного и основного сигналов получено условие возбуждения субгармонических колебаний:

$$\frac{\alpha I_3}{U_1} \geq \frac{1}{2} [(G_{\Sigma 1} + B_{\Sigma 1}) \pm \sqrt{2G_{\Sigma 1}B_{\Sigma 1} - G_{\Sigma n}^2 - B_{\Sigma n}^2}].$$

На рис. 3 представлены рассчитанные области генерации и деления сигнала АЧХ выходного контура.

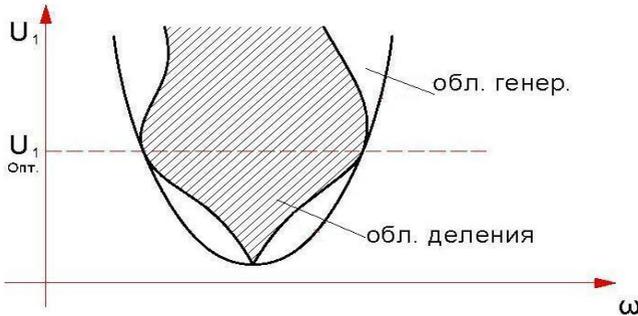


Рис. 3. АЧХ выходного контура

На основе результатов исследования энергетических характеристик ТПУЧ и ТПДЧ рекомендованы условия для запуска системы.

В третьей главе на основе предложенной методики расчета проведен анализ АЧХ полупроводниковых преобразователей частоты, получены и апробированы новые расчетные формулы по введенным //XYZ// параметрам.

В разделе 3.1 проанализирована АЧХ для частных случаев, когда $n = 2, 3, 4, \dots$. Для комплексных проводимостей нелинейных элементов схемы на частоте преобразованного сигнала получены следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{Cn} = & \left(\frac{\omega A_n}{2^{n-1}(n-1)!} U_1 U_n^{n-2} + \frac{\omega A_{n+2}}{2^{n+1}n!} U_1 U_n^n + \dots \right) \sin n\varphi + j \left[\omega \left(A_1 + \frac{A_3}{8} U_1^2 + \frac{A_5}{4} U_n^2 + \dots \right) + \right. \\ & \left. + \left(\frac{\omega A_n}{2^{n-1}(n-1)!} U_1 U_n^{n-2} + \frac{\omega A_{n+2}}{2^{n+1}n!} U_1 U_n^n + \dots \right) \cos n\varphi \right]; \\ \dot{Y}_{Gn} = & B_1 + \frac{B_3}{4} U_1^2 + \frac{B_5}{8} U_n^2 + \dots + \left(\frac{B_n}{2^{n-1}(n-1)!} U_1 U_n^{n-2} + \frac{B_{n+2}}{2^{n+1}n!} U_1 U_n^n + \dots \right) \cos n\varphi + \\ & + j \left(\frac{B_n}{2^{n-1}(n-1)!} U_1 U_n^{n-2} + \frac{B_{n+2}}{2^{n+1}n!} U_1 U_n^n + \dots \right) \sin n\varphi, \end{aligned}$$

где A_n и B_n - производные емкости и проводимости по напряжению, определяемые из ВКХ и ВАХ в рабочей точке $U = U_0$.

В разделе 3.2 выведено основное выражение для анализа АЧХ полупроводниковых преобразователей частоты, на коллекторный нелинейный р-п переход которого воздействует многочастотный сигнал:

$$U_1 = \frac{\alpha I_3}{[G_{S1} + \frac{\lambda_n U_1^{2n-2}}{1 + Q_n^2 (\delta_n - K_n U_1^2)^2}] \sqrt{1 + Q_1^2 (\delta_1 - K_1 U_1^2 - K_2 U_1^{2n-2})^2}}.$$

В данном выражении учтены затухание и расстройка контура гармоники через добротность контура основной частоты Q_1 .

На основе полученного выражения в разделе 3.3 проведен анализ коллекторной цепи ТПУЧ, содержащей нелинейные реактивности, где могут быть зоны неустойчивости стационарных неавтономных колебаний. Определено условие устойчивости АЧХ контура основной частоты, когда гистерезисные явления в контуре гармоники отсутствуют. В общем случае, когда $n > 2$ и принято, что $\lambda_n U_1^{2n-2} \ll G_{s1}$, условие устойчивости следующее:

$$(\alpha I_3)_{max}^2 \leq \frac{64G_{s1}}{3\sqrt{3} \omega A_3}.$$

В разделе 3.4 предложен метод расчета АЧХ умножителей и делителей СВЧ по следующим введенным параметрам //XYZ//:

$X = Q_n \delta_n$ – относительная расстройка контура выходного сигнала;

$Y = k_1 U_n^2$ – амплитуда выходного сигнала;

$Z = k_1 U_1^2$ – амплитуда сигнала накачки.

Получено следующее обобщенное уравнение:

$$Y^2 + \frac{k_4}{k_1} XY + \left(\frac{k_2^2}{k_1^2} Z + \frac{k_5}{k_1} \right) Y + k_8 X + k_9 (1 + X^2) + \frac{k_3^2}{k_1^2} Z^2 + \left(\frac{k_6}{k_1} X + \frac{k_7}{k_1} \right) Z - \frac{k_n^2 b_n^2}{k_1 k_1^{n-2}} Z Y^{n-2} - \frac{k_n b_n k_{n+2} b_{n+2}}{k_1 k_1^{n-1}} Z Y^{n-1} - \frac{k_{n+2}^2 b_{n+2}^2}{k_1 k_1^n} Z Y^n = 0.$$

Дана оценка точности расчета АЧХ по параметрам //XYZ// на основе решения нелинейного дифференциального уравнения с переменными коэффициентами n -го порядка. Практические инженерные расчеты проводились для частных случаев, когда $n = 2, 3, 4, \dots$. Показано, что при $n = 2, 3, 4$ обеспечивается удовлетворительная точность.

Детально проанализирована АЧХ в зависимости от расстройки контуров ТПДЧ. Установлено, что форма кривых АЧХ в зависимости от амплитуды сигнала накачки Z может быть в виде параболы, эллипса или гиперболы.

В разделе 3.5 предложенный метод апробирован для анализа АЧХ на трех тестовых примерах ТПДЧ с различными параметрами полупроводникового р-п перехода:

- I. Резкий р-п переход, $U_0 = 0B$, $Q = 30$.
- II. Плавный р-п переход, $U_0 = 0,4B$, $Q = 30$.
- III. Плавный р-п переход, $U_0 = 0B$, $Q = 30$.

Необходимые для расчета коэффициенты (k) были определены по производным известных ВАХ и ВКХ тестовых примеров в рабочей точке U_0 .

На рис. 4 представлены семейства АЧХ тестовых примеров при различных значениях амплитуды сигнала накачки Z .

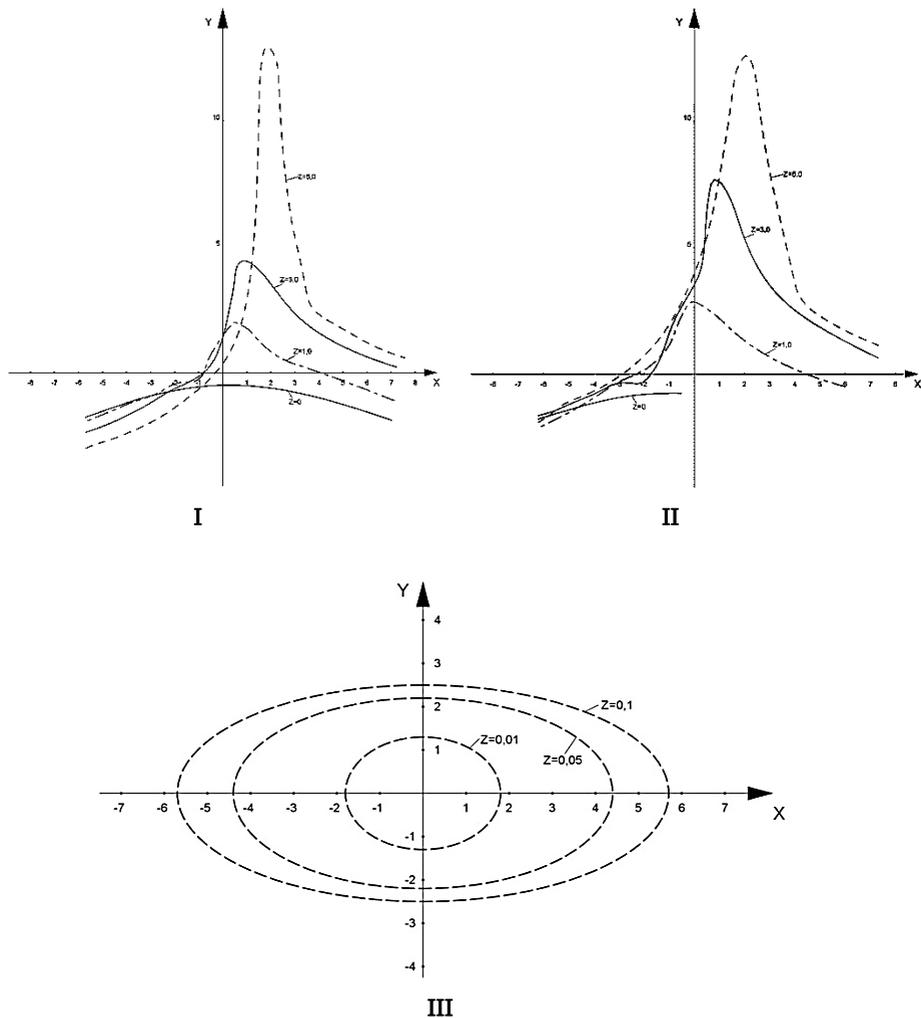


Рис. 4. Семейства АЧХ тестовых примеров I, II и III

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований макетов транзисторных умножителей и делителей СВЧ сигналов, разработанных с учетом теоретических рекомендаций.

В разделе 4.1 дано описание измерительной установки, основными узлами которой являются ответвитель, измеритель мощности, волномер, анализатор спектра и прецизионный источник питания.

В разделе 4.2 на специально изготовленном экспериментальном стенде исследованы частотные и энергетические характеристики коллекторной цепи умножителей СВЧ сигналов на транзисторах малой мощности типов ГТ-329Б, ГТ-330, КТ640А2 и др. Экспериментальные зависимости были сопоставлены с расчетными, полученными по предложенной нами методике (Глава 2). В частности, на рис. 5 представлены расчетные и экспериментальные нагрузочные характеристики удвоителя на транзисторе ГТ-329Б при различных значениях αI_s . Следует отметить удовлетворительное соответствие расчетных характеристик с результатами экспериментальных измерений.

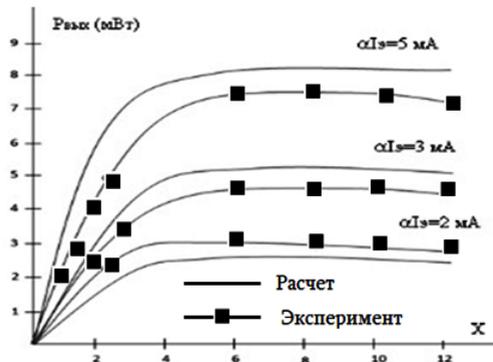


Рис. 5. Расчетные и экспериментальные нагрузочные характеристики удвоителя

В разделе 4.3 обсуждены вопросы реализации миниатюрных умножителей и делителей на транзисторах, представлены их эквивалентные схемы коллекторной цепи. В качестве критериев при выборе и разработке схемы, помимо частотных и энергетических характеристик, рассматривалась и возможность их реализации в монолитно-интегральной схеме.

Отдельно рассмотрены принципы построения автогенераторов гармоник на заданную частоту.

В разделе 4.4 разработаны и исследованы различные макеты миниатюрных полосковых автогенераторов гармоник и параметрических умножителей на транзисторах, в том числе с электронной перестройкой частоты.

В качестве примера на рис. 6 представлены схема и общий вид одного из макетов разработанных транзисторных автогенераторов гармоник. Устройство состоит из транзистора 1, к эмиттеру которого подсоединен дроссель 2 с емкостью 3. К базе транзистора присоединена блокировочная емкость 4. С резонатором 5 связаны резонаторы 6, образующие фильтр гармоники.

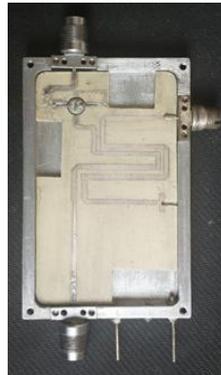
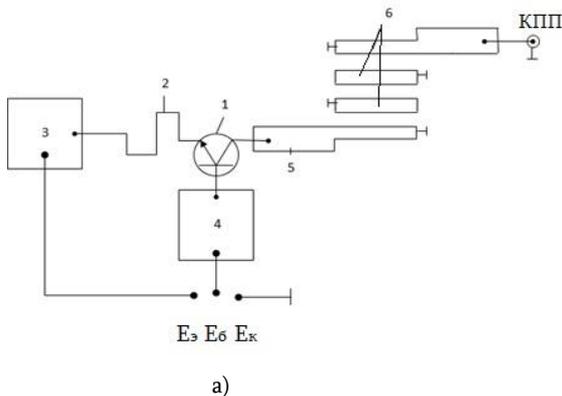


Рис. 6. Схема (а) и общий вид (б) одного из разработанных транзисторных автогенераторов гармоник

Результаты экспериментального исследования зависимостей выходной мощности $P_{\text{вых}}$ и частоты $f_{\text{вых}}$ от напряжения на коллекторе U_k при различных токах через эмиттерный переход транзистора I_3 для разработанного автогенератора гармоник приведены на рис. 7.

Исследования показали, что разработанные транзисторные автогенераторы гармоник и параметрические умножители по своим эксплуатационным параметрам удовлетворяют техническим требованиям, предъявляемым к современным аналогичным устройствам. В частности, разработанный параметрический умножитель на маломощных транзисторах целесообразно применять в качестве простых и миниатюрных гетеродинов приемных устройств дециметрового диапазона. Особенно следует отметить достаточно низкий уровень паразитных гармоник разработанного устройства – не более 20 дБ.

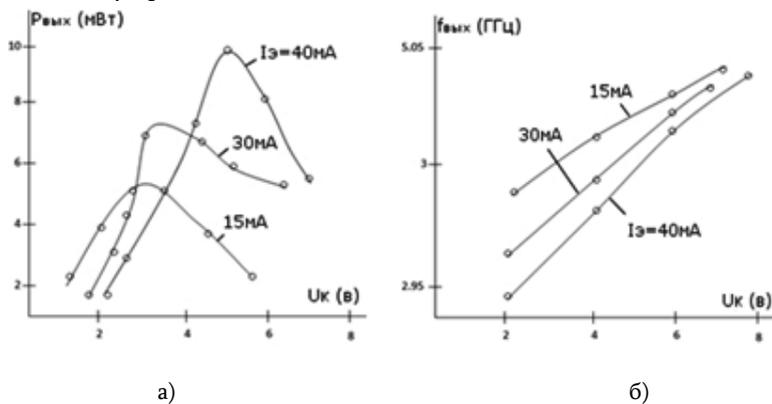


Рис. 7. Зависимости выходной мощности (а) и частоты (б) от напряжения разработанного автогенератора гармоник

В разделе 4.5 представлены результаты экспериментального исследования ТПДЧ на различных кремниевых транзисторах. Отличительной особенностью разработанных макетов является учет условий возбуждения, определенных на основе теоретического анализа и синтеза схем на нелинейном элементе. Указаны размеры, номиналы транзисторов и частотные характеристики экспериментальных образцов. Проведено сравнение расчетных и экспериментально полученных характеристик. Исследована возможность расширения диапазона рабочих частот. Рекомендовано предлагаемый ТПДЧ использовать в широкополосных синтезаторах частоты.

В пятой главе разработан и реализован СВЧ информационный элемент на основе датчика давления.

В разделе 5.1 обсуждаются требования, предъявляемые к СВЧ датчикам для применения на радиочастотных линиях. Описываются конструктивные особенности реализации СВЧ датчика давления с частотно-модулированным выходным сигналом на основе коаксиальных четвертьволновых резонаторов. Выбор такого резонатора обусловлен тем, что физическое давление в виде акустического или гидравлического воздействует непосредственно на рабочую поверхность чувствительной части датчика при комплексных условиях эксплуатации, поэтому рабочая поверхность датчика должна обеспечивать высокую стойкость и работоспособность.

В разделе 5.2 для реализации на практике СВЧ датчика проводится расчет транзисторного автогенератора коаксиальной конструкции.

На рис. 8 показан разрез конструкции СВЧ резонаторного датчика давления с частотно-модулированным выходным сигналом. Рабочий элемент образуется между кольцевой шапкой 1 цилиндрического стержня и центральной поверхностью в данной части корпуса 2, выполненной в виде гофрированной мембраны с жестким центром. За счет давления на мембрану меняется зазор d между стержнем и корпусом, то есть емкость резонатора и, следовательно, частота генератора.

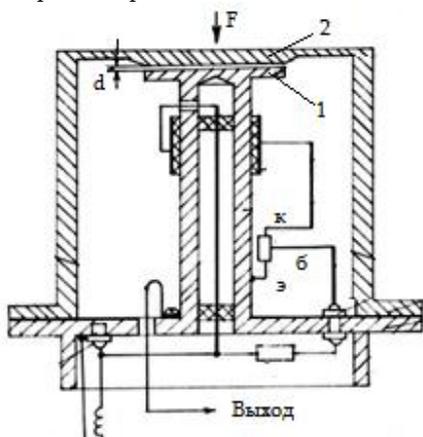


Рис. 8. Конструкция СВЧ датчика давления

Принципиальная электрическая схема информационного СВЧ датчика давления приведена на рис. 9. Коллектор транзистора VT через проволочный контур П1 соединяется с обкладкой блокирующего конденсатора питания. База этого транзистора через проволочный контур П2, проходной конденсатор С3, резистор R1 и блокировочный индуктивный элемент L0 соединяется с источником питания. Соответствующим расположением проволочных контуров связи с резонаторами П1 и П2 в цепи коллектора и базы образуются две петли, сдвигом или поворотом которых создается положительная обратная связь для обеспечения условия самовозбуждения автогенератора.

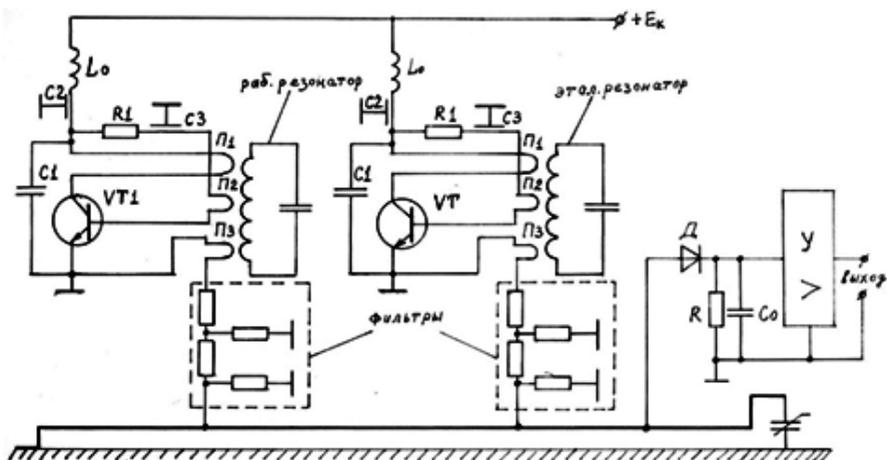


Рис. 9. Принципиальная электрическая схема информационного СВЧ датчика давления

С целью обеспечения термокомпенсации в схеме информационного СВЧ датчика были применены два одинаковых по конструкции СВЧ генератора: рабочий и эталонный. Рабочие частоты генераторов соответственно составили 575 и 580 МГц. С генераторов сигналы через фильтр поступают на частотный смеситель, на выходе которого выделяется сигнал с разностной частотой, детектируется, и после усиления регистр фиксирует информацию.

На рис. 10 приведена нагрузочная характеристика СВЧ информационного датчика давления, а именно, зависимость разностной частоты f от давления F . Видно, что в широком пределе давления данная зависимость имеет строго прямолинейный характер.

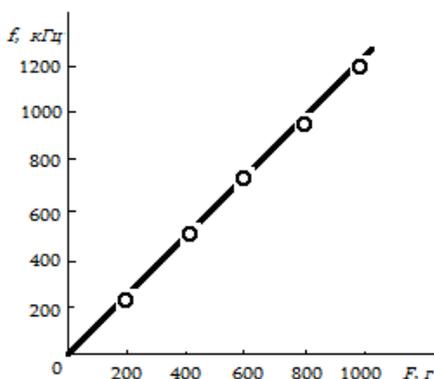


Рис. 10. Нагрузочная характеристика СВЧ информационного датчика давления

Разработанный на основе датчика давления СВЧ информационный элемент с частотным выходом можно применять как автономное передающее звено в телекоммуникационных устройствах. Кроме того, на его основе создан ряд треугольных сеток из сейсмодатчиков для организации долгосрочного контроля, определения направления очага и прогноза сейсмических колебаний от отдаленных участков через телекоммуникационную сеть.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Основной результат данной работы заключается в изложении научно обоснованных методов расчета и проектирования преобразующих и передающих устройств сигналов СВЧ на полупроводниковом р-п переходе с целью их параметрической оптимизации. Успешная реализация накопленного опыта на тестовых примерах и макетных устройствах свидетельствует о возможности более широкого использования предложенных идей в современных СВЧ схемах.

В частности:

1. Рассмотрены общие принципы проектирования полупроводниковых преобразователей частоты, сформулированы критерии анализа и синтеза СВЧ схем на нелинейном элементе. Обоснована важность анализа нелинейных радиотехнических параметрических схем без задания конкретного вида характеристик полупроводникового прибора [1,5].
2. Разработана методика расчета полупроводниковых умножителей и делителей частоты с произвольными ВАХ и ВКХ. Для этого в рабочей точке найдены определенные производные от ВАХ и ВКХ, причем эти характеристики могут быть построены как произвольными аппроксимирующими функциями, так и на

основе экспериментальных измерений. Дана оценка точности расчета по этой методике [1,2].

3. Проанализированы энергетические характеристики ТПУЧ и ТПДЧ и построены эквивалентные схемы. Исследованы особенности их АЧХ в зависимости от напряжения накачки сигнала, параметров расстройки и добротности контура. Получены уравнения для критического режима работы и для режима работы возникновения субгармонических колебаний. Определены области устойчивого возбуждения и преобразования сигнала [3,4].
4. Разработан метод расчета АЧХ умножителей и делителей СВЧ по введенным трем параметрам: X - относительная расстройка контура, Y - амплитуда выходного сигнала, Z - амплитуда сигнала накачки. Показано, что при $n=2, 3, 4$ обеспечивается удовлетворительная точность. Метод апробирован на тестовых примерах для ТПДЧ с различными параметрами полупроводникового р-п перехода [3].
5. Изготовлены и протестированы макеты транзисторных умножителей и делителей СВЧ, а также автогенератора гармоник для устройств телекоммуникации на полосковых линиях. Показано удовлетворительное соответствие расчетных нагрузочных характеристик с результатами экспериментальных измерений. Разработанные устройства отличаются низким уровнем паразитных гармоник по сравнению с известными прототипами [4,5].
6. Спроектирован и реализован СВЧ информационный элемент с частотным выходом (прецизионный датчик) для измерения давления в замкнутых и открытых системах летательных, космических, геофизических и прочих механических аппаратов [6,7].

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Азоян М.С., Азоян Т.М. Анализ многочастотного воздействия сигнала на комплексную нелинейную проводимость контакта // Вестник ГИУА (Политехник). Серия "Информационные технологии, электроника, радиотехника". - 2014. - Вып. 17, № 1. - С. 87-91.
2. Арустамян В.Е., Азоян Т.М., Азоян М.С. Анализ энергетических характеристик параметрического делителя сверхвысоких частот // Вестник ГИУА (Политехник). Серия "Информационные технологии, электроника, радиотехника". - 2014. - Вып. 17, № 2. - С. 95-99.
3. Азоян М.С. Анализ амплитудно-частотных характеристик полупроводникового параметрического делителя сверхвысоких частот // Известия НАН РА и НПУА. Серия Технические науки. - 2015. - Т. 68, № 2. - С. 213-220.

4. Азоян М.С. Вывод основных соотношений для полупроводникового параметрического делителя СВЧ // Вестник НПУА. “Информационные технологии, электроника, радиотехника”. - 2015.- № 1.- С. 91-97.
5. Азоян М.С., Арустамян В.Е., Айвазян М.Ц. Исследование устойчивости коллекторной цепи транзисторного параметрического делителя частоты// Известия НАН РА и НПУА. Серия Технические наук. - 2015.- Т. 68, № 4.- С. 465-471.
6. Азоян М.С., Азоян Т.М. СВЧ информационный элемент с частотным выходом // Вестник ГИУА. - 2005.- Т.1. - С. 324 -326.
7. А.с. SU 1362972 А1 Датчик давления, /В.Р. Варданын, К.А. Гулгазарян, М.С. Азоян, Э.Н. Григорян. – 1987.

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Աշխատանքի հիմնական արդյունքը գիտականորեն հիմնավորված գերբարձր հաճախային /ԳԲՀ/ ազդանշանի հաղորդիչ և ձևափոխիչ սարքերի նախագծումը և հաշվարկային մեթոդի մշակումն է կիսահաղորդչային p-n անցման վրա պարամետրական օպտիմալացման նպատակով: Ծավալված փորձի հաջող իրականացումը թեստային օրինակների և փորձնական նմուշների վրա վկայում է առաջարկված մտահղացումներն ու հնարավորություններն ավելի լայն օգտագործել ժամանակակից ԳԲՀ սխեմատեխնիկայում: Մասնավորապես՝ աշխատանքում ստացվել են հետևյալ արդյունքները:

1. Դիտարկված են կիսահաղորդչային հաճախության ձևափոխիչների նախագծման ընդհանուր սկզբունքները, ձևակերպված են ԳԲՀ սխեմաների վերլուծության և սինթեզի չափանիշները՝ կառուցված ոչ գծային տարրի վրա: Հիմնավորված է կամայական բնութագրերով ոչ գծային կիսահաղորդչային սարքի վրա պարամետրական սխեմաների վերլուծման անհրաժեշտությունը [1,5]:

2. Մշակված է հաճախության կիսահաղորդչային բազմապատկիչների և բաժանիչների հաշվարկման մեթոդ կամայական վոլտ-ամպերային (ՎԱ) և վոլտ-կուլոնային (ՎԿ) բնութագրերով, որի համար անհրաժեշտ է գտնել ՎԱ և ՎԿ բնութագրերից որոշակի ածանցյալներ աշխատանքային կետում, ընդ որում այդ բնութագրերը կարելի է մոտարկել ինչպես կամայական ֆունկցիայով, այնպես էլ

փորձնական չափումների հիման վրա: Տրված է տվյալ հաշվարկման մեթոդի ճշտության գնահատականը [1,2]:

3. Վերլուծված են հաճախության կիսահաղորդչային բազմապատկիչների և բաժանիչների էներգետիկ բնութագրերը և կառուցված են համարժեք էլեկտրական սխեմաները: Հետազոտված են ամպլիտուդա-հաճախային բնութագրերի (ԱՀԲ) առանձնահատկությունները՝ կախված մղման ազդանշանի լարումից, ռեզոնանսային կոնտուրի բարորակությունից և ապալարումից: Ստացված են հարաբերակցություններ աշխատանքի կրիտիկական և հաճախության բաժանման ռեժիմների համար: Որոշված են ազդանշանի գրգռման և ձևափոխման տիրույթները [3, 4]:

4. Մշակված է ԳԲՀ բազմապատկիչների և բաժանիչների ԱՀԲ հաշվարկման մեթոդ ըստ ընդունված երեք պարամետրերի. X- կոնտուրի հարաբերական ապալարման, Y- ելքային ազդանշանի ամպլիտուդի, Z- մղման ազդանշանի ամպլիտուդի: Մասնակի դեպքում, երբ $n=2,3,4$, ստացված է բավարար ճշտություն: Մեթոդը փոձարկված է թեստային օրինակներով տրանզիստորային բաժանիչի համար, կիսահաղորդչային p-n անցման տարբերակներով [3]:

5. Մշակված և թեստավորված են ԳԲՀ տրանզիստորային բազմապատկիչներ, բաժանիչներ, նաև հարմոնիկայի ավտոգեներատոր շերտային գծերի վրա հեռահաղորդակցական սարքերի համար: Ցույց է տրված փորձնական և հաշվարկային արդյունքների բավարար համընկումը: Մշակված սարքերը տարբերվում են նախորդներից ներքին խանգարումների ցածր մակարդակով [4,5]:

6. Նախագծված և իրագործված է ԳԲՀ ինֆորմացիոն տարր՝ ելքային ազդանշանի հաճախային մոդուլացմամբ, տիեզերական, ավիացիոն, գեոֆիզիկական և այլ մեխանիկական սարքերում ճնշման չափման և հեռահաղորդման համար [6,7]:

ULTRA-HIGH FREQUENCY RESEARCH AND DEVELOPMENT SIGNS OF
TRANSMITTING AND CONDUCTING DEVICES
SUMMARY

The main result of this work is to present science-based methods of calculation and design of transforming and transmitting microwave signals of devices on p-n semiconductor junction with the purpose of parametric optimization. Successful implementation of the lessons learned in the test cases and prototyping devices suggests the possibility of more widespread use of the proposed ideas in modern microwave circuits. In particular:

1. General principles for the design of semiconductor frequency converters formed the criteria for analysis and synthesis of microwave circuits on the non-linear element. It substantiates the importance of parametric analysis of nonlinear radio circuits without specifying a particular type of semiconductor device characteristics [1, 5].
2. The method of calculation of semiconductor multipliers and frequency dividers with arbitrary CVC and WSS. In order to do this, we will find the operating point derived will from certain CVC and WSS, and these characteristics can be constructed as arbitrary approximating functions, and on the basis of experimental measurements. The estimation accuracy of the calculation is given by this method [1, 2].
3. We analyzed the energy characteristics, of TPUCH TPDCH, and equivalent circuits are built. The features of the AFC, depending on the pump signal voltage mismatch parameters and circuit switching are analyzed. Equations for the critical mode and mode of occurrence of subharmonic oscillations are received. Sustainable excitation and signal conversion [3,4] are defined.
4. The method of calculation of the frequency response of the multipliers and dividers for microwave has been developed according to three parameters: X - relative detuning circuit, Y - the amplitude of the output signal, Z - the amplitude of the pump signal. It is shown that when $n = 2,3,4$ satisfactory accuracy is provided. The method was tested on the test cases for TPDCH with different parameters of semiconductor p-n junction [3].
5. Layout transistor multipliers and dividers of microwave, as well as a harmonic oscillator for telecommunication devices on strip line are manufactured and tested. Satisfactory agreement between the calculated load characteristics with the

experimental measurements are shown. The developed devices differ with their low parasitic harmonics compared to the known prototypes [4, 5].

6. An information element with the microwave frequency output (precision sensor) for measuring the pressure in the closed and open systems, aviation, aerospace, geophysical and other mechanical devices [6, 7] are designed and implemented.