

На правах рукописи

Вильмицкий Дмитрий Сергеевич

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ ШИРОКОПОЛОСНЫХ  
КЛЮЧЕВЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ И  
УМНОЖИТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ КЛАССА E

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, доцент  
**Девятков Геннадий Никифорович**

**Официальные оппоненты:** **Разинкин Владимир Павлович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет», профессор кафедры теоретических основ радиотехники

**Аубакиров Константин Якубович**, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия», доцент кафедры специальных устройств

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Защита состоится «3» декабря 2013 года в 16<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д212.173.08 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан «\_\_»\_\_\_\_\_ 2013 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.т.н., профессор



Васюков Василий Николаевич

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность исследования.** Основным направлением развития современных приемо-передающих систем военного и гражданского назначения является непрерывное усложнение задач, которые должны решаться средствами радиосвязи, радиолокации и навигации. Такое комплексное усложнение радиотехнических систем, включающее в себя генерацию сигнала, усиление, его обработку, а также решение задач управления и контроля, приводит ужесточению требований, предъявляемых к уровню преобразуемой мощности и ширине полосы рабочих частот при одновременном снижении веса, габаритов и повышении надежности аппаратуры.

При проектировании новых систем разработчики вынуждены находить решения, удовлетворяющие ряду противоречивых требований. С одной стороны для передачи качественного изображения и звука, в случае беспроводных систем передачи телекоммуникационных данных, необходимо увеличивать уровень излучаемой мощности и применять сложные виды сигналов, обеспечивающих высокую скорость передачи данных, а с другой снижать энергопотребление. В случае радиолокационных устройств, перспективными направлениями являются повышение разрешающей способности по дальности и скорости, что может быть достигнуто применением сложных видов модуляции, широкополосных зондирующих сигналов, повышением мощности передающих устройств. Все это приводит к повышению потребляемой мощности РЛС и к трудностям, связанным с обеспечением теплового режима АФАР, вызванными активными потерями. Таким образом, на первый план выходят задачи снижения энергопотребления и повышения КПД.

Решение проблемы повышения КПД позволит на порядки снизить вес элементов питания и энергетических установок (в том числе и источников вторичного электропитания), обеспечить тепловой режим элементов и, как следствие, существенно улучшить массогабаритные показатели и надежность радиоэлектронной аппаратуры.

Основным потребителем энергии в современных радиотехнических системах являются выходные каскады передатчиков, поэтому создание высокоэффективных усилителей и умножителей частоты является актуальной задачей.

Анализ публикаций посвященных вопросам проектирования усилительно-умножительных устройств с высоким КПД показывает, что наилучшими энергетическими показателями обладают на сегодняшний день ключевые устройства. Существующие подходы к их проектированию обладают рядом недостатков и не позволяют в полной мере решить задачу синтеза широкополосных ключевых усилителей и умножителей частоты.

Таким образом, разработка математической модели и методов синтеза широкополосных ключевых усилителей мощности и умножителей частоты с общих позиций является важной и актуальной задачей.

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является разработка моделей и методов автоматизированного синтеза широкополосных ключевых усилителей мощности и умножителей частоты класса Е, практическая реализация методов.

Для достижения цели необходимо решить следующие **основные задачи:**

1. разработать обобщенную математическую модель ключевого устройства класса Е;
2. исследовать влияние конечного сопротивления ключа и высших гармоник на энергетические характеристики, а также оценить предельные полосы частот ключевых усилителей и умножителей частоты класса Е;
3. разработать метод автоматизированного синтеза широкополосных ключевых усилителей и умножителей частоты класса Е, обеспечивающих максимальный уровень КПД в заданной полосе частот;
4. разработать необходимые алгоритмы и программное обеспечение, предназначенное для решения задачи автоматизированного синтеза широкополосных ключевых устройств класса Е;
5. произвести проверку разработанных моделей, методов и алгоритмов синтеза широкополосных ключевых устройств путем проведения вычислительного и натурного эксперимента.

**Объектами исследования** являются усилители и умножители частоты, работающие режиме класса Е.

**Предметами исследования** являются модели, эквивалентные и принципиальные схемы, методы синтеза широкополосных согласующе-фильтрующих цепей усилителей и умножителей частоты.

**Методы исследований.** Для решения поставленных задач использовался математический аппарат теории электрических цепей, дифференциальных уравнений, функций комплексной переменной, методы спектрального анализа, матричной алгебры. Применялось компьютерное моделирование и экспериментальные методы, основанные на прямом измерении характеристик устройств при помощи стандартной аппаратуры.

**Научной новизной** обладают следующие основные результаты работы:

1. получена обобщенная модель усилителя мощности и умножителя частоты, работающих в режиме класса Е при произвольном количестве гармоник тока;
2. получены аналитические выражения, позволяющие найти предельные значения ширины полосы рабочих частот усилителей мощности и умножителей частоты, работающих в классе Е, а также зависимости максимального КПД от ширины полосы рабочих частот;
3. получены оценки влияния уровня гармоник на предельное значение КПД ключевого усилителя и умножителя частоты;
4. разработан метод синтеза широкополосных ключевых усилителей и умножителей частоты в произвольном электрическом элементарном базисе, основанный на обобщенной модели ключевых устройств и собственных параметрах идеального согласующего четырехполюсника.

**Достоверность и обоснованность** полученных в работе результатов **обеспечены** выбором моделей, адекватных решаемым задачам, математическими доказательствами, выполненными в ходе исследований, и их экспериментальной проверкой; **подтверждены** совпадением теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными путем компьютерного моделирования и натурными испытаниями. Достигнутые результаты согласуются с современными научными представлениями и данными отечественных и зарубежных информационных источников, а также подтверждаются их представительным обсуждением в научных изданиях и выступлениях на международных и российских научных конференциях.

#### **Практическая значимость работы.**

Предложенные в диссертации методы и модели реализованы в виде комплекса программных средств и направлены на решение задачи автоматизированного проектирования широкополосных усилителей мощности и умножителей частоты, работающих в режиме класса E. Их практическая значимость состоит в следующем:

- обобщенная математическая модель ключевого устройства класса E позволяет решать задачи нахождения стационарных режимов его работы в реальных конструкциях усилителей мощности и умножителей частоты, удовлетворяющих требованиям предъявляемым к проектируемым устройствам;
- метод автоматизированного синтеза выходных согласующе-фильтрующих цепей широкополосных усилителей мощности и умножителей частоты позволяет находить оптимальные решения в произвольном электрическом элементном базисе в канонической форме, оценивать возможность улучшения решения при усложнении функций собственных параметров проектируемых цепей, учитывать технические ограничения;
- проектирование ключевых усилителей мощности с применением предложенного метода позволяет расширить относительную полосу рабочих частот до 50 – 60% .

#### **Основные новые научные положения, выносимые на защиту:**

1. обобщенная математическая модель усилителей и умножителей частоты, работающих в режиме класса E, при протекании произвольного количества гармонических составляющих тока, позволяющая учесть диссипативные потери и инерционность ключа, влияние высших гармоник, а также нелинейный характер выходной емкости;
2. предельные оценки ширины полосы рабочих частот, влияния диссипативных потерь в ключе, а также уровня подавления гармоник на энергетические характеристики ключевых устройств класса E;
3. метод синтеза широкополосных ключевых усилителей мощности и умножителей частоты класса E, основанный на обобщенной математической модели ключевых устройств и собственных параметрах идеального

реактивного четырехполюсника, согласующего произвольные импедансы источника сигнала и нагрузки.

**Реализация и внедрение работы.** Теоретические результаты диссертационной работы использованы в опытно-конструкторских работах ОАО «НПО НИИИП-НЗиК» при разработке широкополосных функциональных узлов ВЧ и СВЧ диапазонов и подтверждены актами внедрения. Разработанные программные модули применялись при разработке усилителей мощности класса E в ООО «НПП Триада - ТВ». Часть материалов диссертации использовалась в учебном процессе кафедры «Конструирования и технологии радиоэлектронных средств» Новосибирского государственного технического университета при подготовке бакалавров по направлению 210200 «Проектирование и технология электронных средств» и инженеров по специальности 210404 «Многоканальные телекоммуникационные системы» в дисциплинах: «Моделирование и автоматизированное проектирование ВЧ и СВЧ устройств», «Моделирование и автоматизированное проектирование устройств связи», а также при подготовке квалификационных работ бакалавров, дипломированных специалистов и магистров по соответствующей тематике.

**Апробация результатов работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: на VIII международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», (Новосибирск, 2006г.), на IX международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», (Новосибирск, 2008г.), на X международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», (Новосибирск, 2010г.), на XI международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», (Новосибирск 2012 г.), на IX международной школе-семинаре «Электронные приборы и материалы EDM-2008», (Эрлагол, Алтай 2008г.), на X международной конференции-семинаре «Микро/нано технологии и электронные приборы EDM-2009», (Эрлагол, Алтай, 2009г.).

**Публикации.** По теме диссертации было опубликовано 12 научных работ, в том числе: 3 статьи в ведущих научных журналах и изданиях, входящих в перечень, рекомендованный ВАК, 8 статей в сборниках материалов международных научно-технических конференций и 1 статья в сборнике научных трудов Саратовского государственного технического университета.

**Личный вклад.** Все выносимые на защиту результаты и положения, составляющие основное содержание диссертационной работы разработаны и получены лично автором или при его непосредственном участии. Интерпретация основных научных результатов осуществлялась вместе с соавторами публикаций.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 114 наименований и

приложений. Общий объем работы без учета приложений, составляет 148 страниц. Диссертация содержит 72 рисунка и 7 таблиц.

### **Краткое содержание работы**

**Во введении** обоснованы актуальность темы и степень ее разработанности. Описаны объекты, предметы и методы исследования. Изложено краткое содержание работы. Отмечена ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Приведены положения работы, выносимые на защиту. Даны сведения о степени достоверности и апробации результатов, а также об объеме и структуре работы, о публикациях и личном вкладе соискателя.

**В первом** разделе рассмотрены основные режимы работы ключевых усилителей мощности и умножителей частоты. Проведен анализ существующих методов их синтеза, обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования.

Проведенный анализ отечественных и зарубежных работ посвященных вопросам синтеза ключевых усилителей мощности позволяет сделать следующие выводы:

1) Наиболее энергетически эффективными среди всех известных режимов работы усилительно-умножительных устройств являются ключевые режимы D, E и F классов. Теоретический предел КПД идеальных устройств, работающих в данных режимах, составляет 100%, однако в реальных конструкциях наличие диссипативных потерь в элементах схемы, а также отклонение режима работы ключа от идеального, вызванное наличием паразитных параметров, приводит к заметному снижению КПД.

2) Существующие методы проектирования усилителей мощности и умножителей частоты класса E основаны на анализе гармоник напряжения на шунтирующей емкости, однако ключевым моментом в данных методах является наличие в выходной согласующей цепи последовательного LC-контура с высокой нагруженной добротностью, который обеспечивает протекание в цепи нагрузки тока только одной частоты. Это позволяет получить простые аналитические соотношения для основных энергетических параметров - КПД и выходной мощности, однако ограничивает полосу рабочих частот проектируемого устройства практически одной частотой. Результаты экспериментальных исследований реальных конструкций усилителей мощности класса E показывают, что даже в случае использования простейших выходных согласующих цепей удается получить полосу рабочих частот порядка 15%.

3) Значительно возросшее в последние годы внимание к широкополосным ключевым устройствам нашло отражение в научных публикациях, где приводятся схемотехнические решения, позволяющие расширить полосу рабочих частот ключевых усилителей мощности за счет усложнения выходной цепи. Однако использование строго определенной структуры выходной цепи не позволяет ее оптимизировать в заданной

полосе рабочих частот и делает невозможным проектирование ключевых устройств с заданными полосовыми характеристиками.

4) Существующие методы синтеза ключевых устройств имеют ряд недостатков, ограничивающих их применение. Среди них: заданная структура выходной согласующей цепи, невозможность учета протекания в системе произвольного числа гармоник тока, сложность учета большого числа паразитных параметров. Устранение этих недостатков требует разработки нового метода синтеза усилительно-умножительных устройств, работающих в режиме класса E.

На основе анализа известных методов синтеза ключевых устройств сформулированы цели и задачи разработки метода синтеза широкополосных ключевых усилителей и умножителей частоты класса E и выбраны адекватные методы ее решения.

**Во втором** разделе приводятся результаты разработки обобщенной модели ключевых усилителей мощности и умножителей частоты класса E, позволяющей учитывать протекание произвольного числа гармоник тока в системе емкость-ключ, а также нелинейный характер шунтирующей емкости, омические потери в ключе и его инерционность. Исследовано влияние постоянной времени ключа в замкнутом и разомкнутом состояниях на КПД ключевого устройства. Проведен анализ влияния гармоник тока, протекающих в системе, на основные энергетические характеристики ключевых усилителей и умножителей частоты класса E.

Обобщенная математическая модель ключевого устройства, предложенная в п. 2.1, представляется эквивалентной схемой, приведенной на рис. 1, где  $R(\theta)$  – активное сопротивление ключа, изменяющееся под действием входного сигнала,  $C_s(U_c)$  – шунтирующая емкость, которая в общем случае может быть нелинейной,  $U_c$  – напряжение на ней.  $I_0$  – постоянная, а  $I(\theta)$  – переменная составляющие тока, втекающего в общий узел системы, обозначенный на схеме, рис. 1, как узел “А”.

Тогда на основе первого закона Кирхгофа, с учетом компонентных уравнений для емкости и активного сопротивления ключа, напряжение на шунтирующей емкости может быть найдено из решения дифференциального уравнения

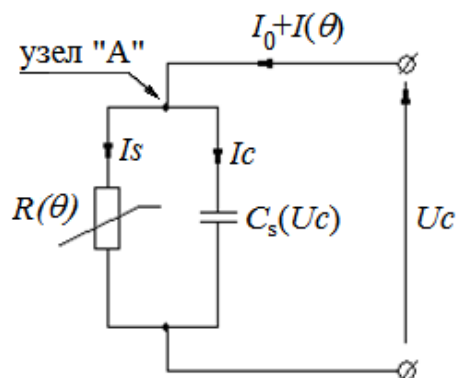


Рис. 1. Эквивалентная схема устройства класса E

$$\frac{dU_c(\theta)}{d\theta} + \frac{U_c(\theta)}{\omega C_s(U_c) \cdot R(\theta)} = \frac{I_0 + \sum_{\substack{k=-m \\ k \neq 0}}^m S_k e^{j\theta \cdot k}}{\omega C_s(U_c)}, \quad (1)$$



где  $S_k = 1/2 \cdot I_k e^{j\varphi_k}$ ,  $S_{-k} = \bar{S}_k$ ,  $I_k$ ,  $\varphi_k$  – соответственно амплитуда и фаза  $k$ -той гармоники тока,  $\theta = \omega t$ .

Для определения мощностей, потребляемых (выделяемых) на каждой гармонике, а также импедансов по гармоникам, необходимо получить разложение импульса  $U_c(\theta)$ , являющегося решением уравнения (1), в ряд Фурье. Мощность, потребляемая от источника питания  $P_0$ , и выходной  $N$ -ной гармоники  $P_N$  могут быть найдены с помощью выражений

$$P_0 = G_{U_c}(0) I_0, \quad (2)$$

$$P_N = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(2G_{U_c}(N) \cdot 2\bar{S}_N) = 2 \operatorname{Re}(G_{U_c}(N) \cdot \bar{S}_N), \quad (3)$$

где  $G_{U_c}(n)$  - комплексный  $n$ -ный коэффициент Фурье для импульса напряжения на шунтирующей емкости, получаемого из решения уравнения (1). На основании выражений (2) и (3) определяется КПД ключевого устройства

$$\eta = \frac{P_N}{P_0} = \frac{2 \operatorname{Re}(G_{U_c}(N) \bar{S}_N)}{G_{U_c}(0) \cdot I_0}, \quad (4)$$

а также импедансы нагрузки на  $N$ -ной гармонике

$$Z_{H_N} = \frac{\bar{G}_{U_c}(N)}{\bar{S}_N}. \quad (5)$$

Поскольку решение уравнения (1) в общем случае возможно только с применением численных методов, что связано со значительными затратами машинного времени, при построении процедуры оптимизации режима работы ключевого устройства крайне важно правильно выбрать начальное приближение. В связи с этим, было получено аналитическое решение уравнения (1) для случая линейной шунтирующей емкости и упрощенной модели ключа, представленного как активное сопротивление, изменяющееся скачком за бесконечно малое время

$$U_c(\theta) = \frac{1}{\omega C s} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{\substack{k=-m \\ k \neq 0}}^m \frac{S_k (e^{jk\theta} - e^{-\theta \cdot b_{\max}})}{jk + b_{\max}} + I_0 R_{\max} (1 - e^{-\theta \cdot b_{\max}}) + \\ + U_0 e^{-\theta \cdot b_{\max}}, \text{ при } 0 \leq \theta \leq 2\pi D \\ \sum_{\substack{k=-m \\ k \neq 0}}^m \frac{S_k (e^{jk\theta} - e^{-\theta \cdot b_{\min}})}{jk + b_{\min}} + I_0 R_{\min} (1 - e^{-\theta \cdot b_{\min}}) + \\ + U_0' e^{-(\theta - 2\pi D) \cdot b_{\min}}, \text{ при } 2\pi D < \theta \leq 2\pi \end{array} \right. , \quad (6)$$

где  $b_{\max} = 1/\omega R_{\max} C s$ ,  $b_{\min} = 1/\omega R_{\min} C s$ ,  $R_{\max}$  и  $R_{\min}$  - сопротивление ключа в разомкнутом и замкнутом состояниях соответственно,  $U_0$  – напряжение на шунтирующей емкости в начальный момент времени,  $U_0'$  - напряжение на

шунтирующей емкости в момент коммутации,  $D$  – коэффициент заполнения импульса, показывающий в течение какой части периода основной частоты ключ находится в разомкнутом состоянии.

На основе выражений (2) – (6) была разработана процедура оптимизации режима работы нелинейного элемента, позволяющая находить оптимальные с точки зрения выбранного критерия импедансы нагрузки на различных гармониках.

В п. 2.2 приведены аналитические выражения для случая идеального ключа и одной гармоники тока, который интересен в первую очередь тем, что представляет собой предельную оценку и, тем самым, позволяет обоснованно оценить полученные в процессе оптимизации решения. С другой стороны, это позволяет математически строго проверить справедливость модели общего вида, путем сравнения полученных результатов с ранее опубликованными, но найденными с других позиций. Так для идеального ключа и одной гармоники тока аналитические зависимости выходной мощности

$$P_N = -\frac{I_0^2}{\pi\omega C_s N^2} \quad (7)$$

и импеданса нагрузки, необходимого для обеспечения оптимального режима работы

$$Z_{H_{\text{Opt}}} = \frac{8 + j(\pi^3/2 - 2\pi)}{\pi\omega C_s N^2 (4 + \pi^2)} \quad (8)$$

принимают вид, совпадающий с аналогичными соотношениями из опубликованных литературных источников.

В п. 2.3 на основе математической модели, предложенной в п. 2.1 проведен анализ влияния постоянной времени ключа на энергетические характеристики усилителей и умножителей частоты. Зависимость предельной величины КПД от постоянной времени ключа в замкнутом и разомкнутом состояниях приведена на рис. 2. из которых следует, что с увеличением кратности умножения влияние постоянной времени ключа в замкнутом состоянии резко возрастает. Учитывая, что для большинства современных мощных транзисторов сопротивление насыщения лежит в пределах от долей Ома до нескольких Ом, можно сделать вывод, что при необходимости проектирования умножителей частоты с высокой кратностью предпочтительнее использовать несколько каскадов с низкой кратностью умножения. В то же время, при постоянной времени ключа в разомкнутом состоянии более тысячи Ом ее влияние на величину КПД незначительно, при этом чувствительность КПД к величине постоянной времени ключа уменьшается с ростом кратности умножения.

Результаты, полученные в п. 2.3, могут быть использованы при проектировании реальных конструкций ключевых усилителей и

умножителей частоты класса Е при выборе типа нелинейного элемента и его рабочей точки по постоянному току для обеспечения надежного закрывания транзистора и его перехода в режим глубокого насыщения при минимальном уровне входного сигнала.

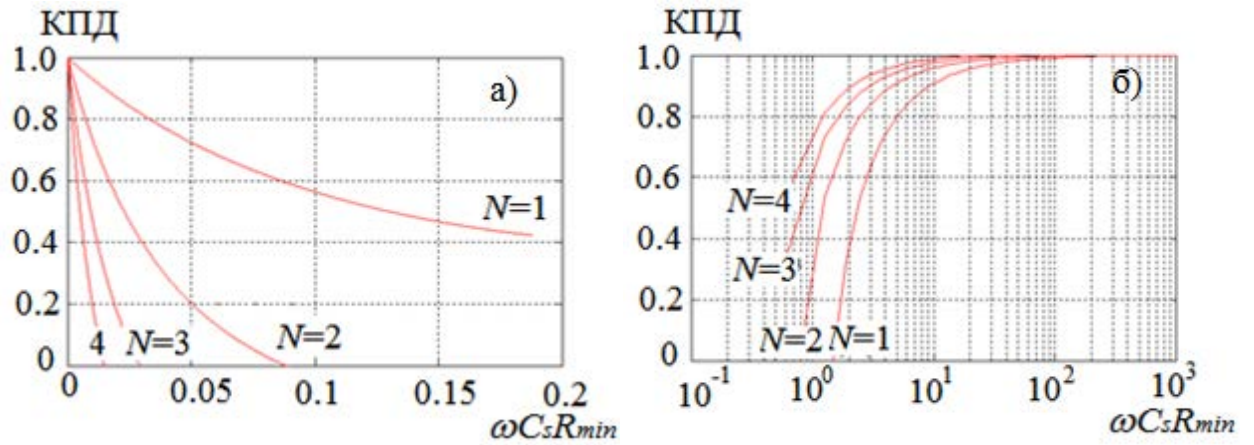


Рис. 2. Зависимость КПД от величины постоянной времени ключа в замкнутом (а) и разомкнутом (б) состояниях

В п. 2.4 приводятся результаты исследования влияния гармоник, протекающих в выходной цепи ключевого устройства, на режим его работы. Зависимости мощностей  $N$ -ной,  $N-1$  и  $N+1$  гармоник, нормированные к потребляемой мощности  $P_0$ , приведены на рис. 3.

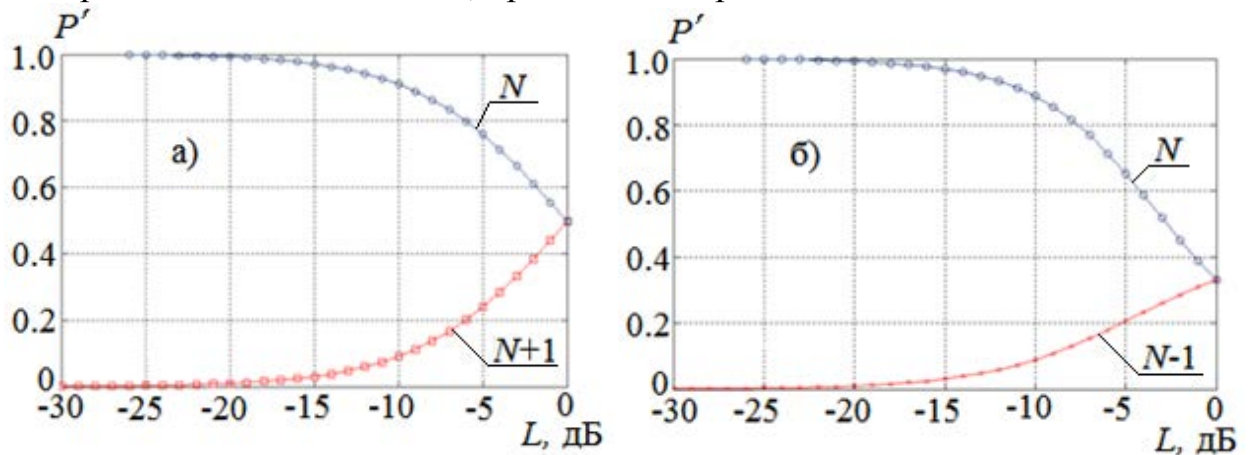


Рис. 3. Нормированные к потребляемой мощности выходные мощности  $N$ ,  $N+1$  (а) и  $N-1$  (б) гармоник

Из приведенных на рис. 3 зависимостей видно, что при уровнях подавления гармоник более 10 дБ величина максимально достижимого уровня КПД снижается приблизительно до 90%, дальнейшее возрастание гармоник приводит к росту потребляемой мощности, однако в случае идеального ключа мощность, потребляемая от источника питания, может быть полностью преобразована в мощности выходных гармоник, при этом возможен такой режим работы ключевого устройства, при котором выходной согласующей цепью определяется соотношение между мощностью  $N-1$ ,  $N$ -ной и  $N+1$  гармоник на выходе. Таким образом, показана возможность создания устройств, в которых одновременно с высокой эффективностью осуществляется усиление и умножение частоты.

**Третий** раздел посвящен разработке двухэтапного метода автоматизированного синтеза широкополосных ключевых усилителей и умножителей частоты класса Е в электрическом элементном базисе с оптимальными энергетическими характеристиками.

В п. 3.1 для определения максимальной полосы рабочих частот идеального устройства класса Е рассмотрен режим работы, при котором выходными согласующими цепями обеспечивается протекание единственной выходной гармоники тока  $N\omega_0$ , где  $\omega_0$  – основная частота, а  $N$  – кратность умножения. При этом, возможны два случая: когда верхняя граница полосы пропускания гармоники  $(N-1)\omega_0$  совпадет с нижней границей полосы пропускания выходной гармоники  $N\omega_0$  и наоборот, когда верхняя граница полосы пропускания выходной гармоники совпадет с нижней границей полосы пропускания на гармонике  $(N+1)\omega_0$ . Показано, что в случае, если выходная согласующе-фильтрующая цепь ключевого устройства имеет характеристику идеального полосового фильтра, максимальная ширина полосы рабочих частот будет ограничиваться  $N+1$  гармоникой. При этом соответствующее выражение, позволяющее найти предельную относительную полосу рабочих частот умножителей частоты, имеет вид

$$W = \frac{1}{\sqrt{N^2 + N}}. \quad (9)$$

Отличие импеданса нагрузки от оптимального значения приводит к уменьшению КПД ключевого устройства вследствие искажения импульса напряжения на шунтирующей емкости, вызванного неоптимальным соотношением токов постоянной и переменной составляющей, поэтому было проведено исследование влияния величины рассогласования нагрузки на КПД идеального ключевого устройства класса Е, основные результаты которого приведены на рис. 4а и 4б.

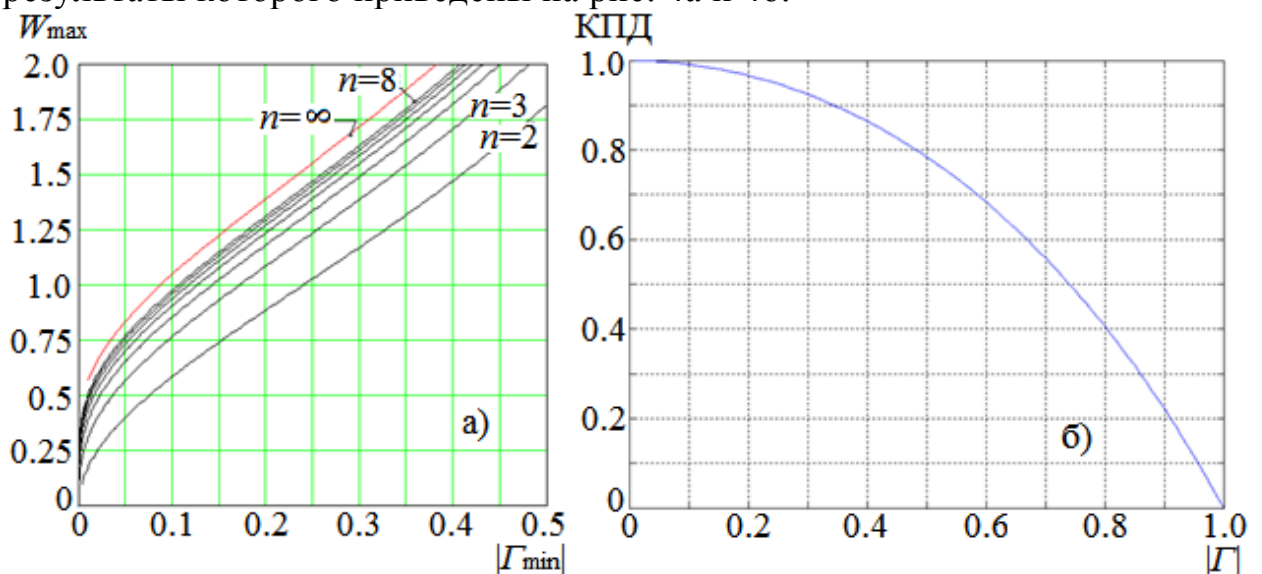


Рис. 4. Предельная ширина относительной полосы согласования (а) и зависимость КПД ключевого устройства класса Е (б) от величины модуля коэффициента отражения нагрузки

Представленные на рис. 4а зависимости показывают, что максимальное значение относительной полосы рабочих частот, определяемое из выражения (9), может быть достигнуто сравнительно простой выходной согласующе-фильтрующей цепью, что находит подтверждение в ряде публикаций, посвященных вопросам экспериментального исследования конструкций ключевых усилителей мощности класса E. В то же время зависимость на рис. 4б показывает, что приемлемые с практической точки зрения значения КПД > 80% могут быть получены при значительном рассогласовании на выходе устройства.

В п. 3.2 предложен метод синтеза широкополосных ключевых усилителей и умножителей частоты. В данном методе на первом этапе производится поиск оптимального режима работы нелинейного элемента, а на втором синтезируется выходная согласующе-фильтрующая цепь. Критерием оптимальности синтезируемого ключевого устройства будем считать получение максимальных показателей по энергетическим характеристикам в рабочей полосе частот при минимальной сложности выходных согласующих цепей. Для этого с использованием обобщенной математической модели ключевого устройства определяются частотные зависимости выходного импеданса на основной и ближайшей верхней гармонике.

Оптимизационная процедура, предназначенная для нахождения оптимальных, с точки зрения обеспечения режима класса E, импедансов нагрузки, в каждой точке частотного диапазона  $f_n \dots f_b$ , на основе исходных данных осуществляет поиск таких значений комплексных амплитуд токов выходной частоты  $S_N$  и  $N+1$  гармоники  $S_{N+1}$ , для которых бы выполнялись условия

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta = \frac{2 \operatorname{Re} [G_{Uc}(N) \cdot \bar{S}_N]}{G_{Uc}(0) \cdot I_0} \rightarrow \max \\ 10 \log \left( \frac{P_{N+1}}{P_N} \right) \leq L_{\text{подавления}} \end{array} \right. , \quad (10)$$

где  $L_{\text{подавления}}$  - величина подавления  $N+1$  гармоники по отношению к выходной  $N$ -ной. Для токов  $S_N$  и  $S_{N+1}$ , удовлетворяющих условию (10), определяются импедансы нагрузки на основной и  $N+1$ -ой гармониках, которые и будут обеспечивать требуемое соотношение мощностей гармоник на выходе ключевого устройства. Для обеспечения требуемого соотношения гармоник токов синтез выходной согласующей цепи осуществляется одновременно в двух полосах частот: на  $N$ -ной гармонике в полосе  $N\omega_n \div N\omega_g$ , и на  $N+1$  в полосе  $(N+1)\omega_n \div (N+1)\omega_g$ . Для этого, в указанных полосах частот находятся предельные зависимости собственных параметров реактивного четырехполюсника, согласующего произвольные импедансы источника сигнала и нагрузки с помощью выражений (Г.Н. Девятков, 2003)

$$\tilde{Z}_{11}(s) = -j \operatorname{Im} Z_1(s) + j \operatorname{Re} Z_1(s) \cdot \operatorname{ctg} \varphi(\omega); \quad (11)$$

$$\tilde{Z}_{22}(s) = -j \operatorname{Im} Z_2(s) + j \operatorname{Re} Z_2(s) \cdot \operatorname{ctg} \varphi(\omega); \quad (12)$$

$$\tilde{Z}_{21}(s) = \frac{\pm j \sqrt{\operatorname{Re} Z_1(s) \cdot \operatorname{Re} Z_2(s)}}{\sin \varphi(\omega)}, \quad (13)$$

где  $Z_1(s)$  и  $Z_2(s)$  согласуемые импедансы источника сигнала и нагрузки,  $s=j\omega$ ,  $\varphi(\omega)$  – фаза рабочего коэффициента преобразования  $t(\omega)$ . Тогда, учитывая, что выражения (11) - (13) могут быть представлены быстро сходящимися рядами, задача синтеза согласующей цепи сводится к аппроксимации выражений (11) - (13) максимально простой структурой функций собственных параметров согласующего четырехполюсника с одновременным выполнением ограничений, обеспечивающих физическую реализуемость цепи.

Таким образом, в результате решения аппроксимационной задачи находится полная совокупность эквивалентных четырехполюсников, которые при включении между системой ключ-емкость и нагрузкой обладают одинаковыми рабочими коэффициентами преобразования. Благодаря этому, имеется возможность получить оптимальную цепь не только по рабочим характеристикам, но и по более сложным критериям, учитывающим, например, особенности конструктивной и технологической реализации. Реализация полученной структуры функций собственных параметров производится по первой канонической форме Фостера.

Завершающим этапом предложенного метода синтеза является уточнение решения, в ходе которого может быть учтено влияние конструктивной реализации устройства на его рабочие характеристики. При этом применяются встроенные средства оптимизации профессиональной САПР, в которой осуществляется проектирование устройства.

Предложенный метод синтеза был положен в основу разработанного программного модуля, предназначенного для синтеза широкополосных ключевых усилителей мощности и умножителей частоты класса Е. Данный программный модуль может быть интегрирован в среду профессиональной САПР.

В п. 3.3 рассмотрен пример синтеза выходной согласующей цепи идеального усилителя мощности класса Е. Для проверки эффективности метода была синтезирована выходная согласующая цепь идеального усилителя класса Е с полосой рабочих частотот  $f_{\text{н}}=350$  МГц до  $f_{\text{в}}=730$  МГц ( $W=70,4\%$ ), что близко к теоретическому предельному значению относительной полосы рабочих частот ( $W_{\text{max}}=70,9\%$ ) для ключевых усилителей.

Частотные характеристики оптимального выходного импеданса идеального ключевого усилителя класса Е, рассчитанные с помощью выражения (8), приведены на рис. 5.

В соответствии с предложенным методом, для полученных оптимальных значений выходного импеданса и активного сопротивления нагрузки 50 Ом,

выбираем наиболее простую структуру функций собственных параметров согласующей цепи с учетом физической реализуемости

$$Z_{21}(s) = \frac{2k_{21}^1 s}{s^2 - s_1^2}, \quad Z_{11}(s) = k_{11}^\infty \cdot s + \frac{2k_{11}^1}{s^2 - s_1^2}, \quad Z_{22}(s) = k_{22}^\infty s + \frac{2k_{22}^1}{s^2 - s_1^2},$$

$k_{ij}^1 \geq 0$ ,  $k_{ii}^\infty \geq 0$ ,  $k_{11}^1 \cdot k_{22}^1 - (k_{21}^1)^2 = 0$ , где  $k_{ii}^\infty$  – вычеты в бесконечности,  $k_{ij}^1$  – вычеты на частоте  $f_1$ . В результате аппроксимации выражений (11) - (13) выбранной структурой собственных функций получаем Z-матрицу согласующе-фильтрующей цепи

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 0.122s + \frac{0.016s}{s^2 + 0.585^2} & \frac{0.112s}{s^2 + 0.585^2} \\ \frac{0.112s}{s^2 + 0.585^2} & 1.127s + \frac{0.112s}{s^2 + 0.585^2} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Синтезированная цепь и частотная характеристика ее коэффициента преобразования мощности  $G(\omega) = t(\omega) \cdot \bar{t}(\omega)$  представлены на рис. 5.

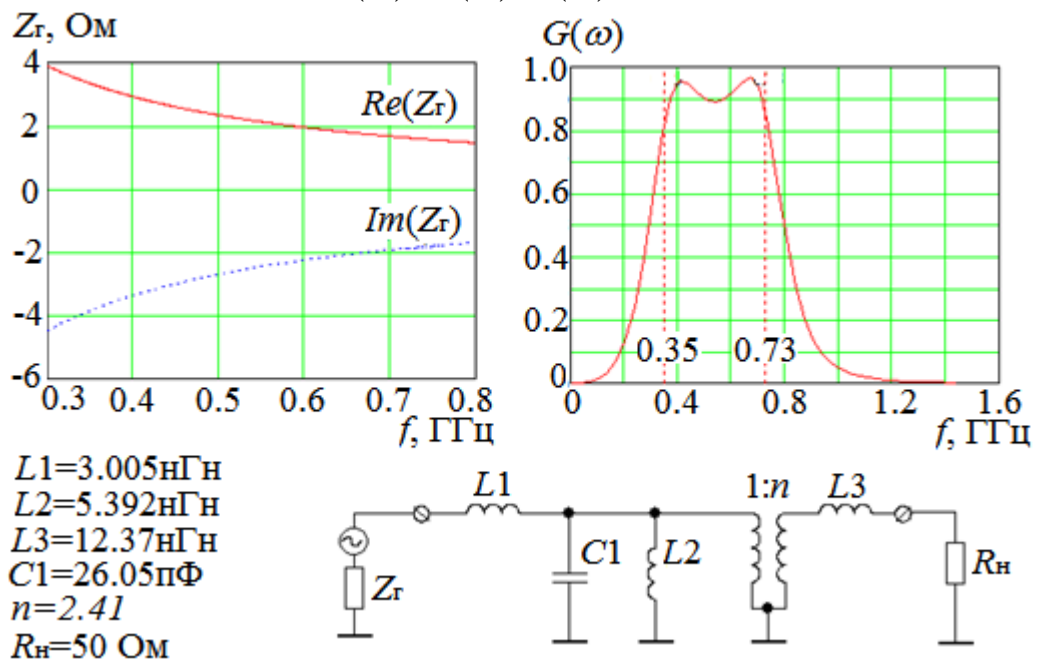


Рис. 5. Оптимальный выходной импеданс ключевого усилителя, синтезированная выходная согласующая цепь и ее частотная зависимость коэффициента преобразования мощности

Полученная цепь обеспечивает оптимальное значение импеданса, необходимого с точки зрения достижения максимального КПД ключевого усилителя в заданной полосе частот.

**В четвертом** разделе приведены результаты вычислительных и натуральных экспериментальных исследований реальных конструкций ключевых усилителей мощности класса Е, разработанных с применением предложенного в разделе 3 двухэтапного метода синтеза.

В п. 4.1 представлены результаты моделирования методом гармонического баланса в среде профессиональной САПР усилителя мощности класса E, схема которого приведена на рис. 6.

Для проверки эффективности метода, предложенного в разделе 3, был проведен анализ схемы широкополосного ключевого усилителя с тремя вариантами выходной согласующей цепи. Моделирование схемы усилителя осуществлялось с помощью профессиональной САПР, в библиотеку элементов которой входит нелинейная модель транзистора MRF21010, рекомендованная производителем. Данная модель учитывает большое количество параметров транзистора, в том числе нелинейный характер выходной емкости, инерционность, а также паразитные параметры его корпуса, что значительно повышает точность моделирования.

В качестве первого варианта выходной согласующе-фильтрующей цепи была использована схема, синтезированная в п. 3.3 для идеального ключевого усилителя мощности, которая приведена на рис. 5. Во втором варианте для синтеза выходной согласующе-фильтрующей цепи был использован программный модуль, разработанный на основе обобщенной модели ключевого устройства и метода синтеза, предложенного в разделе 3. Третий вариант выходной цепи был получен в результате параметрической подоптимизации средствами САПР схемы, которая была синтезирована с помощью разработанного программного модуля. Значения элементов выходной цепи и основные параметры синтезированных усилителей приведены в табл. 1

Таблица 1.

Параметры широкополосной выходной цепи на этапе начального приближения и после окончательной оптимизации

Параметр	Идеальная модель	Обобщенная модель	После оптимизации
$L3$ , нГн	3,005	2,139	4,685
$C5$ , пФ	26,05	24,11	25,49
$L4$ , нГн	5,396	6,651	5,931
$L5$ , нГн	12,37	16,61	1,304
$n$	2,41	2,96	1,723
КПД <sub>max</sub> , %	76	88	79,5
КПД <sub>min</sub> , %	60	60	71,3
Максимальная выходная мощность, Вт	7,7	9,5	9,5
Неравномерность выходной мощности, дБ	1,4	2,15	2,3
Минимальный коэф. усиления, дБ	11,5	11,6	11,7



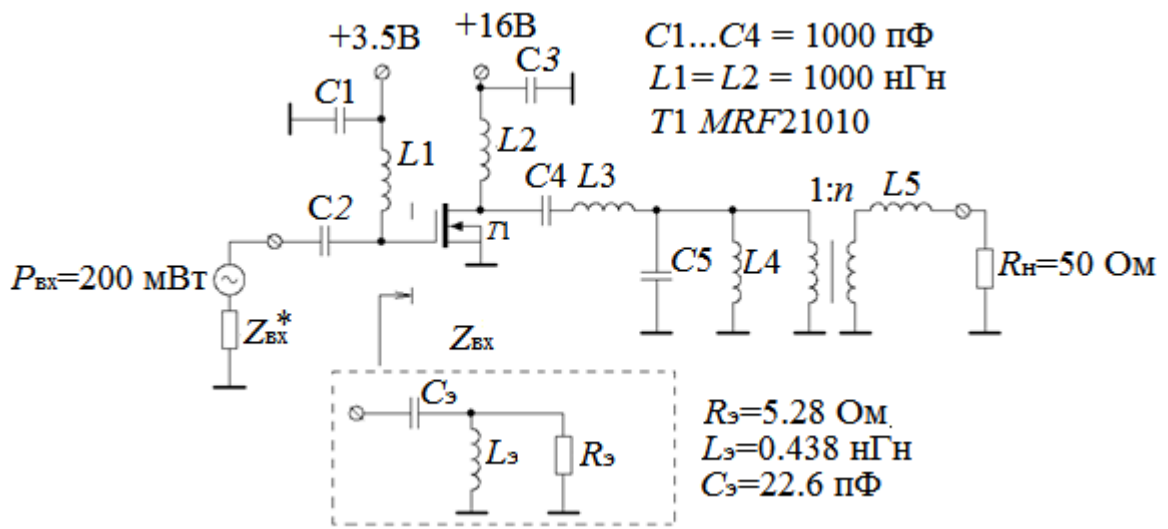


Рис. 6. Схема усилителя мощности

Частотные зависимости КПД и выходной мощности для различных вариантов схем ключевых усилителей приведены на рис. 7.

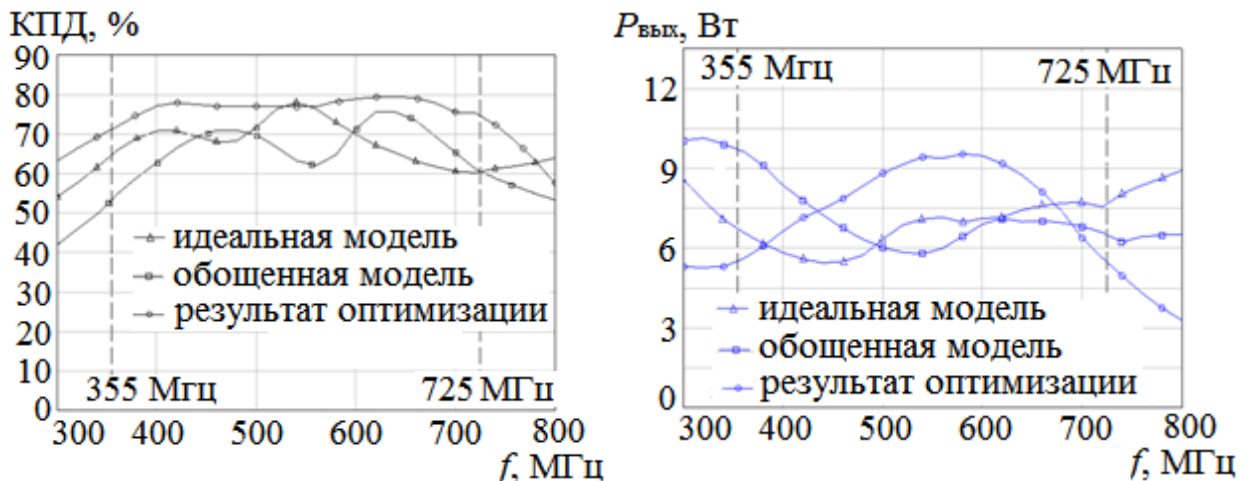


Рис. 7. Частотные зависимости КПД и выходной мощности для различных вариантов схем ключевых усилителей

Результаты вычислительных экспериментов показали высокую эффективность предложенного метода синтеза.

В п. 4.2 приведены результаты экспериментального исследования опытных образцов ключевых усилителей мощности класса Е дециметрового диапазона в сосредоточенно-распределенном элементном базисе, разработанных в рамках выполнения ОКР "Аллан-НИИИП".

В результате практической реализации широкополосных ключевых усилителей класса Е было показано, что использование разработанной процедуры синтеза ключевых устройств в совокупности с возможностями современных САПР позволяют организовать сквозной цикл разработки усилителей мощности и умножителей частоты от этапа оптимизации режима работы нелинейного элемента до разработки конструкции. Такой подход позволяет значительно повысить вероятность успешной разработки с первого раза и тем самым минимизировать временные и экономические затраты на разработку.

В заключении представлены основные выводы и результаты диссертационного исследования.

### Заключение

В результате диссертационных исследований был предложен метод автоматизированного синтеза широкополосных ключевых усилителей и умножителей частоты, работающих в режиме класса E, позволяющий находить оптимальные схемотехнические решения в сосредоточенном и распределенном электрическом элементных базисах в заданной полосе рабочих частот. В процессе выполнения работы были получены следующие научные и практические результаты.

1. Предложена математическая модель устройства класса E общего вида, которая позволяет учитывать произвольное число гармоник тока, а также конечное сопротивление ключа в разомкнутом и замкнутом состояниях. Данная модель позволяет определить энергетические и импедансные характеристики, которые могут быть использованы при решении задачи синтеза реальных ключевых устройств. Справедливость представленной математической модели подтверждена теоретическим анализом работы идеального ключевого устройства.

2. Проведен анализ влияния постоянной времени ключа в замкнутом и разомкнутом состояниях на энергетические характеристики усилителей и умножителей частоты, работающих в классе E. Показано, что с увеличением кратности умножения влияние сопротивления ключа в замкнутом состоянии резко возрастает, что позволяет обоснованно подойти к выбору транзистора при проектировании реальных конструкций усилителей и умножителей частоты. Из полученных результатов следует, что при необходимости проектирования умножителей частоты с высокой кратностью предпочтительнее использовать несколько каскадов с низкой кратностью умножения.

3. Исследовано влияние гармоник на основные энергетические характеристики ключевого устройства класса E. Показано, что при уровне подавления высших гармоник более 10 дБ величина максимально достижимого уровня КПД снижается приблизительно до 90%, это позволяет строить выходные согласующе-фильтрующие цепи более простой структуры.

4. Впервые показана принципиальная возможность создания ключевых устройств, работающих в режиме класса E, в которых мощность, потребляемая от источника питания, полностью преобразуется в мощности выходных гармоник, при этом их соотношение может изменяться в широких пределах за счет обеспечения оптимальных значений импеданса на гармониках. Найдены аналитические выражения, позволяющие определить предельные значения ширины полосы рабочих частот ключевых усилителей мощности и умножителей частоты класса E.

5. Предложен новый метод автоматизированного синтеза выходных согласующе-фильтрующих цепей ключевых усилителей и умножителей частоты класса E, основанный на обобщенной

математической модели и собственных параметрах идеального согласующего четырехполюсника. Данный метод показал высокую эффективность и был положен в основу прикладных программных модулей, которые могут быть интегрированы в среду профессиональных САПР и применены для решения задачи сквозного автоматизированного проектирования ключевых усилителей и умножителей частоты.

б. На основе проведенных теоретических исследований с помощью разработанных моделей, метода синтеза и программных модулей были спроектированы и исследованы широкополосные ключевые усилители мощности в дециметровом диапазоне частот. Полученные в результате натурных и вычислительных экспериментов рабочие характеристики подтвердили правильность основных теоретических положений.

### **Список работ автора по теме диссертации**

#### **Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК**

1. Вильмицкий Д.С. Обобщенная математическая модель устройства класса E / Д.С. Вильмицкий, Г.Н. Девятков // Научный вестник НГТУ. - 2008.- №3 (32), С. 27-36.
2. Вильмицкий Д.С. Математическая модель идеального устройства класса E / Д.С. Вильмицкий, Г.Н. Девятков // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – С.-Петербург: ЛЭТИ.-2010. - Т. 3. С. 16 - 25.
3. Вильмицкий Д.С. Метод автоматизированного синтеза широкополосных ключевых устройств /Д.С. Вильмицкий, Г.Н. Девятков, В.В. Проскурняк // Радиопромышленность. – 2012.- Вып. 1. С. 40 – 47.

#### **Прочие публикации**

4. Devyatkov G.N. A collector network of parametric transistor frequency multipliers synthesis method /G.N. Devyatkov, D.S. Vilmitski // Proc. Of International conference on "actual problems of electronic instrument engineering APEIE-2006". - in 7 vol. - Vol. 1, Novosibirsk: NSTU, 2006. – P.81-82.
5. Вильмицкий Д.С. Математическая модель устройства класса E с учетом потерь в ключе/ Д.С. Вильмицкий, Г.Н. Девятков // Материалы IX международной конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП – 2008". -в 7 т. –Т. 4. -Новосибирск:НГТУ, 2008.С. 101-105.
6. Vilmitsky D.S. Mathematical model of class-E device subject to loss in key /D.S. Vilmitsky, G.N. Devyatkov//Proc. of "International conference on actual problems of electronic instrument engineering APEIE-2008", P. 193.
7. D.S. Vilmitsky Estimation of switch resistance effect on class E device energy parameters/D.S. Vilmitsky, G.N. Devyatkov // International conference and

- seminar on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2009: 10 annu. proc. - Novosibirsk, 2009. P. 201–202.
8. Девятков Г.Н. Проектирование выходных цепей транзисторных параметрических умножителей частоты / Г.Н. Девятков, Д.С. Вильмицкий, К.А. Лайко // Техническая электродинамика и электроника: сб. науч. тр. СГТУ. -Саратов:СГТУ, 2008. - С. 30 - 33.
  9. Vilmitsky D.S. Class E device analysis for arbitrary number of load current harmonics / D.S. Vilmitsky, G.N. Deviatkov // International Workshop and tutorials on electron devices and materials, EDM 2008 :9 annu. proc.,- Novosibirsk, 2008 P. 131–134.
  10. Вильмицкий Д.С. Оценка предельной широкополосности устройства класса E /Д.С. Вильмицкий, Г.Н. Девятков // Труды шестой Всероссийской научно-практической конференции (с участием стран СНГ) «Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем». -Ульяновск: Ул.ГТУ, 2009. -С. 245 – 248.
  11. Вильмицкий Д.С. Оценка влияния высших гармоник на режим работы устройства класса E/Д.С. Вильмицкий, Г.Н. Девятков, А.В. Спиридонов //. Материалы X международной конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП – 2010" в 7 томах: Т. 4. – Новосибирск: НГТУ, 2010. -С. 95-96.
  12. Вильмицкий Д.С. Метод синтеза широкополосных ключевых устройств / Д.С. Вильмицкий, Г.Н. Девятков //Материалы XI международной конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП – 2012".- в 7 т.- Т. 4. - Новосибирск:НГТУ, 2012.- С. 110-113.