

На правах рукописи



**Бабанин Иван Геннадьевич**

**ПРОЦЕДУРА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФИЛЬТРОВ ЧАСТОТНОЙ СЕЛЕКЦИИ С  
УЧЕТОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В РАДИОПРИЁМНЫХ  
УСТРОЙСТВАХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ РАДИОСИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ  
ИНФОРМАЦИИ**

05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Курск – 2018

Работа выполнена на кафедре космического приборостроения и систем связи  
ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук,  
старший научный сотрудник  
**Мухин Иван Ефимович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО  
«Ярославский государственный университет  
им. П.Г. Демидова», доцент кафедры  
инфокоммуникаций и радиофизики  
**Приоров Андрей Леонидович**

кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО  
«Рязанский государственный радиотехнический  
университет», доцент кафедры радиотехнических  
устройств  
**Васильев Евгений Викторович**

Ведущая организация: **АО «Концерн «Созвездие» (г. Воронеж)**

Защита диссертации состоится **«15» февраля 2019г.** в **12<sup>00</sup>** часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.211.04 на базе ФГБОУ ВО «Рязанский  
государственный радиотехнический университет» по адресу: **390005, г. Рязань,  
ул. Гагарина, д.59/1.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета ФГБОУ ВО  
«Рязанский государственный радиотехнический университет» и на сайте  
[www.rsreu.ru](http://www.rsreu.ru).

Автореферат разослан «29» ноября 2018 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



доктор технических наук  
**Овечкин Геннадий Владимирович**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Современные радиосистемы передачи информации работают в условиях жесткого дефицита частотного ресурса. Организация доступа к услугам сети абонентов многоканальной системы радиосвязи требует ограничения спектра сигнала для исключения взаимного влияния сигнала на сигналы других абонентов этой же сети и других радиосистем передачи информации. При постоянно возрастающих требованиях к цифровым радиосистемам передачи информации по скорости передачи данных возникает необходимость в повышении спектральной эффективности ( $R/\Delta F$ , где  $R$  – скорость передачи данных,  $\Delta F$  – занимаемая полоса частот системой связи). Необходимо отметить, тот факт, что использование систем с высокой спектральной эффективностью из-за нелинейности телекоммуникационных трактов, искажений, вносимых средой распространения сигнала, приводит к снижению показателей энергетической эффективности ( $E_b/N_0$ , где  $E_b$  – энергия сигнала (Вт/бит/с),  $N_0$  – спектральная плотность мощности шума (Вт/Гц)) радиосистемы. Одним из способов решения этих проблем является применение сигналов со сложной частотно-временной структурой и многопозиционными видами модуляции.

Так, наиболее перспективными на данный момент в радиосистемах передачи информации являются следующие типы модуляций: квадратурно-амплитудная с позиционностью 64 (КАМ-64), КАМ-128, КАМ-512, КАМ-1024. Дальнейшая разработка радиоккомплексов с КАМ позиционностью 2048, 4096 и выше является крайне затруднительной в связи ярко выраженными, ранее не учитываемыми, потерями нешумового характера, вызванными неидеальностью амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик фильтров частотной селекции (ФЧС) радиоприёмного устройства. Так, согласно работам Мухина И.Е., Довбни В.Г., Oshimara, которые выявили и рассмотрели данную научную проблему, достоверный приём символов системой с ФЧС, имеющими неравномерность АЧХ более 3 дБ, практически невозможен при кратности модуляции более 8. Исходя из этого, стали актуальными исследования ФЧС при прохождении через них сигналов с КАМ различной позиционности в радиосистемах передачи информации.

**Цель и задачи исследования.** Целью работы является разработка процедуры проектирования фильтров частотной селекции, обеспечивающей минимизацию потерь нешумового характера при синтезе радиоприёмных устройств с высокими скоростями обмена данных в радиосистемах передачи информации.

Для достижения цели, необходимо решить следующие задачи:

- 1) проведение сравнительного анализа основных технологий высокоскоростных радиосистем передачи информации различного назначения;
- 2) классификация видов и анализ причин возникновения энергетических потерь в системах приёма и обработки радиосигналов, вывод модифицированного уравнения энергетического баланса с учетом потерь нешумового характера в фильтрах частотной селекции (эквивалентных энергетических потерь);
- 3) разработка математических моделей эквивалентных энергетических потерь в цифровых и аналоговых фильтрах частотной селекции, вызванных неравномерностью их амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик;

4) разработка имитационной модели энергетических потерь нешумового характера в фильтрах частотной селекции систем в целях определения адекватности разработанных математических моделей;

5) разработка аппаратно-программного комплекса по определению потерь нешумового характера в фильтрах частотной селекции радиоприемных устройств;

6) разработка процедуры проектирования фильтров частотной селекции с учетом энергетических потерь, вызванных неравномерностью АЧХ, ФЧХ.

**Объект исследования.** Фильтры частотной селекции радиоприёмных устройств высокоскоростных радиосистем передачи информации.

**Предмет исследования.** Процесс влияния неравномерности АЧХ, ФЧХ фильтров частотной селекции на достоверность приёма символов в цифровых радиосистемах с высокими кратностями модуляции.

**Методологические и теоретические основы исследования.** Проводимые исследования базируются на теории вероятностей, математической статистике, методах имитационного моделирования и статистической радиотехники.

**Научная новизна исследования.**

1) Получено уравнение энергетического баланса, учитывающее неравномерность АЧХ, ФЧХ фильтров частотной селекции радиоприёмных устройств.

2) Разработаны комплексные математические модели эквивалентных энергетических потерь нешумового характера, возникающих в радиотрактах радиосистем передачи информации, в зависимости от неравномерности АЧХ, ФЧХ и параметров сигналов со сложной частотно-временной структурой.

3) Разработана имитационная модель для определения потерь нешумового характера в ФЧС современных радиоприёмных устройствах с целью установления адекватности разработанных вышеприведенных математических моделей.

4) Разработана процедура проектирования фильтров частотной селекции, обеспечивающая минимизацию энергетических потерь, вызванных неравномерностью АЧХ, ФЧХ, в радиоприемных устройствах систем передачи информации.

**Основные научные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1) способ расчета дополнительных энергетических потерь в фильтрах частотной селекции, позволяющий учитывать их нелинейное возрастание в зависимости от увеличения кратности модуляции сигналов высокоскоростных радиосистем передачи информации, учитывающий неравномерности их амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик и отличающийся от известных учетом энергетических потерь нешумового характера, которые достигают 5 дБ только при прохождении сигнала;

2) процедура проектирования фильтров частотной селекции в соответствии со складывающейся электромагнитной обстановкой и реальным уравнением энергетического баланса радиолинии, отличающаяся от известных учетом дополнительных энергетических потерь, обусловленных неравномерностью амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик, что позволяет сформировать обоснованные требования к параметрам элементов радиоприемного устройства;

3) имитационная модель процесса генерирования и формирования, приема и демодуляции многопозиционных сигналов высокоскоростных радиосистем передачи информации с учетом реально модулирующих неравномерностей амплитудно-

частотной, фазо-частотной характеристик, позволяющая оценить степень адекватности способа расчета дополнительных энергетических потерь с точностью до 1,5%.

**Практическая ценность исследования.** Основным практическим результатом диссертационной работы является аппаратно-программный комплекс для определения эквивалентных энергетических потерь в цифровых и аналоговых фильтрах селекции при прохождении сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией различной позиционности, позволяющий производить процедуру проектирования фильтров частотной селекции при разработке радиосистем передачи информации.

**Реализация результатов работы.** Основные теоретические и практические результаты работы использованы в АО «Авиаавтоматика им. В.В.Тарасова» при выполнении плановой НИОКР и других проектов для определения направлений развития частотно-селективных трактов приёма и передачи высокоскоростной информации со сложными видами модуляции, что подтверждается соответствующим актом о внедрении, а также в учебном процессе кафедры космического приборостроения и систем связи ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет».

**Достоверность** полученных автором научных и практических результатов определяется:

- обоснованностью выбора исходных данных, основных допущений и ограничений при постановке частных задач исследования;
- соответствием расчетов с результатами имитационного моделирования, полученных лично автором;
- апробацией результатов исследований автора на всероссийских и региональных научно-практических конференциях.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях, фестивалях и семинарах различного уровня:

- 1-5– региональной научно-практической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций» (г. Курск, 2009-2013 гг.);
- I, II, III Всероссийской научно-практической конференции «Инфокоммуникации и информационная безопасность: состояние, проблемы и пути решения» (г. Курск, 2014-2016 гг.);
- I, II Всероссийской научно-практической конференции «Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения» (г. Курск, 2017-2018 гг.);
- Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 117 годовщине Дня радио, «Современные проблемы радиоэлектроники» (г. Красноярск, 2012 г.);
- Центральной региональной площадке III Всероссийского фестиваля науки (г. Курск, 2013 г.).

**Публикации.** По тематике исследований опубликовано 32 статьи, из них - 12 в журналах, входящих в перечень ВАК, 1 монография, получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад автора.** Основные результаты исследований получены автором самостоятельно. В работах, опубликованных в соавторстве, соискатель внёс

значительный вклад при постановке и решении задач, а также обобщении полученных результатов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы. Работа содержит 166 страницы, из них 149 страниц основного текста, 86 рисунков, 4 таблицы, 83 формулы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, определены практическая ценность и область применения результатов, приведены сведения по апробации работы и представлены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен анализ современного состояния и тенденций развития цифровых радиосистем передачи информации в области освоения новых частотных диапазонов и применения новых типов сигналов с целью выявления наиболее целесообразных способов решения проблемы роста скорости обмена данными между абонентами.

Так, для достижения необходимых скоростей в цифровых радиосистемах передачи информации используются сложные типы сигналов: КАМ-16, -32, -64, -128, -256, -512, -1024.

Несмотря на высокую спектральную эффективность современных и перспективных радиосистем передачи информации, они обладают достаточно низкой энергетической эффективностью, что требует исследований условий формирования энергетического баланса линии передачи информации с учетом факторов, ранее пренебрегаемых, а именно - энергетических потерь нешумового характера.

В этой связи обосновано модифицированное уравнение энергетического баланса. Оно получено путем введения в классическое уравнение дополнительных компонентов, не учитываемых ранее, - потерь за счет неравномерности амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик фильтров частотной селекции. С учётом введения дополнительных компонентов суммарные потери радиоприёмного тракта, входящие в состав модифицированного уравнения энергетического баланса, определяются выражением:

$$\begin{aligned} \Delta = & \Delta_{\text{АФУ}} + \Delta_{\text{ПСУ}} + \Delta_{\text{ДМУ}} + \Delta_{\text{ДТУ}} = \sum_i \Delta_{\text{ак}}^i (K_{\text{ш}}^i(f)) + \sum_v \Delta_{\text{мшу}}^v (K_{\text{ш}}^v(f)) + \sum_u \Delta_{\text{см}}^u (K_{\text{ш}}^u(f)) + \\ & + \Delta_{\text{фидер}} (K_{\text{ш}}(f)) + \Delta_{\text{антенна}} (K_{\text{ш}}(f)) + \sum_j \Delta_{\text{комм}}^j (K_{\text{ш}}^j(f)) + \sum_p \Delta_{\text{упч}}^p (K_{\text{ш}}) + \sum_e \Delta_{\text{атт}}^e (K_{\text{ш}}) + \\ & + \sum_r \Delta_{\text{пф}}^r (\delta_{\text{ачх}}) + \sum_t \Delta_{\text{пф}}^t (\delta_{\text{фчх}}) + \sum_k \Delta_{\text{гер}}^k (G_V^k(M)) + \Delta_{\text{свн}} (\delta_f) + \\ & + \Delta_{\text{свтч}} (\delta^0) + \Delta_{\text{увс}} (\delta_U) + \Delta_{\text{рас}} (\delta_{\text{ачх}}) + \Delta_{\text{омси}} (\delta_{\text{мси}}), \end{aligned} \tag{1}$$

где  $\Delta_{\text{ак}}^i$  – энергетические потери (ЭП) i-ого антенного коммутатора, обусловленные тепловыми шумами электронной природы (коэффициент шума  $K_{\text{ш}}^i$ );

$\Delta_{\text{мшу}}^v$  – ЭП в малозумящих усилителях (МШУ), обусловленные тепловым движением носителей заряда;

$\Delta_{\text{см}}^u$  – ЭП, обусловленные тепловыми шумами смесителей;

$\Delta_{\text{фидер}}$  – ЭП в высокочастотных фидерах, обусловленные тепловыми шумами;

$\Delta_{\text{антенна}}$  – ЭП в антенне, обусловленные шумами Джонсона;  
 $\Delta_{\text{комм}}^j$  – ЭП в j-м коммутаторе, обусловленные джонсоновским шумом;  
 $\Delta_{\text{упч}}^p$  – ЭП, обусловленные тепловыми шумами p-го усилителя промежуточной частоты;  
 $\Delta_{\text{атт}}^e$  – ЭП в d-м аттенюаторе, обеспечивающем заданный уровень сигнала на входе детектирующего устройства;  
 $\Delta_{\text{пф}}^r(\delta_{\text{ачх}})$  – эквивалентные энергетические потери (ЭЭП), обусловленные неравномерностью АЧХ r-го полосового фильтра;  
 $\Delta_{\text{пф}}^t(\delta_{\text{фчх}})$  – ЭЭП, обусловленные неравномерностью ФЧХ t-го полосового фильтра;  
 $\Delta_{\text{гет}}^k(G_V^k)$  – ЭЭП, обусловленные неидеальностью амплитудно-частотного спектра колебания k-го гетеродина;  
 $\Delta_{\text{свн}}(\delta_f)$  – ЭЭП, обусловленные погрешностью системы восстановления несущей частоты;  
 $\Delta_{\text{свтч}}(\delta^0)$  – ЭЭП, обусловленные погрешностью восстановления тактовой частоты ДМУ;  
 $\Delta_{\text{увс}}(\delta_U)$  – ЭЭП, обусловленные погрешностью поддержания уровня сигнала на входе ДТУ;  
 $\Delta_{\text{рас}}(\delta_{\text{ачх}})$  – ЭЭП, обусловленные рассогласованием форм АЧХ согласованного фильтра с сигналом;  
 $\Delta_{\text{омси}}(\delta_{\text{мси}})$  – ЭЭП, обусловленные остаточной межсимвольной интерференцией.

На основе обоснованного модифицированного уравнения энергетического баланса произведен сравнительный анализ численных значений компонентов, обусловленных неидеальностью параметров фильтров частотной селекции, входящих в состав радиоприёмных устройств радиосистем передачи информации с высокоскоростным обменом данными.

Данный анализ показал, что в последние десятилетия производителям удается снизить шумовые потери, входящие в уравнение энергетического баланса, за счет развития элементной базы, криогенных технологий, но, несмотря на это, на «первый план» выходят потери, вызванные неидеальностью параметров функциональных узлов, включающих ФЧС. Исходя из этого, необходимо исследовать нешумовые энергетические потери и произвести разработку процедуры проектирования ФЧС с учетом данного типа потерь.

Во **второй главе** с целью определения эквивалентных энергетических потерь в аналоговых и цифровых фильтрах частотной селекции при когерентном приёме сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией различной позиционности разработаны математические модели и процедура расчета фильтров частотной селекции при построении радиоприёмных устройств высокоскоростных радиосистем передачи информации. На основе разработанных моделей предложен способ расчета дополнительных энергетических потерь в фильтрах частотной селекции, учитывающий позиционность модуляции принимаемых сигналов в высокоскоростных линиях радиосистем передачи информации.

Доказано, что из-за неравномерности АЧХ и ФЧХ фильтров частотной селекции искажается форма сигнала на входе решающего устройства демодулятора, принимающего из аддитивной смеси когерентного сигнала и шума решение о принадлежности данного сигнала к той или иной области амплитудно-фазовой

плоскости. При этом качество приема зависит от степени согласования систем фильтров линейной части радиоприёмного тракта, в том числе линейной части демодулятора, с принимаемым сигналом. Возникающее приращение к вероятности ошибки на символ на выходе демодулятора из-за этого факта и будет характеризовать эквивалентные энергетические потери.

Условная вероятность безошибочного приема сигнала для одной сигнальной точки в амплитудно-фазовой плоскости выражается через функцию Крампа:

$$\Phi(h) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^h \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt, \quad (2)$$

где  $h$  – отношение сигнал-шум.

Условная вероятность безошибочного приема для различных сигнальных точек неодинакова. В таблице 1 представлены полученные условные вероятности безошибочного приема при статистически независимых сигнальных точках одного из четырех квадрантов амплитудно-фазовой плоскости, меняющейся в зависимости от кратности модуляции, где  $h = q_1 = U_1^2/\sigma^2$  – отношение сигнал-шум;  $\sigma^2$  – дисперсия шума,  $U_1$  – минимальное амплитудное значение сигнального вектора.  $L$  – число позиций сигналов в сигнальном пространстве,  $M$  – кратность модуляции.

Таблица 1 – Количество сигнальных точек с соответствующими им условными вероятностями безошибочного приема для сигналов с КАМ

Условная вероятность безошибочного приема	Количество точек	Переменный коэффициент, обозначающий количество точек в квадранте сигнального созвездия
КАМ-16, КАМ-64, КАМ-256, КАМ-1024, КАМ-4096		
$P_{bp}(q_1) = 0,25 \times (1 + \Phi(\sqrt{q_1}))^2$	4	H1
$P_{bp}(q_1) = 0,5 \times (1 + \Phi(\sqrt{q_1}) \times \Phi(\sqrt{q_1}))$	$4 \times (\sqrt{\frac{L}{4}} - 2)$	H2
$P_{bp}(q_1) = (\Phi(\sqrt{q_1}))^2$	$(\sqrt{\frac{L}{4}} - 2)^2$	H3
КАМ-32, КАМ-128, КАМ-512, КАМ-2048		
$P_{bp}(q_1) = 0,25 \times (1 + \Phi(\sqrt{q_1}))^2$	5	H1
$P_{bp}(q_1) = 0,5 \times (1 + \Phi(\sqrt{q_1}) \times \Phi(\sqrt{q_1}))$	$12 \times \sqrt{2^{(M-5)}} - 10$	H2
$P_{bp}(q_1) = (\Phi(\sqrt{q_1}))^2$	$\frac{L}{4} - 5 - (12 \times \sqrt{2^{(M-5)}} - 10)$	H3



На основе вышеприведенной таблицы и зависимости между средним и минимальным отношением сигнал-шум установлена зависимость вероятности безошибочного приема на символ от среднего отношения сигнал-шум:

$$P_{bp}(q) = \frac{4}{L} \times (N1 \times 0,25 \times (1 + \Phi(\sqrt{f(q)}))^2 + N2 \times 0,5 \times (1 + \Phi(\sqrt{f(q)})) \times \Phi(\sqrt{f(q)}) + N3 \times (\Phi(\sqrt{f(q)}))^2). \quad (3)$$

Дополнительно рассмотрены распространенные на практике случаи гармонических искажений АЧХ, ФЧХ в полосе пропускания:

$$A(\omega) = a_0 + a_1 \cos(\omega c), \quad (4)$$

где  $a_1$ ;  $\omega$  – амплитуда, циклическая частота гармонической неравномерности АЧХ соответственно;

$a_0$  – значение АЧХ идеального фильтра в полосе пропускания ( $a_0 > a_1$ );

$c$  – параметр, характеризующий периодичность искажений.

$$D(\omega) = e^{jB(\omega)} = e^{jbsin(\omega c)}, \quad (5)$$

где  $b$  – неравномерность ФЧХ фильтров частотной селекции (рад);

$\omega$  – циклическая частота гармонических искажений ФЧХ;

$c$  – коэффициент, характеризующий периодичность искажений.

Проигрыш в отношении сигнал-шум по мощности из-за взаимной несогласованности сигнала и фильтра составляет:

$$G_{ачх} = 1 + \frac{a_1^2}{2a_0^2}; \quad (6)$$

$$G_{фчх} = [J_0(b)]^{-2}, \quad (7)$$

где  $J_0$  – функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Выражения (6), (7) определяют энергетический проигрыш при приеме сигналов с КАМ фильтром с искаженными АЧХ, ФЧХ.

Показано, что физическое влияние этого проигрыша на демодуляцию сигналов с КАМ равносильно уменьшению отношения сигнал-шум на величину «G», а, следовательно, и увеличению вероятности ошибки на символ.

На базе полученных результатов получена аналитическая зависимость вероятности ошибки на символ при демодуляции сигналов с КАМ при заданной величине неравномерности АЧХ (ФЧХ):

для КАМ-16, КАМ-64, КАМ-256, КАМ-1024, КАМ-4096:

$$P_{osh}(q) = 1 - \frac{4}{L} \times (4 \times 0,25 \times (1 + \Phi(\sqrt{\frac{f(g)}{gA}}))^2 + 4 \times (\sqrt{\frac{L}{4}} - 2) \times 0,5 \times (1 + \Phi(\sqrt{\frac{f(g)}{gA}})) \times \Phi(\sqrt{\frac{f(g)}{gA}}) + (\sqrt{\frac{L}{4}} - 2)^2 \times (\Phi(\sqrt{\frac{f(g)}{gA}}))^2); \quad (8)$$

для КАМ-32, КАМ-128, КАМ-512, КАМ-2048:

$$P_{\text{osh}}(q) = 1 - \frac{4}{L} \times (5 \times 0,25 \times (1 + \Phi(\sqrt{\frac{f(g)}{g_A}}))^2 + (12 \times \sqrt{2^{(M-5)}} - 10) \times 0,5 \times (1 + \Phi(\sqrt{\frac{f(g)}{g_A}})) \times \Phi(\sqrt{\frac{f(g)}{g_A}}) + (\frac{L}{4} - 5 - (12 \times \sqrt{2^{(M-5)}} - 10)) \times (\Phi(\sqrt{\frac{f(g)}{g_A}}))^2). \quad (9)$$

Причем величина уменьшения среднего отношения сигнал-шум за счет влияния неравномерности АЧХ (ФЧХ) составляет:

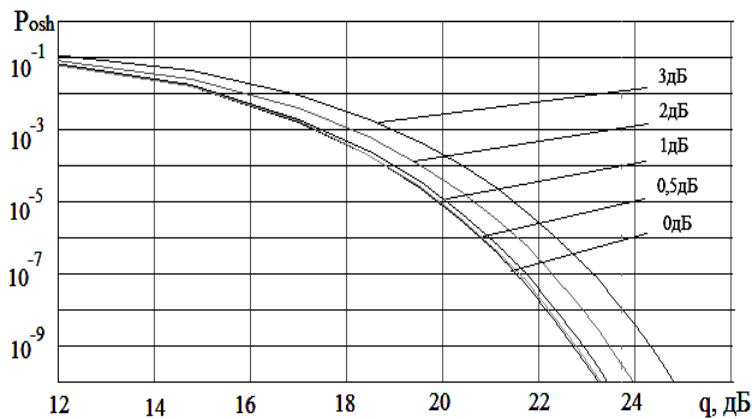
для КАМ-16, КАМ-64, КАМ-256, КАМ-1024, КАМ-4096:

$$g_A = 1 + ((2(\sqrt{\frac{L}{4}} - 1) + 1) - \frac{2(\sqrt{\frac{L}{4}} - 1) + 1}{G}); \quad (10)$$

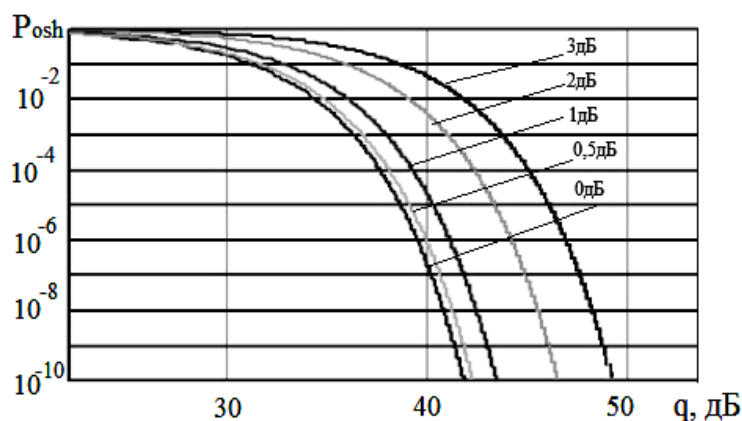
для КАМ-32, КАМ-128, КАМ-512, КАМ-2048:

$$g_A = 1 + (\sqrt{52 \cdot 2^{(M-5)} - 20 \cdot \sqrt{2^{(M-5)}} + 2} - \frac{\sqrt{52 \cdot 2^{(M-5)} - 20 \cdot \sqrt{2^{(M-5)}} + 2}}{G}). \quad (11)$$

На основе полученных результатов построены зависимости, представленные на рисунках 1-2.

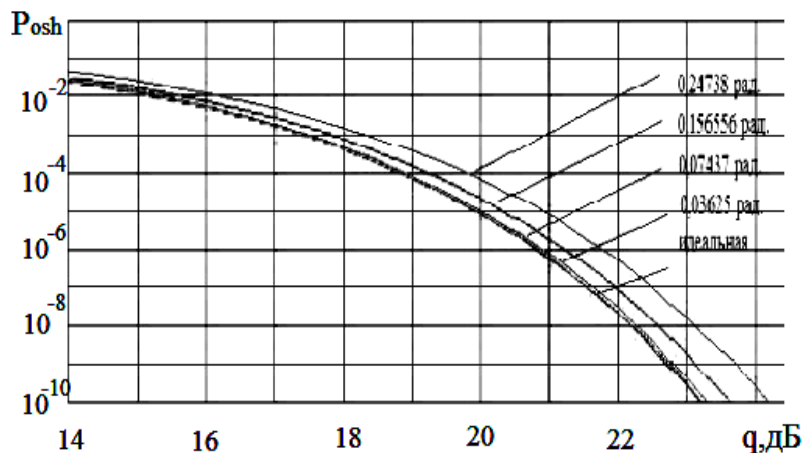


а)

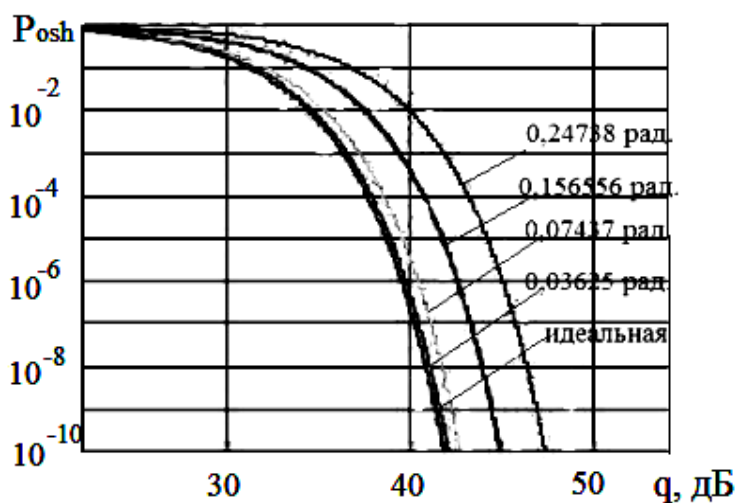


б)

Рисунок 1 – Зависимости вероятности ошибки на символ от среднего отношения сигнал-шум при заданных неравномерностях АЧХ для сигналов с а) КАМ-16, б) КАМ-1024



а)



б)

Рисунок 2 – Зависимости вероятности ошибки на символ от среднего отношения сигнал-шум при заданных неравномерностях ФЧХ для сигналов с а) КАМ-16, б) КАМ-1024

На основе предложенных математических моделей возможно выполнить расчет эквивалентных энергетических потерь от неравномерности АЧХ, ФЧХ фильтров частотной селекции. Основное содержание расчета заключается в последовательном определении энергетических потерь нешумовой природы путем вычисления разности теоретических и экспериментальных средних отношений сигнал-шум при заданных значениях вероятности ошибки и неравномерностей АЧХ, ФЧХ ФЧС. При реализации предложенного способа оценка эквивалентных энергетических потерь выполняется по следующей формуле:

$$\text{ЭЭП} = q(X, L) - q(0, L(M)), \text{ дБ, при } P_{\text{osh}} = \text{const}, \quad (12)$$

где  $q$  – отношение сигнал-шум [дБ];

$X$  – неравномерность ФЧХ, АЧХ фильтров частотной селекции [рад, дБ соответственно].

Определение ЭЭП цифровых фильтров частотной селекции выполняется на основе вычисления проигрыша в отношении сигнал-шум при прохождении сигнала через структурно – функциональные элементы радиоприемного устройства.

Проигрыш в отношении сигнал-шум из-за рассогласованности сигнала с согласованным фильтром (СФ) (G) определяется следующим образом:

$$G = \frac{q_{sf\_ideal}}{q_{sf\_real}}, \quad (13)$$

где  $q_{sf\_ideal}$ ,  $q_{sf\_real}$  - среднее отношение сигнал-шум на выходе СФ, при прохождении радиосигнала через идеальный и исследуемый цифровые фильтры, соответственно, дисперсия квазирandom шума в 2-х случаях не изменяется.

Для случая, когда память канала не превышает 10 символов, представляется возможным использовать метод статистического усреднения для нахождения вероятности ошибки на символ от среднего отношения сигнал-шум для КАМ-сигналов с целью определения ЭЭП. Сущность данного подхода заключается в вычислении вероятности ошибки от среднего отношения сигнал-шум :

$$P_{osh}(q_{avr\_gen}) = P_{osh}(q_{avr} + q_{MSI}), \quad (14)$$

$$q_{MSI} = \sum_{i=1}^M q_{iMSI},$$

где M – память канала;

$q_{MSI}$  – усредненное отношение сигнал-шум, вызванное межсимвольной интерференцией (МСИ);

$q_{iMSI}$  – усредненное отношение сигнал-шум, вызванное МСИ от i-ого символа.

Усредненные отношения сигнал-шум определяются на выходе СФ, при подаче на вход системы сигнала с усредненным значением амплитуды импульса.

Такая процедура расчета позволяет определить ЭЭП цифрового фильтра, применяя предложенную выше процедуру для аналоговых фильтров:

$$\text{ЭЭП} = q_{avr\_gen}(n, L) - q_{avr\_gen}(\infty, L), \text{ дБ, при } P_{osh} = \text{const}, \quad (15)$$

где  $P_{osh}(q_{avr\_gen}) = 1 - P_{BP}(q_{avr\_gen})$ ;

n – порядок исследуемого фильтра.

В случае же памяти канала свыше 10 символов время счета по формуле (14) экспоненциально возрастает и использовать метод перебора становится нецелесообразно.

При большой памяти канала для расчета вероятности ошибки (вероятности безошибочного приёма) целесообразно использовать выражение:

$$P_{osh} = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin(uh_0)}{u} \exp(-0,5u^2\sigma^2) \prod_{k \neq 0} \cos(uh_k) du, \quad (16)$$

где u – напряжение на входе линейной системы;

$h_k$  – отклик линейной части системы в k-ом отсчете на воздействие одиночного импульса с единичной амплитудой;

$\sigma$  – среднеквадратическое отклонение.

Применение предложенных математических моделей позволило провести расчет вероятностей ошибки от среднего отношения сигнал-шум для цифровых фильтров с различными временными окнами. Результаты расчета представлены на рисунках 3-4.

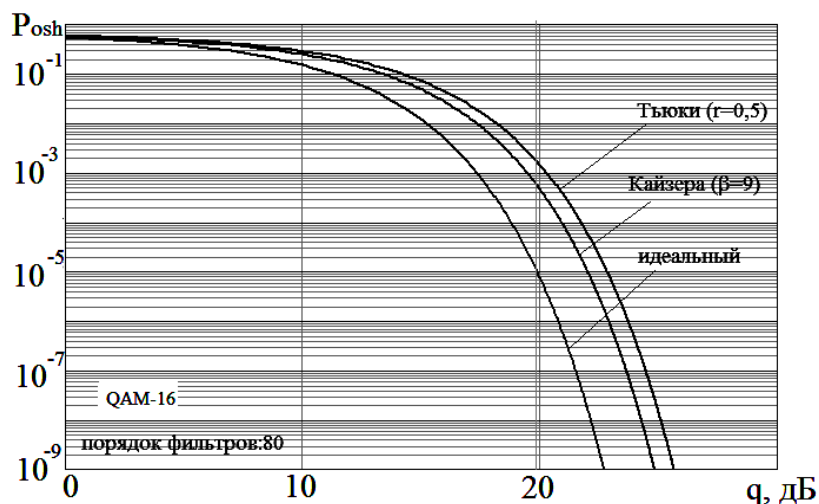


Рисунок 3 – Зависимости ЭЭП, возникающих в симметричных нерекурсивных фильтрах с временными окнами Кайзера  $\beta = 9$ , Тьюки  $r = 0,5$  (порядок фильтров – 80), при приёме сигналов с КАМ-16

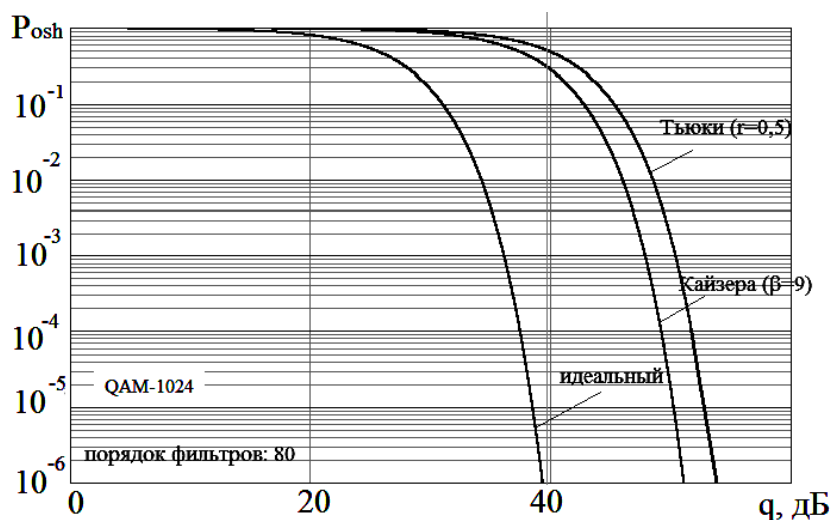
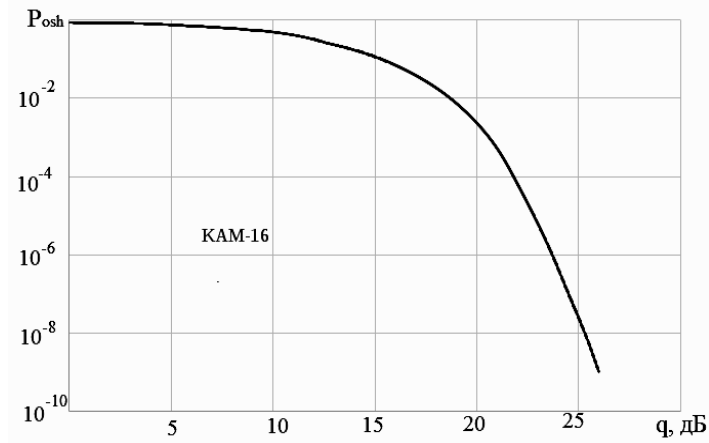


Рисунок 4 – Зависимости ЭЭП, возникающих в симметричных нерекурсивных фильтрах с временными окнами Кайзера  $\beta = 9$ , Тьюки  $r = 0,5$  (порядок фильтров – 80), при приёме сигналов с КАМ-1024

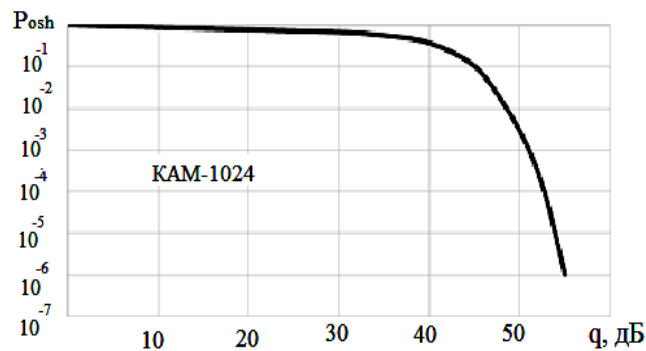
Полученные результаты формируют математическую основу реализации предложенного способа расчета ЭЭП, обусловленных неравномерностью АЧХ, ФЧХ цифровых ФЧС при приеме сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией.

В **третьей главе** для проведения практической проверки разработанных математических моделей построена имитационная модель по определению эквивалентных энергетических потерь радиотракта высокоскоростных радиосистем передачи информации.

Пример результатов определения зависимости вероятности ошибки на символ от отношения сигнал-шум при прохождении сигнала через нерекурсивные фильтры с весовой функцией Кайзера  $\beta=0,5$ ;  $N=80$  показан на рисунке 5.



а)



б)

Рисунок 5 – Экспериментальные зависимости вероятности ошибки на символ от среднего отношения сигнал-шум при прохождении сигнала с а) КАМ-16, б) КАМ-1024

С учетом полученных результатов способ расчета энергетических потерь нешумовой природы в ФЧС определяется выражением:

$$\Delta \Pi = q_{\text{экс}}(L) - q_{\text{теор}}(L), \text{ дБ, при } P_{\text{osh}} = \text{const}, \quad (17)$$

где  $q$  – отношение сигнал-шум [дБ];

$L$  – количество уровней КАМ-созвездия.

Выявлена относительная погрешность аналитически полученных результатов от результатов на модели, которая не превышает 1,5%, что соответствует достоверности разработанных аналитических моделей. Необходимо отметить, что данную погрешность можно снизить путем применения в модели типов данных с разрядностью более 32 бит, а также более высоких численных показаний интегрального и пропорционального коэффициентов петлевого фильтра в схеме Костаса и ряда других показателей.

Например, аналитически полученные результаты эквивалентных энергетических потерь для сигналов с КАМ-256, КАМ-1024 при вероятности ошибки на символ  $10^{-6}$ , соответственно, составляют 7,5; 11; 22 дБ. Результаты эквивалентных энергетических потерь на модели соответственно равны 7,61; 11,3 дБ. Относительные погрешности аналитически полученных результатов от результатов на модели соответственно равны  $\epsilon_{\text{кам-256}} = 1,46\%$ ;  $\epsilon_{\text{кам-1024}} = 0,71\%$ .

Наличие предложенных моделей и методики определения ЭЭП позволяют сформировать процедуру проектирования фильтров частотной селекции, обеспечивающую минимизацию потерь нешумового характера при синтезе радиоприемных устройств с высокими скоростями обмена данных в радиосистемах передачи информации.

Алгоритмическая схема, реализующая процедуру проектирования фильтров частотной селекции при разработке радиоприёмного устройства высокоскоростной радиосистем передачи информации, заключается в следующем:

1) Задание требований к эквивалентным энергетическим потерям, способу реализации фильтров частотной селекции устройств приема и обработки радиосигналов.

2) Расчет вероятности ошибки на символ от среднего отношения сигнал-шум при прохождении сигнала с квадратурной амплитудной модуляцией заданной кратности через фильтр частотной селекции с определенной неравномерностью амплитудно-частотной характеристики, реализованного по технологии, заданной в п.1.

3) Расчет эквивалентных энергетических потерь фильтра, вызванных неравномерностью амплитудно-частотной характеристики.

4) Расчет вероятности ошибки на символ от среднего отношения сигнал-шум при прохождении сигнала с квадратурной амплитудной модуляцией заданной кратности через фильтр частотной селекции с определенной неравномерностью фазо-частотной характеристики, реализованного по технологии, заданной в п.1.

5) Расчет эквивалентных энергетических потерь фильтра, вызванных неравномерностью фазо-частотной характеристики.

6) Расчет суммарных эквивалентных энергетических потерь, полученных в п.3 и 5.

7) Проверка выполнения условий заданных по заданию с полученными. В случае невыполнения – выбор фильтра с наименьшими неравномерностями амплитудно-частотной и(или) фазо-частотной характеристиками и повторное выполнение п.2-6.

В четвертой главе диссертации рассматриваются вопросы автоматизированного определения потерь в фильтрах радиосистем различного назначения, вариант построения соответствующего аппаратно-программного комплекса.

Аппаратное обеспечение программно-аппаратного комплекса должно включать электронно-вычислительную машину (ЭВМ), или несколько ЭВМ, соединенных в вычислительный кластер посредством сетевого оборудования (коммутатора 2 уровня).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы автором получены следующие результаты:

1) проведен анализ современного состояния и тенденций развития цифровых высокоскоростных радиосистем передачи информации;

2) получено модифицированное уравнение энергетического баланса для высокоскоростных радиосистем передачи информации, позволяющее учитывать потери нешумового характера, вызванные неравномерностью амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик в фильтрах радиоприёмного тракта;

3) обоснованы математические модели эквивалентных энергетических потерь, вносимых аналоговыми и цифровыми фильтрами частотной селекции при прохождении через них сигналов высокоскоростных радиосистем передачи информации;

4) разработана процедура проектирования фильтров частотной селекции, обеспечивающая минимизацию потерь нешумового характера при синтезе радиоприёмных устройств высокоскоростных радиосистем передачи информации;

5) разработаны универсальные имитационные модели приёма и обработки, генерирования и формирования радиосигналов в цифровых радиосистемах передачи информации с высокими скоростями обмена данными, на базе которых определены потери нешумового характера в фильтрах и произведена сравнительная оценка с аналитически полученными данными. Относительная погрешность для различных радиосистем передачи информации не превышает 1,5%;

6) разработан аппаратно-программный комплекс для исследования и определения потерь в фильтрах в современных и перспективных цифровых линиях с высокими скоростями обмена данными.

## СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Статьи, опубликованные в журналах, входящих в перечень ВАК, и материалы научно-практических конференций:**

1) Бабанин, И.Г. Определение эквивалентных энергетических потерь полосовых фильтров, вызванных неравномерностью фазо-частотной характеристики, при приёме сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией / И. Г. Бабанин, И. Е. Мухин // Известия Юго-Западного государственного университета – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2012. – №2 Ч.3. – С. 129-133.

2) Бабанин, И.Г. Оценка влияния неравномерности амплитудно-частотной характеристики полосового фильтра на эквивалентные энергетические потери в быстродействующих системах связи / И. Г. Бабанин, И. Е. Мухин // Телекоммуникации. – М., 2012. – №11. – С. 19-23.

3) Бабанин, И.Г. Обобщенная модель дискретного канала с группированием ошибок / И. Г. Бабанин, В. В. Джумков // Известия Юго-Западного государственного университета – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2012. – №2 Ч.2. – С. 49-55.

4) Бабанин, И.Г. Математические абстракции сокращения области неопределённости и верификации получаемых решений при техническом анализе корректирующих кодов / И. Г. Бабанин, К. Ю. Рюмшин // Известия Юго-Западного государственного университета – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2012. – №2 Ч.3. – С. 125-128.

5) Бабанин, И.Г. Оперативная передача видеоданных с космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / И. Г. Бабанин, И. А. Козин, А. Ю. Богомазов



// Известия Юго-Западного государственного университета – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2012. м №2 Ч.3. – С. 102-106.

6) Бабанин, И.Г. Способ определения эквивалентных энергетических потерь симметричных фильтров частотной селекции с конечной импульсной характеристикой в высокоскоростных радиосистемах / И. Г. Бабанин, С. С. Хотынюк // Известия Юго-Западного государственного университета – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2013. – №3(48). – С. 70-73.

7) Бабанин, И.Г. Расчет эквивалентных энергетических потерь в ионосфере с квадратурной амплитудной модуляцией различной позиционности / И. Г. Бабанин, И. Е. Мухин, А. Ю. Богомазов // Т-Comm. Телекоммуникации и транспорт.- М., 2014. – Т.8 №3. – С. 31-36.

8) Бабанин, И.Г. Расчет энергетических потерь в полосовых фильтрах при приёме сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией / И. Г. Бабанин, И. Е. Мухин // Телекоммуникации. – М., 2011. – №8. – С. 32-36.

9) Бабанин, И.Г. Имитационная модель экспериментальной высокоскоростной радиоприёмно-передающей системы для организации локальной вычислительной сети в научно-исследовательских институтах / И. Г. Бабанин, С.О. Дрёмова, Н. А. Крапивная // Известия Юго-Западного государственного университета – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2015. – №4 Ч.17. – С. 50-56.

10) Бабанин, И.Г. Исследование целесообразности применения средств компенсации дестабилизирующих факторов в спутниковом радиоканале при передаче сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией различной позиционности / И. Г. Бабанин, А. Н. Шевцов, А. Н. Щитов, А. А. Токарева // Известия Юго-Западного государственного университета – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2015. – №4 Ч.17. – С. 30-34.

11) Бабанин, И.Г. Исследование влияния дестабилизирующих факторов в спутниковом радиоканале при приеме сигналов с ФМ-2 и ФМ-4 / И.Г. Бабанин, Д.С.Коптев, А.Ю. Богомазов // Известия Юго-Западного государственного университета – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2016. – №2 Ч.19. – С. 24-34.

12) Бабанин, И.Г. Оценка влияния неравномерности амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик спутникового радиоканала на когерентный приём фазомодулированных сигналов малой позиционности / И. Г. Бабанин, Д. С. Коптев, А. Н. Шевцов, А. Н. Щитов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2018. – Т.12. – №6. – С. 9-17.

13) Бабанин, И.Г. Определение ошибок в принимаемых данных, вызванных неравномерностью амплитудно-частотной характеристики спутникового радиоканала при оптимальном приеме сигналов с ФМ-2 и ФМ-4 / И.Г. Бабанин, Д.С. Коптев // 3 Всероссийская научно-практическая конференция «Инфокоммуникации и информационная безопасность: состояние, проблемы и пути решения». – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2016. – С. 124-136.

14) Бабанин, И.Г. Модель определения эквивалентных энергетических потерь в цифровых фильтрах частотной селекции радиоприемных устройств при когерентном приеме сигналов с квадратурно-амплитудной модуляцией различной позиционности / И.Г. Бабанин, Е.В. Блинова, Д.С. Коптев, М.П. Веревкин // 1 Всероссийская научно-практическая конференция «Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения». – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2017. – С. 96-105.

15) Бабанин, И.Г. Экспериментальная система определения потерь нешумового характера в фильтрах частотной селекции радиоприемных устройств высокоскоростных систем связи / И.Г. Бабанин, Д.С. Гавриленко // 1 Всероссийская научно-практическая конференция «Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения». – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2017. – С. 89-96.

### **Монографии и учебные пособия:**

1) Бабанин, И.Г. Методологические основы синтеза систем обеспечения электромагнитного доступа средствами радиомониторинга современных систем телекоммуникаций / И.Е. Мухин, А.В. Хмелевская, И.Г. Бабанин; Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2016. – 316 с. – Библиогр.: с.292-315

### **Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:**

1) Программный продукт по определению эквивалентных энергетических потерь в фильтрах частотной селекции при когерентном приёме сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014615215 / И. Г. Бабанин, И. С. Надеина.

2) Программный продукт по определению эквивалентных энергетических потерь в цифровых фильтрах частотной селекции радиоприёмных устройств высокоскоростных линий связи: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014660113 / И. Г. Бабанин, И. С. Надеина.

Бабанин Иван Геннадьевич

**ПРОЦЕДУРА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФИЛЬТРОВ ЧАСТОТНОЙ  
СЕЛЕКЦИИ С УЧЕТОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В  
РАДИОПРИЁМНЫХ УСТРОЙСТВАХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ  
РАДИОСИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 11.2018г. Формат 60\*84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ №237.  
ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»  
305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94.