

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»**

УДК 621.396.61

Хан Зен Хек

**СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ
ЛИНЕЙНОСТИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ТРАНЗИСТОРНЫХ
УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.12.04 - радиотехника, в том числе системы и устройства
радионавигации, радиолокации и телевидения

Минск 2009

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: **Малевич Игорь Юрьевич**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехнических систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Кириллов Владимир Иванович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры метрологии и стандартизации учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Филиппович Геннадий Александрович, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры радиолокации и приемопередающих устройств учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь»

Опонирующая организация: Научно-производственное республиканское унитарное предприятие «АЛЕВКУРП»

Защита состоится «8» апреля 2010 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П.Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Автореферат разослан «5» марта 2010 г.

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Возрастание требований к пропускной и разрешающей способности радиотехнических систем передачи информации, систем радиолокации, радионавигации и радиометрии, использование широкополосных групповых сигналов и сигналов со сложной структурой определяют актуальность проблемы повышения линейности высокочастотных трактов усиления мощности.

Одновременно с этим, необходимость обеспечения высокой энергетической эффективности вынуждает использовать экономичные нелинейные режимы работы акты активных элементов.

Изучению нелинейных явлений в усилителях мощности посвящены фундаментальные работы О.В. Алексеева, В.М. Богачева, Р.Т. Весткотта, Э.Б. Грибова, С.И. Евтянова, Г.М. Крылова, М.И. Минаева, Ю.Л. Хотунцева и др. Данные вопросы подробно представлены в многочисленных работах П.Л. Асовича, Л.С. Гуткина, В.А. Иванова, В.И. Каганова, Л.Я. Кантора, А.П. Лисицкого, Ю.П. Сбитнева, А.А. Соловьёва, А.А. Титова, которыми разработан ряд методов оптимизации передаточных характеристик трактов усиления мощности по критериям минимизации интермодуляционных и гармонических искажений. Однако разработанные методы повышения линейности усилителей мощности высоких частот полностью не решают всех поставленных вопросов. Причем с ужесточением требований к предельно допустимому уровню внеполосных и дополнительных внутрисполосных спектральных составляющих в выходном сигнале проблема становится еще более острой.

В связи с изложенным исследование и разработка новых структурно-параметрических методов повышения линейности широкополосных транзисторных усилителей мощности высокой частоты является актуальной научной задачей и представляет значительный научный и практический интерес.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Диссертационная работа выполнена в рамках одного из научных направлений БГУИР – «Нелинейные искажения в приемно-передающих устройствах». Результаты диссертационной работы нашли свое отражение в госбюджетной НИР «Разработать теорию, алгоритмы, методологию структурно-функциональной схемотехники и программно-аппаратные средства формирования, приема и обработки сигнально-кодовых конструкций в помехозащищенных радиоинформационных системах» №ГР20066154, выполнявшейся в БГУИР.

Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям научно-технической деятельности на 2006-2010 годы, утвержденных Указом Президента Республики Беларусь № 315 от 6 июля 2005 года в области разработки принципов схемотехнического построения приборов

микро- и оптоэлектроники; элементной базы для широкополосных радиосетей; новых радиоэлектронных приборов для систем обработки данных, метрологии и сертификации и приоритетным направлениям прикладных научных исследований, проводимых в соответствии с постановлением Совета Министров Республики Беларусь №1358 от 30 ноября 2005 года «О некоторых мерах по развитию производства средств и систем радиосвязи в Республике Беларусь».

Цель и задачи исследования

Целью исследований является разработка и исследование структурно-параметрических методов повышения линейности передаточных характеристик широкополосных транзисторных усилителей мощности высокой частоты с заданными функционально-энергетическими характеристиками.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Провести анализ состояния методов повышения линейности передаточных характеристик широкополосных транзисторных усилителей мощности высокой частоты.

2. Разработать многофакторные структурно-параметрические методы повышения линейности широкополосных транзисторных усилителей мощности высокой частоты, обеспечивающие комплексную реализацию заданных характеристик тракта, включая выходную мощность, коэффициент передачи, полосу пропускания, характеристики линейности и к.п.д.

3. Разработать новые схемотехнические решения широкополосных транзисторных усилителей мощности высокой частоты с пониженными по сравнению с аналогами уровнями нелинейных искажений.

Объектом исследования являются широкополосные транзисторные усилители мощности высокой частоты. Предметом исследования являются методы повышения линейности широкополосных транзисторных усилителей мощности высокой частоты.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод параметрической оптимизации структур широкополосных усилителей мощности высокой частоты с компенсацией интермодуляционных искажений второго и третьего порядков и минимизированными энергетическими потерями.

2. Метод многопараметрической оптимизации звеньев широкополосных транзисторных усилителей мощности высокой частоты по параметрам линейности и функционально-энергетическим характеристикам.

3. Многофакторный структурно-параметрический метод повышения линейности широкополосных транзисторных усилителей мощности высокой частоты, основанный на использовании принципа распределенного усиления, оптимизации типов, параметров и режимов работы активных элементов, обеспечивающий комплексную реализацию заданных характеристик тракта,

включая выходную мощность, коэффициент передачи, полосу пропускания, параметры нелинейности второго и третьего порядков, к.п.д., входное и выходное сопротивление.

4. Технические решения транзисторных усилителей мощности диапазона МВ-ДМВ с пониженным на 8 – 14 дБ по сравнению с аналогами уровнем интермодуляционных искажений.

Личный вклад соискателя

Все результаты и положения, выносимые на защиту, получены соискателем лично. Вклад научного руководителя Малевича И.Ю. заключался в постановке цели и задач исследования, в выборе соответствующих методов исследования, разработке общей концепции структурно-параметрических методов повышения линейности транзисторных усилителей мощности высокой частоты. В публикациях с соавторами вклад соискателя определяется рамками, излагаемых в диссертации результатов.

Результаты диссертационной работы внедрены и используются ООО «ТЕХНОСОЮЗПРОЕКТ» и УП «Сенсор-плюс».

Апробация результатов диссертации

Результаты исследований, включенные в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на 4 международных и 3 республиканских конференциях, в том числе: 4-й и 5-й Международных научно-технических конференциях «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций» (Севастополь, 2008 г., 2009 г.), XIII и XIV Международных научно-технических конференциях «Современные средства связи» (Минск, 2008 г., 2009 г.), 43-й, 44-й и 45-й научных конференциях аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, 2007 г., 2008 г., 2009 г.).

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 10 научных работах, в том числе: 4 статьях в научных изданиях, включенных в перечень ВАК для опубликования результатов диссертационных исследований, 6 публикаций в сборниках докладов международных научно-технических конференций.

Объем опубликованных материалов, соответствующих пункту 18 «Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь», составляет 1,31 авторских листа. Объем остальных публикаций – 0,99 авторских листа.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения,

библиографического списка и приложений. В первой главе рассмотрены методы оценки линейности усилителей мощности высокой частоты и проведен аналитический обзор методов повышения линейности передаточных характеристик высокочастотных трактов усиления мощности. Во второй главе разработаны и исследованы методы параметрической оптимизации структур широкополосных усилителей мощности высокой частоты с компенсацией интермодуляционных искажений и минимизированными энергетическими потерями. В третьей главе разработан и исследован метод многопараметрической оптимизации звеньев широкополосных транзисторных усилителей мощности высокой частоты по параметрам линейности и функционально-энергетическим характеристикам. В четвертой главе разработан и исследован многофакторный структурно-параметрический метод повышения линейности широкополосных транзисторных усилителей мощности высокой частоты, основанный на использовании принципа распределенного усиления, оптимизации типов, параметров и режимов работы активных элементов, обеспечивающий комплексную реализацию заданных характеристик тракта, включая выходную мощность, коэффициент передачи, полосу пропускания, параметры нелинейности второго и третьего порядков, к.п.д., входное и выходное сопротивление, представлены результаты практического применения и технические решения транзисторных усилителей мощности диапазона МВ-ДМВ с пониженным на 8 – 14 дБ по сравнению с аналогами уровнем интермодуляционных искажений второго и третьего порядков.

Полный объем диссертационной работы составляет 111 страниц, из которых 77 страниц текста, 76 иллюстраций на 20 страницах, 10 таблиц на 2 страницах, список использованных источников из 106 наименований на 8 страницах, список публикаций автора из 10 наименований на 1 странице, 2 приложения на 3 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В *первой главе* рассмотрены методы оценки линейности усилителей мощности (УМ) высокой частоты и проведен аналитический обзор методов повышения линейности передаточных характеристик высокочастотных трактов усиления мощности. Анализ общих тенденций и принципов уменьшения нелинейных искажений мощных усилителей высокой частоты позволил определить методы и технические приемы, обеспечивающие эффективную линеаризацию передаточных характеристик широкополосных транзисторных усилителей мощности высокой частоты.

Учитывая результаты проведенного анализа, получены сравнительные характеристики структурных методов повышения линейности передаточных характеристик широкополосных транзисторных усилителей мощности высокой частоты с заданными функционально-энергетическими характеристиками (таблица 1).

Таблица 1 - Оценка эффективности структурных методов уменьшения нелинейных искажений мощных усилителей высокой частоты

Критерий	Метод		
	Отрицательная обратная связь	Прямая связь	Предыскажение
Степень подавления нелинейных искажений	невысокая	высокая	высокая при наличии контроля и корректировки блока предыскажений
Степень ухудшения энергетических характеристик	средняя	высокая	малая
Степень усложнения высокочастотного тракта	малая	высокая	слабая при наличии блоков цифровой обработки и формирования сигнала
Полоса пропускания	средняя	широкая	широкая
Возможность каскадирования	малая	высокая	без ограничений

Анализ показывает, что линейность и функционально-энергетические показатели усилителя мощности, как системы, в значительной степени определяются уровнем нелинейных искажений основного усилителя мощности. Повышенную эффективность линеаризации обеспечивают методы, основанные на компенсации нелинейных искажений в тракте усиления мощности.

Во *второй главе* разработаны и исследованы методы параметрической оптимизации структур широкополосных усилителей мощности высокой частоты с компенсацией интермодуляционных искажений и минимизированными энергетическими потерями.

В первом разделе для класса широкополосных УМ с цепочечной структурой (рисунок 1) разработан метод повышения линейности, основанный на автокомпенсации интермодуляционных искажений.

Применительно к базовой структуре, определена достигаемая в результате автокомпенсации линейность по интермодуляционным продуктам J -го порядка:

$$IP_{\text{вых}} J = IP_{\text{вых}} J_k + Q_J / (J-1)^{-\Delta} (J-1), \quad (1)$$

где $IP_{\text{вых}} J_k$ - параметр линейности базового УМ в дБм;

Q_J - величина подавления интермодуляционной составляющей J -го порядка с учетом амплитудного (A) и фазового разбаланса (φ):

Δ - сопутствующие потери сигнала в тракте с компенсацией, дБ.

$$Q_J = -10 \lg \left\{ 1 + (1 + A)^2 - 2(1 + A) \cos \varphi \right\};$$

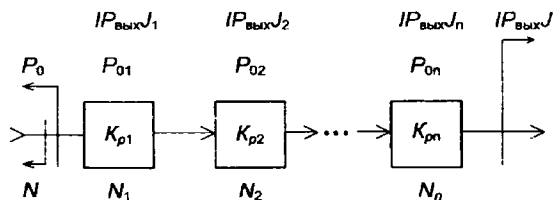


Рисунок 1 - Структура УМ с цепочечным соединением звеньев

Во втором разделе для класса широкополосных УМ с прямой связью (рисунок 2) разработан метод повышения линейности, учитывающий нелинейность вспомогательного усилителя (K_2) и потери в цепях компенсации при $K_1 = K_2 = K$.

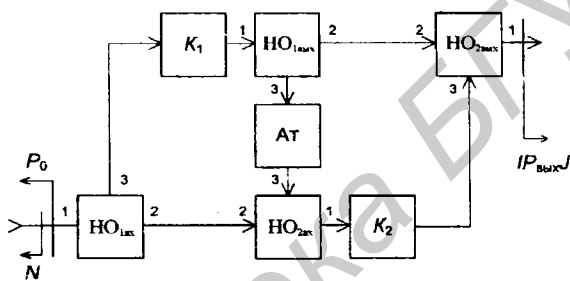


Рисунок 2 - Структура УМ с прямой связью

Определены линейность структуры и выходная мощность с учетом точности поддержания амплитудно-фазового баланса Q в ее сечениях и коэффициентов передачи плеч направленных ответвителей (НО):

$$IP_{\text{вых}J} = IP_{\text{вых}J_1} - 20 \lg \text{НО}_{1\text{вых}1-2} \text{НО}_{2\text{вых}2-1} + Q/(J-1); \quad (2)$$

$$P_{\text{вых птв}} = P_{\text{вых птв}1} \text{НО}_{1\text{вых}1-2}^2 \text{НО}_{2\text{вых}2-1}^2 + P_{\text{вых птв}2} \text{НО}_{2\text{вых}3-1}^2. \quad (3)$$

Определены условия, минимизирующие уменьшение коэффициента передачи в структуре, и определено максимальное значение передачи УМ с прямой связью:

$$T = 0,385K. \quad (4)$$

В третьем разделе для класса широкополосных УМ с целью предсказаний (рисунок 3) разработан метод повышения линейности, основанный на взаимной компенсации интермодуляционных искажений основного (K_2) и вспомогательного (K_1) усилителей.

Определены условия компенсации интермодуляционных искажений J -го порядка:

$$K_{\text{пред}}^{(J)} = \left(\text{НО}_{\text{вх}1-2} \text{НО}_{\text{вых}2-1} - \text{НО}_{\text{вх}1-3} K_1 \text{АТ} \text{НО}_{\text{вых}3-1} \right) \cdot K_2^{(J)} \quad (5)$$

и линейность УМ, реализуемая в результате использования предсказывающей цепи:

$$IP_{\text{вых}}^J = IP_{\text{вых}}^J K_2 + Q_J / (J-1), \quad (6)$$

где АТ – коэффициент передачи аттенюатора;

Q_J – степень подавления составляющих искажений J -го порядка, дБ.

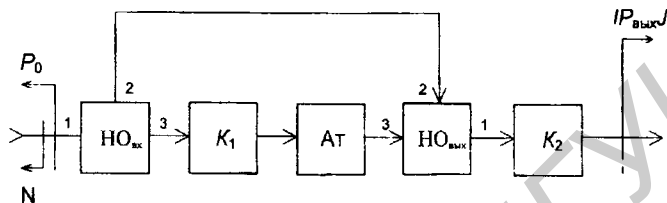


Рисунок 3 - Структура УМ с цепью предсказаний

Полученные результаты позволяют сформулировать научно обоснованные требования к линейности и функционально-энергетическим характеристикам УМ, образующих структуру.

В *третьей главе* разработан и исследован метод многопараметрической оптимизации звеньев широкополосных транзисторных усилителей мощности высокой частоты по параметрам линейности и функционально-энергетическим характеристикам.

В первом разделе проведен анализ влияния типа транзисторов на показатели качества высокочастотных УМ. В таблице 2 приведены результаты этих исследований.

Таблица 2 - Сравнение свойств транзисторов

Тип транзистора	Коэффициент усиления ($P_{\text{вых}} = 10 \text{ Вт}$, $f = 1 \text{ ГГц}$)	Напряжение питания	Линейность ($P_{\text{вых}} = 10 \text{ Вт}$, $f = 1 \text{ ГГц}$)	Максимальная рабочая частота	КПД ($P_{\text{вых}} = 10 \text{ Вт}$, $f = 1 \text{ ГГц}$)
Si BJT	< 6.5 дБ	26 В	IM3 < 30 дБ	< 2 ГГц	< 35%
MOSFET	< 12 дБ	> 26 В	IM3 < 35 дБ	< 3 ГГц	< 50%
GaAs MESFET	< 13 дБ	12 В	IM3 < 40 дБ	> 2 ГГц	< 40%
GaAs pHEMT	< 10 дБ	8 В ... 12 В	IM3 < 40 дБ	> 2 ГГц	< 35%
GaAs HBT	< 14 дБ	8В ... 26В	IM3 < 40 дБ	> 2 ГГц	< 45%
SiC MESFET	< 15 дБ	< 48 В	IM3 < 35 дБ	> 4 ГГц	< 45%
GaN HEMT	< 17 дБ	< 48 В	IM3 < 45 дБ	> 12 ГГц	< 50%

Во втором разделе исследовано влияние принципа построения на функционально-энергетические характеристики и линейность типовых схем широкополосных усилителей мощности высокой частоты. Получены аналитические выражения коэффициента усиления ($K_u(p)$), к.п.д. (η) и уровней ослабления интермодуляционных искажений второго ($IM2$) и третьего ($IM3$) порядка для УМ:

с корректирующими цепями (КЦ):

$$\left\{ \begin{array}{l} K_u(p) = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{2SR_n R_3}{(R_n + R_3)(1 + a_1 p + a_2 p^2 + a_3 p^3)}; \\ \eta_{\text{КЦ}} = \frac{P_1}{P_0} = \frac{\alpha_1(\theta)}{2\alpha_0(\theta)\left(1 + \frac{e_{\text{ост}}}{K_u U_{\text{вх}}}\right)}; \\ IM2 = 20 \lg \left(\frac{U_{\omega_1 - \omega_2}}{U_{\text{вых}}} \right) = 20 \lg \left(\frac{K_1^{(2)} U_{\text{вх}}}{K_1} \right); \\ IM3 = 20 \lg \left(\frac{U_{2\omega_1 - \omega_2}}{U_{\text{вых}}} \right) = 20 \lg \left(\frac{0.75 K_1^{(3)} U_{\text{вх}}^2}{K_1} \right), \end{array} \right. \quad (7)$$

(где $K_1^{(i)} = \frac{U_{\text{вых}}^{(i)}(U_{\text{вх}})}{i!} \Big|_{U_{\text{вх}}=U_{\text{вх1}}} = \frac{2R_n R_3 AB! (U_{\text{вх1}})^{B-i}}{i!(1 + a_1 p + a_2 p^2 + a_3 p^3)(R_n + R_3)(B-i)!}$ -

полиномиальные коэффициенты выходного отклика УМ с учетом параметров A и B , аппроксимирующих крутизну вольт-амперной характеристики выбранного транзистора;

$p = j\omega/\omega_n$ - оператор;

$U_{\text{вых}}^{(i)}(U_{\text{вх}})$ - производная i -го порядка;

$U_{\text{вх1}} = E_c + (1 - \cos(\theta))U_{\text{вх}}$ - напряжение сигнала в затвор или базу активного звена;

S - крутизна характеристики активного звена);

с отрицательной обратной связью (ООС):

$$\left\{ \begin{array}{l} K_u = 20 \lg \left(\frac{2}{\Sigma} (SR_{\text{об}} - 1) \right); \quad \Sigma = 2 + SR_{\text{вых}} + \frac{R_{\text{об}}}{R_{\text{вых}}}; \\ \eta_{\text{ООС}} = \frac{P_1}{P_0} = \frac{\alpha_1(\theta)}{2\alpha_0(\theta) \left(1 + \frac{e_{\text{ост}}}{2U_{\text{вх}}(SR_{\text{об}} - 1)/\Sigma} \right)}; \end{array} \right. \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{aligned} K_1 &= \frac{U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}})|_{U_{\text{ВХ}}=U_{\text{ВХ1}}}}{1!} = R_1 AB(U_{\text{ВХ1}})^{(B-1)} - 1, \quad \text{при } i=1 \\ K_1^{(i)} &= \frac{U_{\text{ВЫХ}}^{(i)}(U_{\text{ВХ}})|_{U_{\text{ВХ}}=U_{\text{ВХ1}}}}{i!} = \frac{R_1 AB! (U_{\text{ВХ1}})^{(B-i)}}{i!(B-i)!}, \quad \text{при } i \geq 2; \end{aligned} \right.$$

с распределенным усилением (УРУ):

$$\left\{ \begin{aligned} K_u &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Z_1^c Z_2^c}{1 + \frac{Z_1^c}{4Z_2^c}}} \sum_{k=1}^N S_k \cdot e^{-\left\{ [2(N-k)+1] \frac{\gamma_c}{2} + (2k-1) \frac{\gamma_c}{2} \right\}}; \\ \eta_{\text{УРУ}} &= \frac{P_1}{P_0} = \frac{\gamma}{4 \left(1 + \frac{2}{S \alpha_1 \rho_{\text{ВЫХ}} n} \right)}; \\ K_1^{(i)} &= \frac{U_{\text{ВЫХ}}^{(i)}(U_{\text{ВХ}})|_{U_{\text{ВХ}}=U_{\text{ВХ1}}}}{i!} = \frac{A \cdot \sqrt{Z_1^c Z_2^c} \cdot e^{-\frac{\gamma_c}{2}}}{2 \cdot i!} \sum_{k=1}^N e^{\left(\frac{\gamma_c}{2} - k\gamma_c \right)} B^{-(N-k)\gamma_c} \times \\ &\times (B-i+1) \cdot \left[\frac{U_{\text{ВХ1}}}{\sqrt{1 + \frac{Z_1^3}{Z_2^3}}} \right]^{(B-i)} \left(\frac{1 - \cos(\theta)}{\sqrt{1 + \frac{Z_1^3}{Z_2^3}}} \right)^i, \end{aligned} \right. \quad (9)$$

(где $Z_1^3, Z_2^3, Z_1^c, Z_2^c$ – последовательные и параллельные сопротивления входной и выходной линий;

γ – постоянная распространения).

Проведено моделирование амплитудно-частотных характеристик (рисунок 4), к.п.д. (рисунок 5) и параметров ослабления интермодуляционных продуктов второго и третьего порядков в функции угла отсечки (рисунок 6).

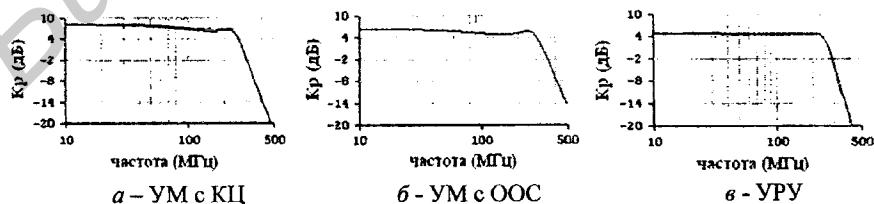


Рисунок 4 - Результаты моделирования амплитудно-частотных характеристик типовых широкополосных звеньев УМ

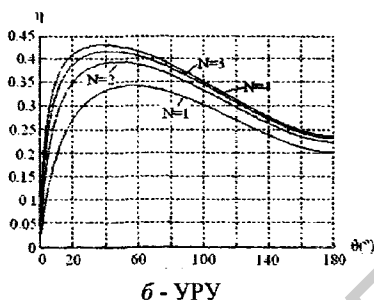
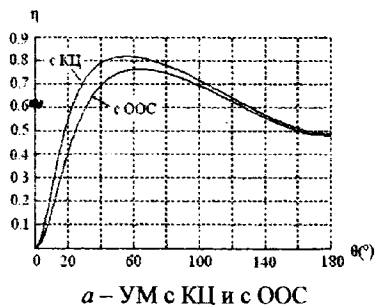


Рисунок 5 - Режимная зависимость к.п.д. типовых широкополосных звеньев УМ

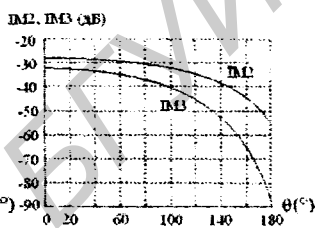
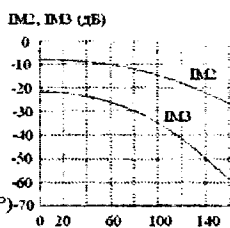
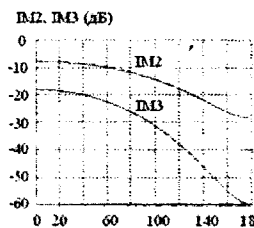


Рисунок 6 - Зависимость ослабления интермодуляционных искажений второго и третьего порядка от режима работы

В таблице 3 приведены результаты сравнительного анализа характеристик типовых схем широкополосных согласованных каскадов усиления мощности высокой частоты.

Таблица 3 - Свойства типовых широкополосных УМ высокой частоты

Тип усилителя	Достоинства	недостатки
С корректирующими цепями на входе и выходе транзистора	Наибольший коэффициент усиления по мощности, наименьший коэффициент шума, высокий к.п.д.	Полоса ограничена, высокий КСВН, низкая линейность, большая неравномерность АЧХ
С отрицательной обратной связью	Равномерная амплитудно-частотная характеристика, хорошая линейность	Полоса ограничена, пониженная выходная мощность
С распределенным усилением	Высокая равномерность амплитудно-частотной характеристики, сверхширокая полоса усиливаемых частот, пониженная чувствительность к сигнальному и нагрузочному импедансам, повышенная выходная мощность, высокая идентичность фазочастотных характеристик	Пониженный коэффициент усиления, пониженный к.п.д.

Полученные результаты показали, что оптимальным типом построения широкополосных транзисторных УМ высокой частоты с повышенной линейностью, стабильностью и широкополосностью передаточных характеристик и заданными энергетическим параметрами является усилитель с распределенным усилением (УРУ) на полевых транзисторах.

В *четвертой главе* разработан и исследован многофакторный структурно-параметрический метод повышения линейности широкополосных транзисторных усилителей мощности высокой частоты, основанный на использовании принципа распределенного усиления, оптимизации типов, параметров и режимов работы активных элементов, обеспечивающий комплексную реализацию заданных характеристик тракта, включая выходную мощность, коэффициент передачи, полосу пропускания, параметры нелинейности второго и третьего порядков, к.п.д., входное и выходное сопротивление.

В рамках первого раздела проведен анализ транзисторного N каскадного усилителя мощности с распределенным усилением с учетом режима работы активных элементов:

$$\text{коэффициент усиления по мощности} \quad K_p = |K_U|^2 = \frac{N^2 S Z_3^c Z_c^c}{4}; \quad (10)$$

$$\text{коэффициент шума} \quad NF = 1 + \frac{4\gamma}{N Z_3^c S} \left(\frac{\sin \frac{\varphi}{2}}{\frac{\varphi}{2}} \right)^2 + N Z_3^c \frac{\delta \omega^2 C_{3н}^2}{3 S^2}; \quad (11)$$

$$\text{выходная мощность} \quad P_1 = \frac{S^2 n^2 \rho_{\text{вых}} (E_c' + U_{\text{вх}} (1 - \cos(\theta)))^2}{8}; \quad (12)$$

$$\text{и к.п.д.} \quad \eta = \frac{\alpha_1(\theta)}{4\alpha_0(\theta) \left(1 + \frac{2e_{\text{ост}}}{S U_{\text{вх}} \rho_{\text{вых}} n} \right)}, \quad (13)$$

где Z_3^c и Z_c^c – волновые сопротивления затворной и сточной линий УРУ;

φ – фазовая задержка передающих линий УРУ;

γ – параметр, зависящий от напряжения смещения;

δ – коэффициент шума затвора;

$e_{\text{ост}}$ – остаточное напряжение транзистора активного звена;

На рисунке 9 приведены зависимости выходной мощности (а) и к.п.д. (б) от режима работы УРУ, выполненного на четырех мощных МДП транзисторах КП907А.

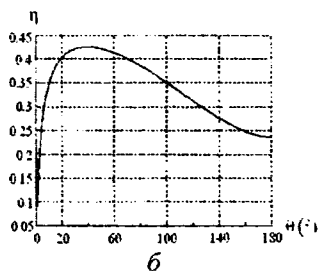
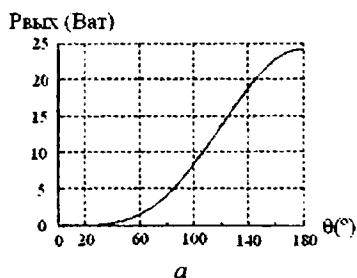


Рисунок 9 – Зависимости выходной мощности и к.п.д. от режима работы УРУ, выполненного на мощных МДП транзисторах КП907А

В рамках второго раздела рассмотрены вопросы оптимизации режима работы транзистора в УРУ, проведено моделирование эффекта линейризации передаточной характеристики в УРУ, выполненном на мощном МДП транзисторе КП907А. На рисунке 10 приведены зависимости нелинейных гармонических (а) искажений и ослабления интермодуляционных продуктов (б) от режима работы УРУ, выполненного на МДП транзисторах КП907А.

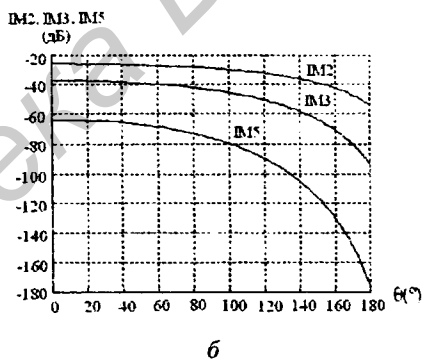
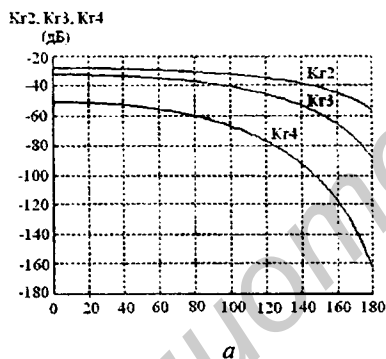
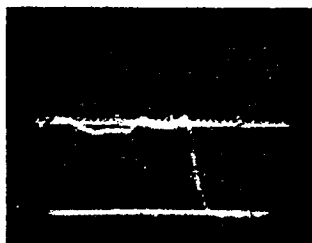
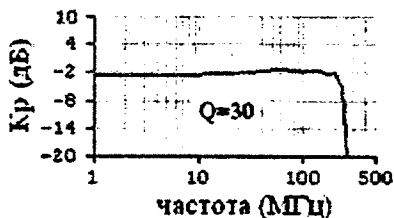


Рисунок 10 – Зависимости нелинейных гармонических искажений и ослабления интермодуляционных продуктов от режима работы УРУ

В рамках третьего раздела проведен синтез, оптимизация, моделирование и экспериментальные исследования передающих линий с потерями для усилителя мощности с распределенным усилением. Установлено, что линии с высокой добротностью индуктивных элементов ($Q=100$) обладают повышенной чувствительностью при небалансе волнового и терминального сопротивления R , отклонениях, вносимых в линию емкостей, и пониженной развязкой между портами подключения активных элементов. У линий с пониженной добротностью индуктивных элементов ($Q=10$) велики потери передачи. Оптимальное значение добротности индуктивных элементов линии составляет 25...35 единиц (рисунок 11).



а - Результаты моделирования АЧХ

б - Результат измерения АЧХ

Рисунок 11 - Результаты моделирования и экспериментальных исследований амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) передающей линии с добротностью индуктивных элементов $Q=30$

В рамках четвертого раздела рассмотрены вопросы синтеза и разработки транзисторных УМУ с распределенным усилением.

На рисунке 12 приведен общий вид УМУ, выполненного на мощных МДП транзисторах КП907А.

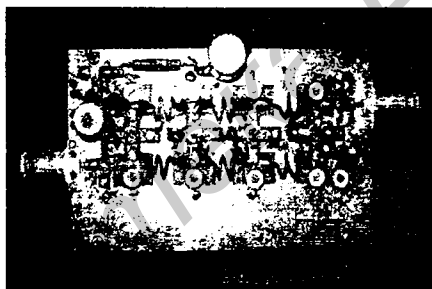


Рисунок 12 — Общий вид УМУ на МДП транзисторах КП907А

Разработанный четырехкаскадный УМУ при напряжении источника питания +28 В обеспечивает выходную мощность 12 Вт в 50-омном тракте в полосе 10...230 МГц, коэффициент усиления 11 дБ с неравномерностью ± 1 дБ и параметрами ослабления интермодуляционных искажений третьего порядка минус 45 дБ.

На рисунке 13 приведен общий вид пятикаскадного УМУ, выполненного на GaAs полевых транзисторах 3П602А.

Разработанный пятикаскадный УМУ при напряжении источника питания +8 В обеспечивает выходную мощность 4,5 Вт в 50-омном тракте в полосе 10...570 МГц, коэффициент усиления 10 дБ с неравномерностью ± 1 дБ и параметрами ослабления интермодуляционных искажений третьего порядка минус 47 дБ. Использование в структуре GaAs полевых транзисторов 3П910Б позволяет повысить выходную мощность до 8 Вт при аналогичных передаточных характеристиках.

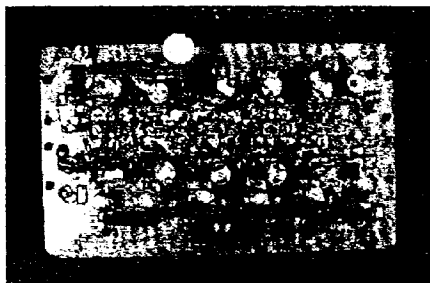


Рисунок 13 – Общий вид УРУ на GaAs полевых транзисторах 3П602А

В приложениях представлены акты внедрения результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты

1. На основе анализа существующих структурных методов повышения линейности передаточных характеристик высокочастотных трактов усиления мощности разработаны и исследованы методы параметрической оптимизации структур цепочечного вида, с прямой связью и цепью предьскажений, обеспечивающие компенсацию интермодуляционных искажений второго и третьего порядков и минимизацию энергетических потерь. Получены решающие правила, максимизирующие коэффициент передачи усилительных структур и аналитические выражения, позволяющие определить влияния точности выполнения условий компенсации по амплитуде и фазе на эффективность линейризации передаточных характеристик широкополосных усилителей мощности высокой частоты [1-А, 5-А, 7-А, 8-А].

2. На основе анализа существующих параметрических методов повышения линейности передаточных характеристик высокочастотных трактов усиления мощности разработан и исследован метод многопараметрической оптимизации звеньев широкополосных транзисторных усилителей мощности высокой частоты по параметрам линейности и функционально-энергетическим характеристикам. Установлено, что оптимальным типом построения широкополосных масштабирующих звеньев с повышенной линейностью, стабильностью и широкополосностью передаточных характеристик и заданными энергетическим параметрами для усилительных структур с компенсацией интермодуляционных искажений является усилитель с распределенным усилением на полевых транзисторах [3-А].

3. Разработан и исследован многофакторный структурно-параметрический метод повышения линейности широкополосных транзисторных усилителей мощности высокой частоты, основанный на использовании принципа распределенного усиления, оптимизации типов, параметров и режимов ра-

боты активных элементов, обеспечивающий комплексную реализацию заданных характеристик тракта, включая выходную мощность, коэффициент передачи, полосу пропускания, параметры нелинейности второго и третьего порядков, к.п.д., входное и выходное сопротивление. С использованием разработанного метода синтезированы транзисторные усилители мощности МВ-ДМВ диапазона с выходной мощностью единицы и десятки Ватт и пониженными на 8 – 14 дБ по сравнению с аналогами интермодуляционными искажениями [2-А, 4-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Предлагаемые структурно-параметрические методы повышения линейности широкополосных транзисторных усилителей мощности высокой частоты могут быть использованы для разработки трактов усиления мощности МВ-ДМВ диапазона с улучшенными интермодуляционными характеристиками [3-А, 4-А, 6-А].

2. Практическое применение разработок обеспечивает улучшение технических характеристик передающих трактов радиотехнических систем различного назначения и способствует решению проблемы электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры [4-А, 6-А].

3. Математическая модель усилителя мощности с распределенным усилением с заданными функционально-энергетическими характеристиками представляет теоретическую базу для синтеза тракта с адаптивным линейризатором [4-А, 9-А, 10-А].

4. Научные результаты были использованы при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в ООО «Техносоюз-проект» и УП «Сенсор – плюс» по созданию линейных радиочастотных трактов усиления мощности.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1-А. Хан, Зен Хек. Оптимизация параметров делителей мощности в усилительных трактах с прямой связью / Зен Хек Хан, М.А. Катков, И. Ю. Малевич // Синтез, анализ и диагностика электронных цепей. Сборник Ульяновского государственного технического университета. – 2008. – Вып. 6. – С. 107-110.

2-А. Хан, Зен Хек. Синтез оптимизация передающих линий для усилителя мощности с распределенным усилением / Зен Хек Хан, И. Ю. Малевич // Доклады БГУИР. – 2009. – № 7. – С. 12-18.

3-А. Хан, Зен Хек. Исследование влияния принципа построения на функционально-энергетические характеристики широкополосных усилителей мощности / Зен Хек Хан, И. Ю. Малевич // Доклады БГУИР. – 2009. –

4-А. Хан, Зен Хек. Усилитель мощности с распределенным усилением на МДП транзисторах / Зен Хек Хан, И. Ю. Малевич // Сборник научных статей Военной академии Республики Беларусь. – 2009. – № 17. – С. 84-88.

Материалы конференций

5-А. Хан, Зен Хек. Эффективность линейризации передаточной характеристики цепочечного усилительного тракта / Зен Хек Хан, И. Ю. Малевич // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций: материалы IV Междунар. науч.-тех. конф. студентов, аспирантов, и ученых, Севастополь, 21-25 апреля 2008 г./ СевНТУ; редкол.: Ю.Б. Гимпилевич [и др]. – Севастополь, 2008. - С. 63.

6-А. Хан, Зен Хек. Усилитель мощности для потративных радиопередающих трактов / Зен Хек Хан, А.Л. Матюшков, И. Ю. Малевич // Современные средства связи: материалы XIII – Международ. науч.-тех. конф., Минск, 7-9 октября 2008 г./ Колледж связи; редкол.: М.А. Баркун [и др]. – Минск, 2008. - С. 69.

7-А. Хан, Зен Хек. Оптимизация параметров делителей мощности в усилительных трактах с прямой связью / Зен Хек Хан, М.А. Катков, И.Ю. Малевич // Современные средства связи: материалы XIII – Международ. науч.-тех. конф., Минск, 7-9 октября 2008 г./ Колледж связи; редкол.: М.А. Баркун [и др]. – Минск, 2008. - С. 46.

8-А. Хан, Зен Хек. Анализ влияния потерь в цепи компенсации на выходную мощность структуры с прямой связью / Зен Хек Хан, И. Ю. Малевич // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций: материалы V Междунар. науч.-тех. конф. студентов, аспирантов, и ученых, Севастополь, 20-25 апреля 2009 г./ СевНТУ; редкол.: Ю.Б. Гимпилевич [и др.]. – Севастополь, 2009. - С. 101.

9-А. Хан, Зен Хек. Моделирование нелинейных искажений в усилителе с распределенным усилением на МДП транзисторах / Зен Хек Хан // Современные средства связи: материалы XIV – Международ. науч.-тех. конф., Минск, 29-30 сентября 2009 г./ Колледж связи; редкол.: М.А. Баркун [и др]. – Минск, 2009. - С. 60.

10-А. Хан, Зен Хек. Анализ моделирования функционально-энергетических характеристик усилителя мощности с распределенным усилением / Зен Хек Хан, И. Ю. Малевич // Современные средства связи: материалы XIV – Международ. науч.-тех. конф., Минск, 29-30 сентября 2009 г./ Колледж связи; редкол.: М.А. Баркун [и др]. – Минск, 2009. - С. 61.

Осан Зен Хек

Хан Зен Хек

СТРУКТУРНА-ПАРАМЕТРЫЧНЫЯ МЕТАДЫ ПАВЯЛІЧЭННЯ
ЛІНЕЙНАСЦІ ШЫРАКАПАЛАСАВЫХ ТРАНЗІСТАРНЫХ
УЗМАЦІЯЛЬНІКАЎ МАГУТНАСЦІ ВЫСОКАЙ ЧАСТАТЫ

Ключавыя словы: шыракапаласавы транзістарны узмацняльнік магутнасці высокай частаты, структурна-параметрычныя метады, лінейнасць перадавальнай характарыстыкі, функцыянальна-энергетычныя характарыстыкі, нелінейныя скажэнні, узмацняльнік з размеркавальным узмацненнем.

Мэта работы: распрацоўка і даследаванне структурна-параметрычных метадаў павялічэння лінейнасці перадавальных характарыстык шыракапаласавых транзістарных узмацняльнікаў магутнасці высокай частаты з дадзенымі функцыянальна-энергетычнымі характарыстыкамі.

Аб'ектам даследавання з'яўляюцца шыракапаласавыя транзістарныя узмацняльнікі магутнасці высокай частаты.

Прадметам даследавання з'яўляюцца метады павялічэння лінейнасці шыракапаласавых транзістарных узмацняльнікаў магутнасці высокай частаты.

Метады даследавання: метады аналіза лінейных і нелінейных электрычных ланцугоў, эксперыментальныя метады даследавання шыракапаласавых транзістарных узмацняльнікаў магутнасці.

Асноўныя вынікі працы: атрыманы новыя тэарытычныя і эксперыментальныя вынікі ў вобласці структурна-параметрычных метадаў павялічэння лінейнасці шыракапаласавых транзістарных узмацняльнікаў магутнасці высокай частаты, уключаючы комплекс працэдур структурнай і схематэхнічнай аптымізацыі, выбару кампанентнай базы і рэжымаў працы актыўных кампанентаў, забяспечваючых комплексную рэалізацыю дадзеных характарыстык тракта, у тым ліку выхадной магутнасці, кафіцыенту перадачы, паласы прапускання, параметраў нелінейнасці другога і трэцяга парадкаў, к.п.д., што ў злучанасці дазваляе вырашыць праблему праектавання шыракапаласавых узмацняльнікаў дыяпазона МХ-ДМХ з выхадной магутнасцю адзінкі і дзясяткі В атаў і зніжанымі на 8–14 дБ у параўнанні з аналагамі ўзроўнем інтэрмодулюючых скажэнняў.

Ступень ужывання: навуковыя рэзультаты былі ўжыты пры правядзенні навукова-даследчых ды вопытна-канструктарскіх прац па распрацоўке лінейных радыёчастотных трактаў узмацнення магутнасці.

Вобласць ужывання: навукова-даследчыя ды вопытна-канструктарскія працы па распрацоўке лінейных радыёчастотных трактаў узмацнення магутнасці, вытворчасць радыёэлектроннай апаратуры і прыбораў.

Хан Зен Хек

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЛИНЕЙНОСТИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ТРАНЗИСТОРНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Ключевые слова: широкополосный транзисторный усилитель мощности высокой частоты, структурно-параметрические методы, линейность передаточной характеристики, функционально-энергетические характеристики, нелинейные искажения, усилитель с распределенным усилением.

Цель работы: разработка и исследование структурно-параметрических методов повышения линейности передаточных характеристик широкополосных транзисторных усилителей мощности высокой частоты с заданными функционально-энергетическими характеристиками.

Объектом исследования являются широкополосные транзисторные усилители мощности высокой частоты.

Предметом исследования являются методы повышения линейности широкополосных транзисторных усилителей мощности высокой частоты.

Методы исследования: методы анализа линейных и нелинейных электрических цепей, экспериментальные методы исследования широкополосных транзисторных усилителей мощности.

Основные результаты работы: получены новые теоретические и экспериментальные результаты в области структурно-параметрических методов повышения линейности широкополосных транзисторных усилителей мощности высокой частоты, включающие комплекс процедур структурной и схмотехнической оптимизации, выбора компонентной базы и режимов работы активных элементов, обеспечивающие комплексную реализацию заданных характеристик тракта, в том числе выходной мощности, коэффициента передачи, полосы пропускания, параметров нелинейности второго и третьего порядков, к.п.д., что в совокупности позволяет решить проблему проектирования широкополосных усилителей диапазона МВ-ДМВ с выходной мощностью единицы и десятки Ватт и пониженным на 8 – 14 дБ по сравнению с аналогами уровнем интермодуляционных искажений.

Степень использования: научные результаты были использованы при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию линейных радиочастотных трактов усиления мощности.

Область применения: научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию линейных радиочастотных трактов усиления мощности, производство радиоэлектронной аппаратуры и приборов.

SUMMARY

Han Jong Hyok

STRUCTURE-PARAMETRIC METHODS FOR LINEARITY INCREASING OF THE HIGH FREQUENCY BROADBAND TRANSISTOR POWER AMPLIFIER

Key words: broadband high frequency transistor power amplifier, structurally parametric methods, linearity of the transmissive characteristic, functional-energy characteristic, nonlinear distortion, distributed power amplifier.

Purpose: development and investigation of the structurally parametric method for transmissive characterization linearity increasing of the high frequency broadband transistor power amplifiers with specified functional-energy characterization.

Research object: high frequency broadband transistor power amplifier.

Research item: methods for linearity increasing of the high frequency broadband transistor power amplifier.

Research method: analytical methods of the linear and nonlinear electrical circuits, methods for research of the broadband transistor power amplifier.

Work main result: The obtained new theoretical and experimental result in the structurally-parametric methods area for linearity increasing of the high frequency broadband transistor power amplifier, which include complex of structural and circuit optimization procedure, choice of an component base and operating of the active element mode, which ensure complex realization of desired characteristics of path, include power, transfer constant, pass band, nonlinear parameters on second and third order, coefficient., which in the aggregate permit to solve problems of VHF-UHF broadband power amplifier design with power one and scores of watt and deferred 8 – 14 dB in comparison with analog level of intermodulation distortion.

Degree of use: The scientific results introduced for realization of research and development working for making of power amplifier's linear radio-frequency path.

Applications areas: research engineering and development activity for making of the linear radio power amplification path, manufacturing of radio-electronic equipment and devices.

Научное издание

Хан Зен Хек

**СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ
ЛИНЕЙНОСТИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ТРАНЗИСТОРНЫХ
УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ**

специальность 05.12.04 – радиотехника, в том числе системы и устройства
радиолокации, радионавигации и телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 02.03.2010.	Формат 60x84 ¹ / ₁₆ .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,4.
Уч.-изд. л. 1,2.	Тираж 60 экз.	Заказ 154.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровки, 6.