

На правах рукописи



МАСАЛЬ АНДРЕЙ ВИТОЛЬДОВИЧ

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ
ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ
СИСТЕМ СВЯЗИ И ОПОВЕЩЕНИЯ МОРСКОЙ ПОДВИЖНОЙ СЛУЖБЫ
В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Специальность 05.26.02 –
Безопасность в чрезвычайных ситуациях (в морской индустрии)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Калининград – 2016

Работа выполнена на кафедре “Судовые радиотехнические системы” в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Калининградский государственный технический университет»

Научный руководитель: Грошев Георгий Александрович
кандидат технических наук, профессор
кафедры судовых радиотехнических
систем ФГБОУ ВО «Калининградский
государственный технический университет»

Официальные оппоненты: Костин Александр Александрович
доктор технических наук, профессор кафедры
ФГКОУ ВО «Калининградский пограничный
институт федеральной службы безопасности
Российской Федерации»
Алещенко Алексей Николаевич
кандидат технических наук, доцент кафедры
радиофизики и информационной безопасности
физико-технического института
ФГБОУ ВПО «Балтийский федеральный
университет им. И.Канта»

Ведущая организация: АО “Центральный ордена Трудового Красного
Знамени научно-исследовательский и
проектно-конструкторский институт
морского флота” (АО “ЦНИИМФ”), г. Санкт-
Петербург

Защита состоится 21 июня 2016 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета Д 307.007.02 при ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» по адресу: 236022, Калининградская обл., г. Калининград, проспект Советский, д. 1, ауд. 255.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет».

Электронная версия автореферата размещена на официальном сайте ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» www.klgtu.ru 21 апреля 2016 г. и на официальном сайте ВАК Министерства образования и науки РФ <http://vak.ed.gov.ru> 21 апреля 2016 г.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Н.Ю. Бугакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Системы связи и оповещения морской подвижной службы (МПС) представляют собой организационно-техническую основу управления морскими объектами, включая организацию движением судов в прибрежных водах и оперативное управление судами на подходах к портам, обмен и передачу сообщений о бедствии, срочности и безопасности, а также взаимодействие со спасательными службами в чрезвычайных ситуациях.

В условиях ограниченного частотного ресурса и постоянного увеличения числа одновременно функционирующих радиоэлектронных средств (РЭС) на морских судах и в береговом сегменте МПС различные РЭС могут создавать мешающее электромагнитное влияние друг на друга и приводить к сбоям выполнения функций связи и оповещения МПС в чрезвычайных ситуациях. Таким образом, возникает проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) группировки РЭС, решение которой представляет собой решение задачи оценки и задачи обеспечения ЭМС. При этом информационной основой для разработки мер по обеспечению ЭМС являются результаты оценки ЭМС.

Повышение требований к функциональной безопасности систем связи и оповещения МПС в отношении непреднамеренных электромагнитных помех (НЭМП) приводит к необходимости совершенствования существующих методов и моделей расчёта и прогнозирования условий ЭМС. Решение задачи оценки ЭМС базируется на использовании множества моделей, отражающих физические процессы функционирования и взаимного влияния РЭС. Повышение уровня ЭМС систем связи и оповещения МПС в чрезвычайных ситуациях возможно на основе более детального учёта факторов, обуславливающих формирование электромагнитной обстановки (ЭМО) в точке приёма, приближенной к фактической ЭМО, и оценки воздействия данной ЭМО на функционирование РЭС.

Данная работа посвящена методам и алгоритмом оценки ЭМС систем связи и оповещения МПС в чрезвычайных ситуациях, основанных на частотно-ограниченных моделях характеристик РЭС, а также программным средствам, которые необходимы для её проведения. Решение задачи оценки ЭМС в такой постановке позволяет определить необходимое количество учитываемых радиоизлучений передатчика (ПРД) и каналов приёма приёмника (ПРМ) исходя из заданного уровня ограничения характеристики радиоизлучений ПРД и характеристики избирательности ПРМ, что позволит сильнее приблизить результаты моделирования физических процессов взаимного влияния РЭС к реальной ситуации.

Таким образом, задача разработки новых и совершенствования существующих методов и алгоритмов оценки ЭМС, основанных на частотно-ограниченных моделях характеристик РЭС, позволяющих повысить ЭМС систем связи и оповещения МПС в чрезвычайных ситуациях, является **актуальной**.

Степень разработанности темы. Проблеме электромагнитной совместимости систем связи посвящены труды многих учёных: Быховского

М.А., Винокурова В.И., Виноградова Е.М., Виноградова К.Е., Царькова Н.М., Князева А.Д., Петровского В.И., Владимирова В.И., Седельникова Ю.Е., Бадалова А.Л., Буги Н.Н., Михайлова А.С., Грошева Г.А., Ефанова В.И., Клемент Т.Н., Д. Уайта, Альтера Л.Ш., Апоровича А.Ф., Феоктистова Ю.А. и других авторов, которые внесли существенный вклад в развитие методов оценки и обеспечения ЭМС. Вместе с тем вопросам создания алгоритмов и современного программного обеспечения для оценки ЭМС РЭС посвящены лишь немногие работы, например, работы Филиппова Д.В., Сподобаева М.Ю., Аронова В.Ю.

Целью работы является повышение электромагнитной совместимости систем связи и оповещения морской подвижной службы в чрезвычайных ситуациях на основе совершенствования методов и алгоритмов её оценки.

Для достижения цели решались следующие **задачи**:

1. Проведён анализ современных систем связи и оповещения морской подвижной службы в чрезвычайных ситуациях;
2. Проведён анализ существующих методов и моделей оценки ЭМС;
3. Рассмотрены возможности модернизации математического описания частотно-ограниченных моделей характеристик РЭС;
4. Разработаны методы и методика оценки ЭМС систем связи и оповещения МПС, основанных на частотно-ограниченных моделях характеристик РЭС;
5. Рассмотрены вопросы реализации в структуре методики оценки ЭМС системы критериев ЭМС для повышения глубины её оценки;
6. Разработаны алгоритмы оценки ЭМС, основанные на частотно-ограниченных моделях характеристик РЭС;
7. Разработан программный комплекс и реализованы в его составе алгоритмы оценки ЭМС для решения практических задач по оценке ЭМС группировки РЭС на объектах систем связи МПС;
8. Проведено экспериментальное исследование методов и алгоритмов оценки ЭМС.

Объект исследования. Научное обоснование технических мероприятий для предотвращения и минимизации последствий чрезвычайных ситуаций в системах управления объектами морской индустрии.

Предмет исследования. Методы и алгоритмы оценки электромагнитной совместимости систем связи и оповещения в чрезвычайных ситуациях подвижных объектов в морской индустрии.

Методы исследований основаны на методах аналитического и компьютерного моделирования. Решения задач базируются на известных экспериментальных данных и теоретических основах функционирования и проектирования радиоприёмных и радиопередающих устройств с использованием вычислительного эксперимента и методов численной математики.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- предложена частотно-ограниченная модель характеристики спектральной плотности мощности излучений ПРД, которая позволяет представлять излучения на гармониках и субгармониках, а также модель

характеристики односигнальной частотной избирательности ПРМ, которая позволяет представлять различные каналы приёма, которые образуются при взаимодействии гармоник входного сигнала и гармоник гетеродина;

- разработаны методы и методика оценки ЭМС, основанные на частотно-ограниченных моделях характеристик РЭС, которые позволяют учитывать в расчётах ЭМС необходимое количество излучений и каналов приёма исходя из заданного уровня ограничения характеристики радиоизлучений ПРД и характеристики избирательности ПРМ;

- разработаны алгоритмы оценки ЭМС, которые позволяют идентифицировать излучения и каналы приёма, которые образуют канал проникновения помехи, а также выявлять наиболее опасные излучения и наиболее уязвимые каналы приёма в фактической ЭМО.

Практическая значимость результатов работы.

1. Разработан и создан программный комплекс «Анализ ЭМС РЭС МПС», который позволяет производить автоматизированный расчёт ЭМС для реальной группировки РЭС, сосредоточенной на объектах систем связи, адаптированный для получения детальных результатов оценки ЭМС.

2. Разработанные методы и алгоритмы позволяют более точно определять структуру ЭМО в точке приёма по сравнению с известными методами и алгоритмами оценки ЭМС.

3. Предложенные методы и алгоритмы могут быть использованы в составе геоинформационных систем для автоматизированного проектирования сетей связи, определения зон действия различных видов радиопомех, а также оценки ЭМС территориально рассредоточенной группировки РЭС.

Внедрение результатов исследований. Программный комплекс использовался для оценки условий электромагнитной совместимости группировки РЭС на объектах системы управления движением судов Калининградского управления Северо-Западного бассейнового филиала ФГУП «Росморпорт», а также используется управлением по Калининградской области филиала ФГУП «Радиочастотный центр центрального федерального округа» в Северо-Западном федеральном округе в рамках технологического процесса поиска и определения источников недопустимого воздействия помех в группировке РЭС на объектах систем связи.

Материалы работы используются в рамках спецкурса «Электромагнитная совместимость» на кафедре «Судовые радиотехнические системы» для пятого курса по специальности «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования».

Достоверность полученных результатов подтверждается соответствием теоретических положений и полученных экспериментальных результатов компьютерного моделирования характеристик радиоэлектронных средств и воздействия радиоизлучений на функционирование радиоприёмного устройства, практическим применением и апробацией результатов диссертационной работы.

Основные результаты работы, выносимые на защиту:

1. Частотно-ограниченная модифицированная модель радиоизлучений, которая позволяет представлять излучения на гармониках и субгармониках;

2. Частотно-ограниченная модифицированная модель каналов приёма ПРМ, которая позволяет представлять побочные каналы приёма, образующиеся при взаимодействии гармоник входного сигнала с гармониками гетеродина;

3. Методы и методика оценки ЭМС систем связи и оповещения МПС в чрезвычайных ситуациях, основанные на частотно-ограниченных моделях характеристик РЭС;

4. Алгоритм оценки ЭМС систем связи и оповещения МПС в чрезвычайных ситуациях, основанный на частотно-ограниченных моделях характеристик РЭС и включающий в себя вспомогательные алгоритмы:

- алгоритмы расчёта частотных параметров радиоизлучений ПРД, частотных параметров каналов приёма и входной цепи ПРМ;

- алгоритм определения каналов проникновения помех и идентификации радиоизлучений и каналов приёма, которые их образуют;

- алгоритмы энергетической оценки помех, которые позволяют определить степень опасности радиоизлучений и выявить наиболее уязвимые каналы приёма для различных механизмов воздействия радиоизлучений на ПРМ.

Апробация результатов работы. Материалы и результаты диссертационного исследования докладывались на международных, Российских конференциях и форумах: IX Межвузовская научно-техническая конференция «Научно-технические разработки в решении проблем рыбопромыслового флота и подготовки кадров», г. Калининград, 11-12 ноября, 2009; X Межвузовская научно-техническая конференция «Научно-технические разработки в решении проблем рыбопромыслового флота и подготовки кадров», г. Калининград, 21-27 октября, 2010; IX Международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии, г. Санкт-Петербург, 13-16 сентября, 2011; X Юбилейная Международная конференция «Морская индустрия, транспорт и логистика в странах региона Балтийского моря: новые вызовы и ответы», г. Светлогорск, 29-31 мая, 2012; Балтийский морской форум. Секция «Качество и надёжность судовых технических средств и портового оборудования», г. Светлогорск, 28-31 мая, 2013 г; II Балтийский морской форум. Секция «Качество и надёжность судовых технических средств и портового оборудования», г. Светлогорск, 26-30 мая, 2014 г; III Балтийский морской форум. Международная конференция «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии», г. Светлогорск, 24-30 мая, 2015.

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 14 научных работах, среди которых 3 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации, 9 статей в других изданиях и 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений, библиографического списка, включающего 100 наименований, и 4 приложений. Диссертация содержит 204 страницы текста, в том числе 25 страниц приложений, 82 рисунка, 40 таблиц. В приложении представлены копии справок и акта о внедрения результатов диссертационной работы, копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цели и решаемые в работе задачи исследования, показана практическая значимость и применение результатов работы, сформулированы основные результаты работы, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена исследованию проблемы ЭМС систем связи и оповещения МПС в чрезвычайных ситуациях. Дана краткая характеристика систем связи и оповещения МПС в чрезвычайных ситуациях. Проведён анализ характеристик источников и рецепторов непреднамеренных электромагнитных помех, а также анализ влияния помех на функционирование систем связи и оповещения МПС. Проведён библиографический обзор и сравнительный анализ работ в области оценки ЭМС, анализ теории и практики применения методов и моделей оценки ЭМС. Представлена структурно-логическая схема исследований, в которой конкретизируются задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке методов и методики оценки ЭМС систем связи и оповещения МПС в чрезвычайных ситуациях, основанных на частотно-ограниченных моделях характеристик РЭС.

Особенности моделирования изучений состоят в следующем:

1. Используется частотно-ограниченная модель излучений ПРД, которая представляет собой кусочно-линейную огибающую характеристики спектральной плотности мощности основного с учётом внеполосных излучений и побочных излучений на гармониках и субгармониках, ограниченную на заданном уровне X_3 , рисунок 1, а.

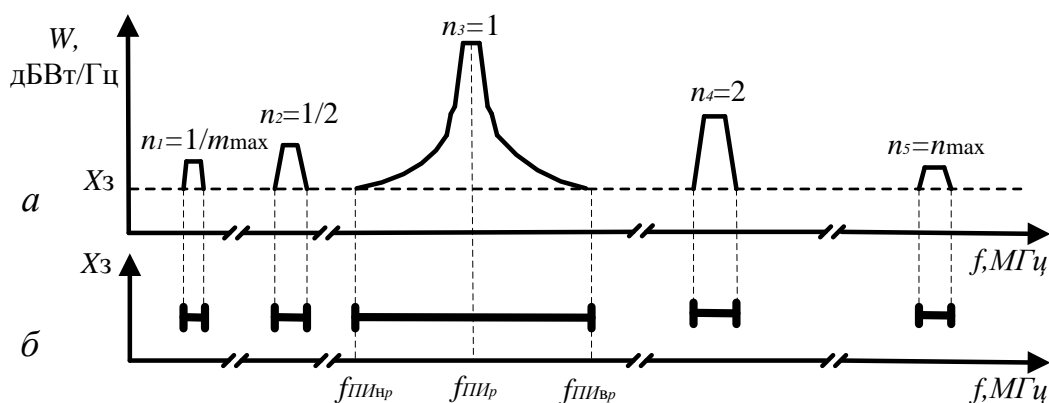


Рисунок 1 – Частотно-ограниченная модель излучений ПРД

Частотная модель излучений (ЧМИ) представляет собой проекцию участков ограничительной линии с уровнем X_3 , заключённых между точками пересечения с огибающей излучений, на ось частот, рисунок 1, б. ЧМИ определяет граничные частоты излучений на заданном уровне X_3 .

Для математического описания характеристики излучений предлагается выражение, справедливое для всех p -х излучений в диапазоне частот, который справа ограничен частотой побочного излучения на гармонике n_{\max} , а слева частотой побочного излучения на субгармонике m_{\max} .

Отличительной особенностью модели является совместное применение кусочно-линейной аппроксимации основного и внеполосных излучений,

функции Хевисайда и масштабирования основного и внеполосных излучений по уровню при помощи параметра $a_{\text{ш}p}$ и по частоте при помощи параметра n_p :

$$W(f, p) = \begin{cases} \sum_{\zeta=0}^{\zeta_T-1} \left(X_{\zeta} + M_{\zeta} \lg \left[\frac{f - f_{\text{ш}p}}{f_{\zeta} n_p} \right] + a_{\text{ш}p} \right) \left(H(f - f_{\text{ш}p} - f_{\zeta} n_p) - H(f - f_{\text{ш}p} - f_{\zeta+1} n_p) \right), & f \neq f_{\text{ш}p} \\ a_{\text{ш}p}, & f = f_{\text{ш}p}, \end{cases} \quad (1)$$

где M_{ζ} – коэффициент, характеризующий угол наклона аппроксимирующей прямой в пределах ζ -го участка, $0 \leq \zeta \leq \zeta_T - 1$ – номер участка аппроксимации; X_{ζ} – уровень ограничения для ζ -го участка аппроксимации; f_{ζ} – частотный сдвиг для X_{ζ} на ζ -м участке аппроксимации; $a_{\text{ш}p}$ – относительный уровень p -го побочного излучения; для излучений на гармониках $n_p = 1, 2 \dots n_{\text{max}}$, для излучений на субгармониках $n_p = 1/m_{\text{max}} \dots 1/3, 1/2$.

$$H(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0. \end{cases}$$

Такой подход позволяет использовать единый алгоритм (рисунок 2) для моделирования различных излучений, а также учесть характер частотной зависимости спектра p -го излучения.

2. Предлагается метод расчёта нижней и верхней граничных частот p -х излучений на заданном уровне ограничительной линии X_3 , основанный на определении номера участка аппроксимации для левой $L(p)$ и правой $R(p)$ частей спектра, который пересекается с ограничительной линией:

$$f_{\text{ш}p} = p(f_{L(p)}) 10^{\left(\frac{X_3 - X_{L(p)} - a_{\text{ш}p}}{X_{L(p)-1} - X_{L(p)}} \lg \left(\frac{f_{L(p)-1}}{f_{L(p)}} \right) \right)} + f_T, \quad (2)$$

$$f_{\text{ш}p} = p(f_{R(p)}) 10^{\left(\frac{X_3 - X_{R(p)} - a_{\text{ш}p}}{X_{R(p)+1} - X_{R(p)}} \lg \left(\frac{f_{R(p)+1}}{f_{R(p)}} \right) \right)} + f_T, \quad (3)$$

Средняя частота p -го излучения определяется:

$$f_{\text{ш}p} = n_p f_T \quad (4)$$

где f_T – средняя частота основного излучения.

Ширина полосы частот p -го излучения на уровне X_3 определяется:

$$B_{\text{ш}p} = f_{\text{ш}p} - f_{\text{ш}p}. \quad (5)$$

Выражения (2) – (5) определяют параметры ЧМИ.

3. При моделировании используется метод, который позволяет определить необходимое количество излучений на гармониках и на субгармониках, которые будут учитываться в расчётах ЭМС исходя из заданного уровня ограничительной линии X_3 . Так в расчётах ЭМС участвуют излучения, для которых выполняется условие: $f_{\text{ш} \min} < f_{\text{ш}p} < f_{\text{ш} \max}$, где $f_{\text{ш} \min}$, $f_{\text{ш} \max}$ – минимальная и максимальная частоты, в пределах которых относительный

уровень побочных излучений выше заданного уровня ограничительной линии, т.е. $a_{\text{ПИ}p} > X_3$. Данные частоты определяются:

$$f_{\text{ПИ} \max} = f_{\text{T}} 10^{(X_3 - A1)/B1}$$

$$f_{\text{ПИ} \min} = f_{\text{T}} 10^{(X_3 - A2)/B2}, \quad (6)$$

где $A1, B1$ – среднестатистические коэффициенты, характеризующие среднее значение относительного уровня излучений на субгармониках; $A2, B2$ – среднестатистические коэффициенты, характеризующие среднее значение относительного уровня излучений на гармониках. Общее количество излучений, учитываемых в расчётах ЭМС, определяется:

$$p_{\max} = (m_{\max} - 1) + n_{\max}, \quad (7)$$

где $m_{\max} \geq 1$ (если субгармоники в расчётах не учитываются, то $m_{\max} = 1$).

4. Частотно-ограниченная модель характеристики излучений позволяет представлять как симметричные, так и несимметричные классы излучений. Например, классы излучений аналогового телевидения.

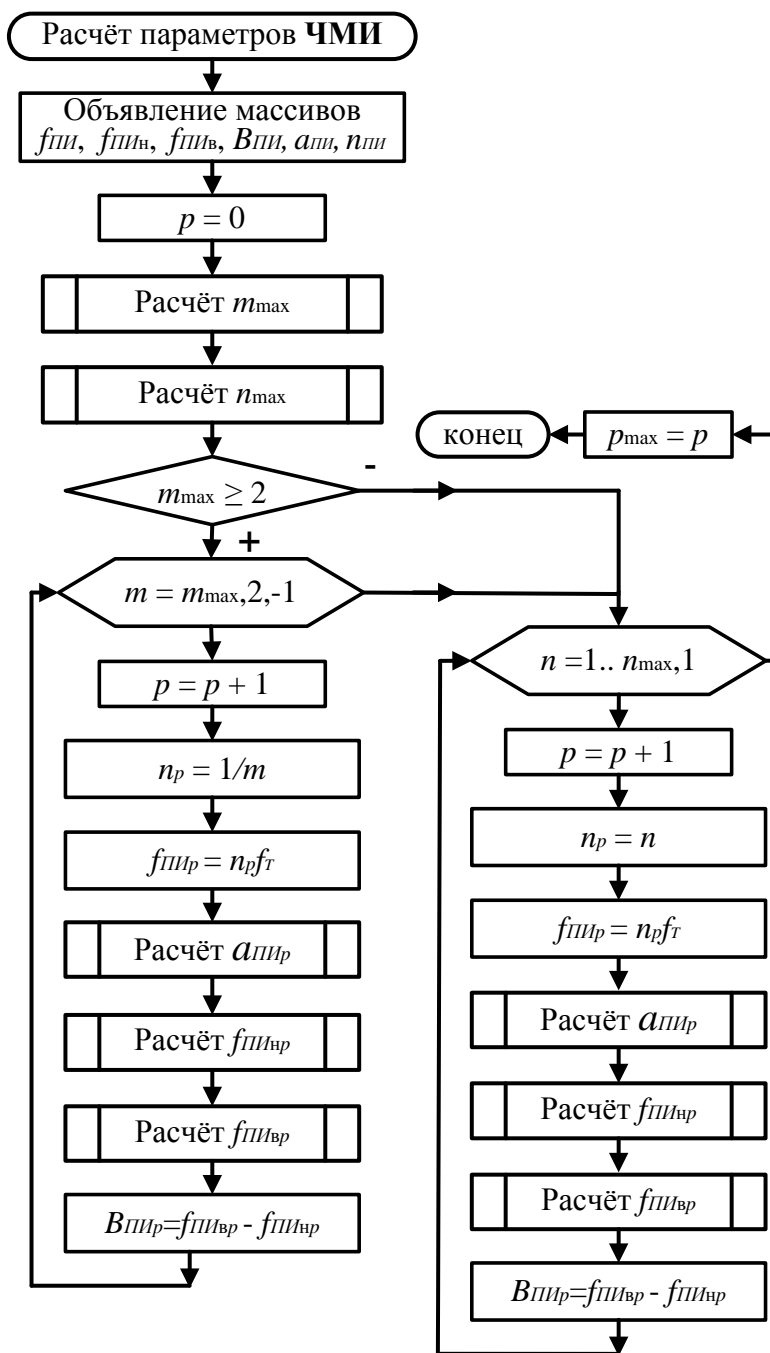


Рисунок 2 – Расчёт параметров ЧМИ

Особенности моделирования каналов приёма состоят в следующем:

1. Используется частотно-ограниченная модель каналов приёма ПРМ, которая представляет собой кусочно-линейную огибающую характеристики односигнальной частотной избирательности основного с учётом соседних каналов приёма и побочных каналов приёма, ограниченную на заданном уровне S_3 , рисунок 3,а.

Частотная модель каналов приёма (ЧМКП) представляет собой проекцию участков ограничительной линии с уровнем S_3 , заключённых между точками

пересечения с огибающей характеристики частотной избирательности каналов приёма, на ось частот, рисунок 3,б.

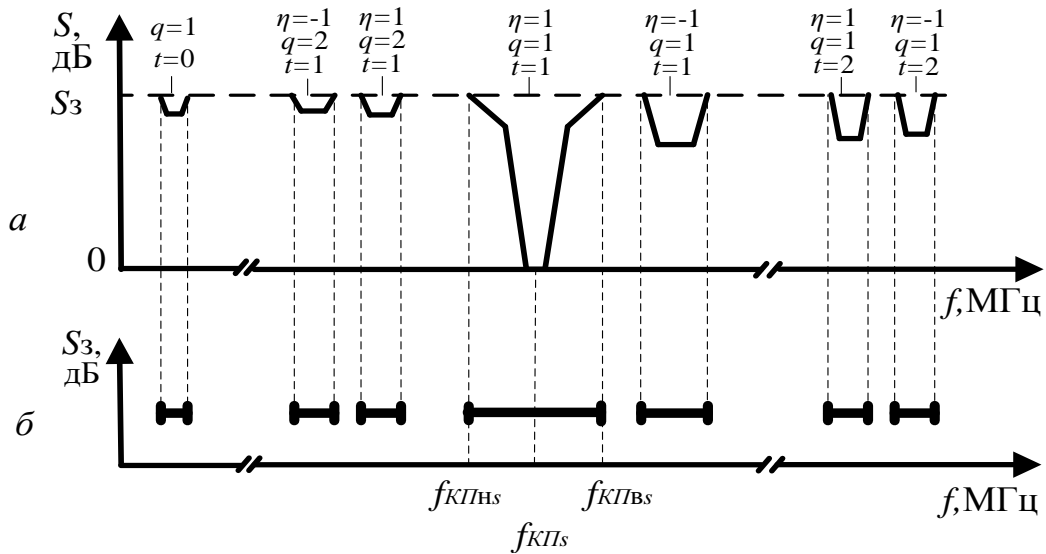


Рисунок 3 – Частотно-ограниченная модель каналов приёма ПРМ

Для математического описания каналов приёма используется выражение, справедливое для всех каналов приёма, которые образуются при взаимодействии гармоник входного сигнала с гармониками гетеродина. При этом также совместно применяются кусочно-линейная аппроксимация характеристики частотной избирательности по основному с учётом соседних каналов приёма, функция Хевисайда и масштабирование основного канала приёма с учётом соседних по уровню при помощи параметра $b_{кп_s}$ и по частоте при помощи параметра q_s :

$$S(f, s) = \begin{cases} \sum_{\zeta=0}^{n_R-1} \left(\left(S_{\zeta} + M_{\zeta} \lg \left(\frac{q_s (f - f_{кп_s})}{f_{\zeta}} \right) + b_{кп_s} \right) \left(H \left[f - f_{кп_s} - \frac{f_{\zeta}}{q_s} \right] - H \left[f - f_{кп_s} - \frac{f_{\zeta+1}}{q_s} \right] \right) \right), & f \neq f_{кп_s}, \\ b_{кп_s}, & f = f_{кп_s} \end{cases} \quad (8)$$

где M_{ζ} – коэффициент, характеризующий угол прямой в пределах ζ -го участка аппроксимации; $0 \leq \zeta \leq \zeta_R - 1$ – номер участка аппроксимации; S_{ζ} – уровень ограничения для ζ -го участка аппроксимации; f_{ζ} – частотный сдвиг для S_{ζ} на ζ -м участке аппроксимации; $b_{кп_s}$ – относительный уровень избирательности s -го побочного канала приёма; q_s – номер гармоники входного сигнала, которая участвует в образовании s -го канала приёма.

Такой подход также позволяет использовать единый алгоритм для моделирования различных каналов приёма (рисунок 4), а также учесть характер частотной зависимости каналов приёма, которые образуются при взаимодействии гармоник входного сигнала с гармониками гетеродина.

2. Предлагается метод расчёта верхней и нижней граничных частот для s -х каналов приёма на заданном уровне ограничительной линии S_3 , основанный на определении номера участка аппроксимации $R(s)$, который пересекается с

ограничительной линией:

$$f_{кпв_s} = \frac{f_{R(s)}}{q_s} 10^{\left(\frac{S_3 - S_{R(s)} - b_{кп_s}}{S_{R(s+1)} - S_{R(s)}} \right) \lg \left(\frac{f_{R(s+1)}}{f_{R(s)}} \right)} + f_{кп_s}. \quad (9)$$

$$f_{кпн_s} = 2f_{кпв_s} - f_{кп_s}. \quad (10)$$

Средняя частота s -го канала приёма определяется:

$$f_{кп_s} = \left| \frac{t_s f_r - \eta_s \xi f_{пч}}{q_s} \right|, \quad (11)$$

где f_r – частота гетеродина ПРМ; t_s – номер гармоники гетеродина, участвующей в образовании s -го канала приёма; q_s – номер гармоники входного сигнала, участвующей в образовании s -го канала приёма; $\eta_s = \pm 1$ – параметр для s -го канала приёма, обозначающий суммарное либо разностное преобразование в смесителе ПРМ; ξ – признак настройки гетеродина; $f_{пч}$ – промежуточная частота ПРМ.

Ширина полосы частот s -го канала приёма на уровне S_3 определяется:

$$B_{кп_s} = f_{кпв_s} - f_{кпн_s}. \quad (12)$$

Выражения (8)-(12) определяют параметры ЧМКП.

3. При моделировании используется метод, который позволяет определить необходимое количество каналов приёма, которые будут учитываться в расчётах ЭМС, исходя из заданного уровня ограничительной линии S_3 . В расчётах ЭМС участвуют те каналы приёма, частоты которых удовлетворяют условию $f_{кп \min} < f_{кп} < f_{кп \max_q}$, где $f_{кп \min}$, $f_{кп \max_q}$ – минимальная и максимальная частоты, в пределах которых относительный уровень избирательности побочных каналов приёма меньше уровня ограничительной линии $b_{кп_s} < S_3$. Данные частоты определяются:

$$f_{кп \min} = f_r 10^{(S_3 - J_1)/I_1}, \quad f_{кп \max_q} = f_r 10^{(S_3 - J_2 - J_q)/I_2}, \quad (13)$$

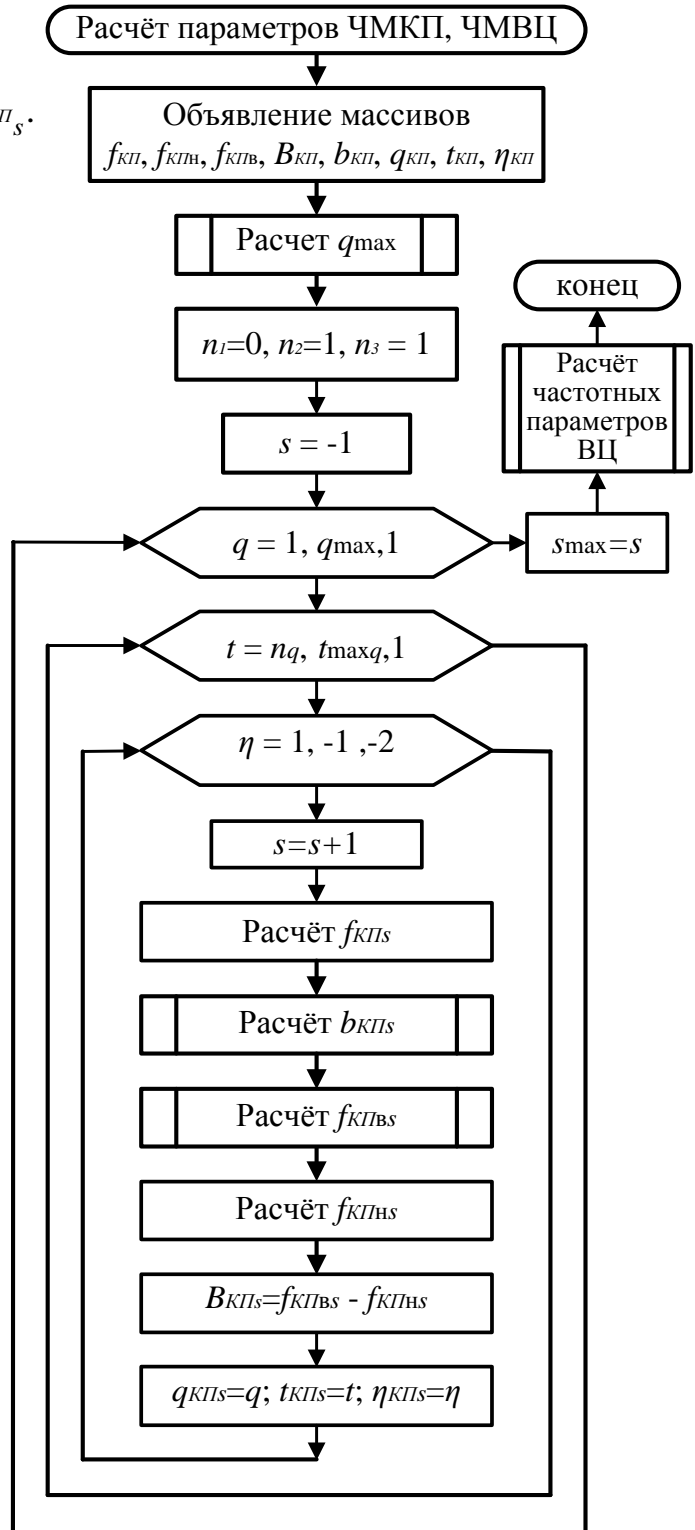


Рисунок 4- Расчёт параметров ЧМКП, ЧМВЦ

где f_R - частота настройки ПРМ; I_1, J_1 – среднестатистические коэффициенты, характеризующие среднее значение относительного уровня избирательности побочных каналов приёма для $f_{кп} < f_R$; I_2, J_2 – среднестатистические коэффициенты для $f_{кп} > f_R$; J_q – параметр, зависящий от гармоники входного сигнала, участвующей в образовании побочного канала.

Количество каналов приёма, учитываемых в расчётах ЭМС, определяется:

$$S_{\max} = \sum_{q=1}^{q_{\max}} 2t_{\max_q} + 1, \quad (14)$$

где $q_{\max} \leq 3$ – максимальный номер гармоники входного сигнала, который учитывается при моделировании каналов приёма; t_{\max_q} – максимальный номер гармоники гетеродина, который учитывается при заданном q , $q = 1..q_{\max}$; «1» означает дополнительный побочный канал на промежуточной частоте.

В основе методики оценки ЭМС лежит трёхэтапная схема, рисунок 5.

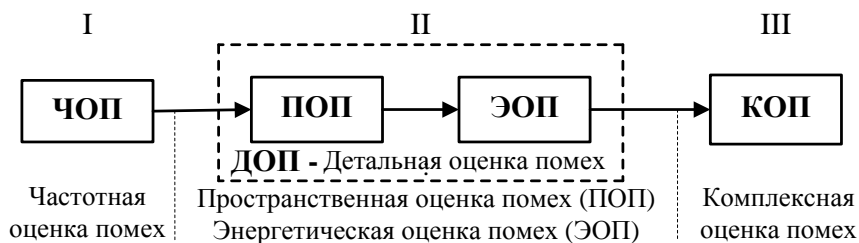


Рисунок 5 – Структура оценки ЭМС

На этапе ЧОП производится определение каналов проникновения помех (КПП) на выход тракта промежуточной частоты ПРМ и идентификация излучений и поражённых каналов приёма, рисунок 7. Также определяются каналы проникновения помех по нелинейным эффектам (КППНЭ) на вход усилителя радиочастоты (смесителя).

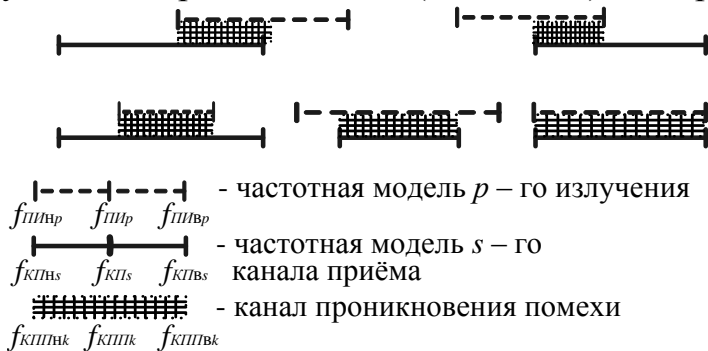


Рисунок 6 – Образование КПП

сценарии образования КПП. Наличие КПП определяется частотным критерием (ЧК):

$$\begin{cases} p = 1..p_{\max}, s = 1..s_{\max}, \\ |f_{пнp} - f_{кпс}| < (B_{пнp} + B_{кпс}) / 2, \end{cases} \quad (15)$$

При условии выполнения ЧК (15) определяются граничные частоты k -го канала проникновения помехи:

$$f_{кпн_k} = \begin{cases} f_{пнr_{кпн_k}}, f_{пнr_{кпн_k}} \geq f_{кпн_{скпн_k}}, \\ f_{кпн_{скпн_k}}, f_{пнr_{кпн_k}} < f_{кпн_{скпн_k}}. \end{cases} \quad f_{кпнв_k} = \begin{cases} f_{пнв_{ркпн_k}}, f_{пнв_{ркпн_k}} \leq f_{кпнв_{скпн_k}}, \\ f_{кпнв_{скпн_k}}, f_{пнв_{ркпн_k}} > f_{кпнв_{скпн_k}}. \end{cases} \quad (16)$$

где $f_{пнr_{кпн_k}}, f_{пнв_{ркпн_k}}$ - нижняя и верхняя граничные частоты p -го излучения, соответствующего k -му КПП; $f_{кпн_{скпн_k}}, f_{кпнв_{скпн_k}}$ - нижняя и верхняя граничные частоты s -го канала приёма, образованного параметрами η, q, t , соответствующего k -му КПП.

Средняя частота и ширина полосы частот k -го КПП, соответственно, определяются:

$$f_{кпп_k} = (f_{кппн_k} + f_{кппв_k}) / 2 \quad (17)$$

$$B_{кпп_k} = f_{кппв_k} - f_{кппн_k} \quad (18)$$

Для определения КППНЭ используется следующее частотное условие:

$$\begin{cases} p=1..p_{max}, s=1..s_{max}, \\ |f_{пп_p} - f_{кп_s}| > \frac{(B_{пп_p} + B_{кп_s})}{2}, \\ |f_{пп_p} - f_{вц}| < (B_{пп_p} + B_{вц}) / 2. \end{cases} \quad (19)$$

Граничные частоты b -го КППНЭ определяются:

$$f_{нэв_b} = \begin{cases} f_{пп_p}, f_{пп_p} \geq f_{вцн}, \\ f_{вцн}, f_{пп_p} < f_{вцн}. \end{cases}$$

$$f_{нэб_b} = \begin{cases} f_{ппв_p}, f_{ппв_p} \leq f_{вцв}, \\ f_{вцв}, f_{ппв_p} > f_{вцв}. \end{cases} \quad (20)$$

Средняя частота и ширина полосы частот b -го КППНЭ:

$$f_{нэ_b} = (f_{нэв_b} + f_{нэб_b}) / 2, \quad (21)$$

$$B_{нэ_b} = f_{нэв_b} - f_{нэб_b} \quad (22)$$

На этапе ПОП определяется коэффициент связи между ПРД и ПРМ на средней частоте КПП (КППНЭ):

$$L_{св}(f_{кпп_k}) = G_T(\Delta A_{z_{TR}}, \Delta \beta_{TR}) + \Delta G_T(f_{кпп_k}) + G_R(\Delta A_{z_{RT}}, \Delta \beta_{RT}) + \Delta G_R(f_{кпп_k}) + \Delta G_{пл} - k_{фТ}(f_{кпп_k}) - k_{фР}(f_{кпп_k}) - L_{тр}(f_{кпп_k}), \quad (23)$$

где $G_T(\Delta A_{z_{TR}}, \Delta \beta_{TR}), G_R(\Delta A_{z_{RT}}, \Delta \beta_{RT})$ – коэффициенты усиления антенн ПРД и ПРМ в направлении друг на друга в рабочем диапазоне частот ($\Delta A_{z_{TR}}, \Delta A_{z_{RT}}, \Delta \beta_{TR}, \Delta \beta_{RT}$ – азимуты и углы места ДНА ПРД и ПРМ в направлении друг на друга, соответственно), дБ; $\Delta G_T(f_{кпп_k}), \Delta G_R(f_{кпп_k})$ – частотные поправки коэффициентов усиления антенны ПРД и ПРМ на средней частоте канала проникновения помехи, дБ; $\Delta G_{пл}$ – поправочный коэффициент, учитывающий изменение коэффициента усиления из-за несовпадения поляризаций передающей и приёмной антенн, дБ; $k_{фТ}(f_{кпп_k}), k_{фР}(f_{кпп_k})$ – коэффициенты потерь в фидерах ПРД и ПРМ на средней частоте k -го КПП, дБ; $L_{тр}(f_{кпп_k})$ – потери на трассе распространения радиоволн между антеннами ПРД и ПРМ.

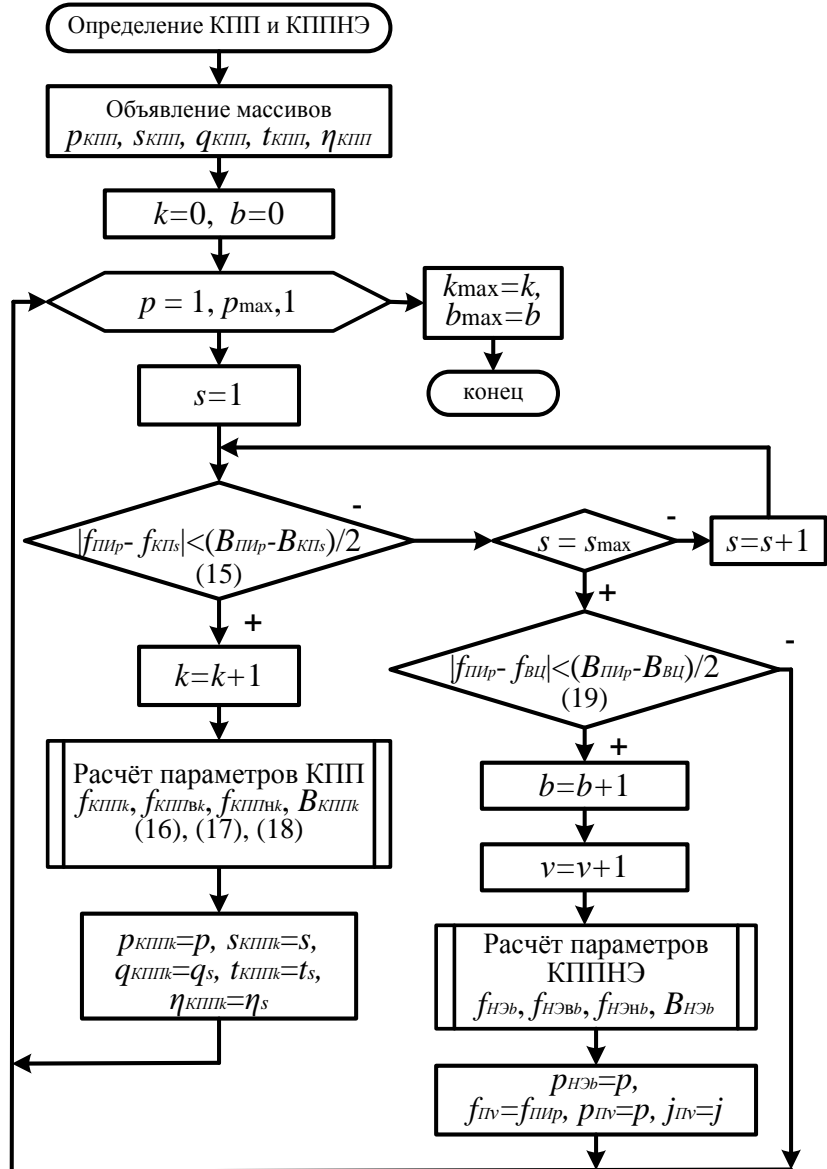


Рисунок 7 – Определение КПП и КППНЭ

На этапе ЭОП производится расчёт мощности помех, проникающих через определённые КПП. Мощность помехи для k -го КПП определяется:

$$P_{\Pi_k} = \Delta h \sum_{m=0}^{l-1} W'(f), \quad (24)$$

где $\Delta h = B_{\text{КПП}_k} / l$ - шаг, с которым рассчитывается мощность в пределах k -го КПП, l - количество шагов; $f = f_{\text{КПП}_k} + m\Delta h + \Delta h / 2$ - значение частоты на m - м шаге в пределах k - го КПП, $0 \leq m \leq l-1$, Гц; $W'(f)$ - спектральная плотность мощности на выходе ПРМ определяется, Вт/Гц:

$$W'(f) = 10 \left\{ \frac{W_m + W[f, p_{\text{КПП}_k}] - S[f, s_{\text{КПП}_k}] + L_{\text{св}}[f_{\text{КПП}_k}]}{10} \right\}, \quad (25)$$

где $W_m = 10 \lg(0,99 P_0 / B_H)$ - максимальное значение спектральной плотности мощности ПРД, дБ(Вт/Гц); P_0 - пиковое значение мощности ПРД, поступающей в фидер, Вт; B_H - необходимая ширина полосы частот, в пределах которой сосредоточено 99% мощности излучения, Гц; $W(f, p_{\text{КПП}_k})$ - нормированное значение спектральной плотности мощности p - го излучения, соответствующего k - у КПП, определяется в соответствии с моделью (1), дБ(Вт/Гц); $p_{\text{КПП}_k}$ - p - е излучение, которое участвует в образовании k -го КПП; $S[f, s_{\text{КПП}_k}]$ - нормированное значение характеристики частотной избирательности канала приёма, образованного параметрами η, q, t , соответствующего k - му КПП, определяется в соответствии с моделью (8), дБ; $s_{\text{КПП}_k}$ - s - й канал приёма, участвующий в образовании k - го КПП.

На рисунке 8 графически изображён принцип определения мощности помехи для k -го КПП.

Мощность по всем КПП от анализируемого ПРД определяется, Вт:

$$P_{\Pi} = \sum_{k=1}^{k_{\max}} P_{\Pi_k}, \quad (26)$$

где k_{\max} - количество КПП.

Суммарная мощность от всех J из совокупности N ПРД, которые образуют КПП определяется, Вт:

$$P_{\Sigma\Pi} = \sum_J P_{\Pi} \quad (27)$$

Выявление наиболее опасных излучений и ПРД, а также наиболее уязвимых каналов приёма и ПРМ осуществляется при помощи энергетических критериев (ЭК):

$$P_{\Pi_k} \leq P_{\Pi \text{ доп}}, \quad P_{\Pi} \leq P_{\Pi \text{ доп}}, \quad P_{\Sigma\Pi} \leq P_{\Pi \text{ доп}}. \quad (28)$$

где $P_{\Pi \text{ доп}} = 10^{(P_c - A - 30)/10}$ - допустимый уровень помехи в совмещенном канале,

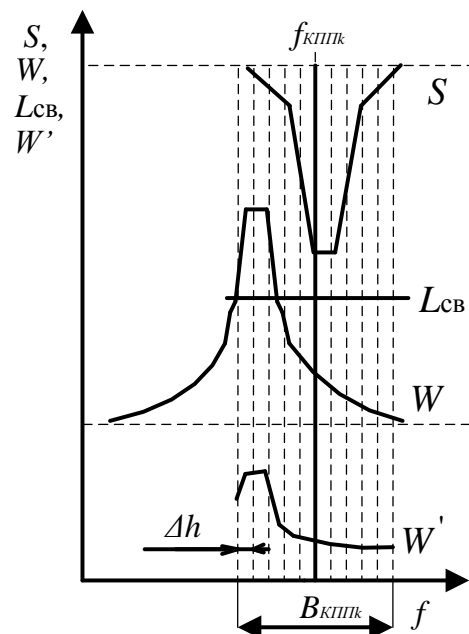


Рисунок 8 – Определение мощности КПП

Вт; P_c – средний уровень полезного сигнала, либо чувствительность ПРМ $P_c = P_{\min}$, дБм; A – защитное отношение ПРМ в совмещённом канале, дБ.

Степень блокирования ПРМ по b – му КППНЭ определяется коэффициентом блокирования в соответствии с одним из выражений:

$$K_{БЛ_b} = \frac{P_{ПБНУ_b} K_{БЛДОП} 10^{S_{ВЦ}(f_{ЦДОП})/10}}{P_{\min} 10^{D_{БЛ}/10}}, \quad K_{БЛ_b} = \frac{0,109 P_{ПБНУ_b}}{P_{ВХ_{1дББЛ}}}; \quad (29)$$

где $K_{БЛДОП}$ – допустимый коэффициент блокирования ПРМ; $P_{ПБНУ_b}$ – мощность помехи на входе усилителя радиочастоты по b – му КППНЭ, Вт; $S_{ВЦ}(f_{ЦДОП})$ – избирательность входной цепи на частоте, для которой определяется допустимый уровень блокирующей помехи на входе ПРМ $P_{ВХПРМДОП}$ (уровень помехи, при котором коэффициент блокирования равен допустимому значению $K_{БЛДОП}$), дБ; P_{\min} – чувствительность ПРМ, Вт; $D_{БЛ}$ – динамический диапазон ПРМ по блокированию, дБ; $P_{ВХ_{1дББЛ}}$ – точка компрессии 1 дБ, отнесённая к входу, при блокировании, Вт.

Мощность помехи по b – му КППНЭ рассчитывается аналогично (26):

$$P_{ПБНУ_b} = \Delta h \sum_{m=0}^{l-1} W_{ПБНУ}(f), \quad (30)$$

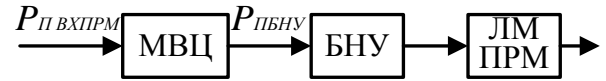
где $\Delta h = [f_{НЭв_b} - f_{НЭн_b}] / l$ – шаг, с которым рассчитывается мощность в пределах b -го КППНЭ, l – количество шагов, Гц; $f = f_{НЭн_b} + m\Delta h + \Delta h / 2$ – значение частоты на m – м шаге в пределах b – го КППНЭ, $0 \leq m \leq l-1$; $W_{ПБНУ}(f)$ – спектральная плотность мощности на частоте f , определяется, Вт/Гц:

$$W_{ПБНУ}(f) = 10^{\left\{ \frac{W_m + W[f, p_{НЭ_b}] - S_{ВЦ}(f) + L_{св}(f_{НЭ_b})}{10} \right\}}, \quad (31)$$

где $W(f, p_{НЭ_b})$ – нормированное значение спектральной плотности мощности p – го излучения, соответствующего b – у КППНЭ, дБ(Вт/Гц); $S_{ВЦ}(f)$ – нормированное значение характеристики частотной избирательности входной цепи (рисунок 9), определяется в соответствии с моделью (8) при $q_s = 1$, $b_{кп_s} = 0$ и $f_{кп_s} = f_{ВЦ}$; $L_{св}(f_{НЭ_b})$ – параметр связи между ПРД и ПРМ на средней частоте КППНЭ, определяется аналогично (23); $f_{НЭ_b}$ – средняя частота b -го КППНЭ.

Коэффициент блокирования от совокупности КППНЭ одного ПРД и совокупности всех рассматриваемых ПРД, соответственно, определяются:

$$K_{БЛ} = \sum_{b=1}^{b_{\max}} K_{БЛ_b}, \quad K_{\SigmaБЛ} = \sum_{b_{\Sigma}} K_{БЛ}, \quad (32)$$



МВЦ – модель входной цепи
БНУ – безынерционное нелинейное устройство
ЛМ ПРМ – линейная модель ПРМ

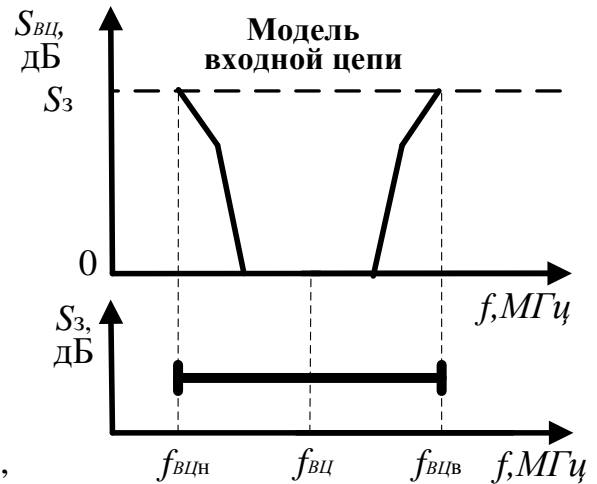


Рисунок 9 – Нелинейная модель ПРМ

где b_{\max} – количество КППНЭ; $b_{\Sigma} = \sum_B b_{\max}$ – общее количество излучений от совокупности ПРД, для которых выполняется частотный критерий (19).

Выявление наиболее опасных излучений и ПРД, которые вызывают эффект блокирования осуществляется при помощи критериев блокирования (КБ):

$$K_{БЛ_b} \leq K_{БЛДОП}, \quad K_{БЛ} \leq K_{БЛДОП}, \quad K_{\Sigma БЛ} \leq K_{БЛДОП}. \quad (33)$$

На этапе КОП также производится анализ помех двухсигнальной интермодуляции в ПРМ в соответствии с одним из выражений:

$$P_{ИМ_{ИМ}} = 2P_{ПБНУ_{a,c}} + P_{ПБНУ_{c,a}} - S(f_{ИМ_{ИМ}}, s) + 2G - 2IP3_{ВЫХ}, \quad (34)$$

где $P_{ПБНУ_{a(c)}}, P_{ПБНУ_{c(a)}}$ – мощности помех на входе БНУ на частотах $f_{П_{a(c)}}, f_{П_{c(a)}}$, дБм; $S(f_{ИМ_{ИМ}}, s)$ – значение избирательности по ОКП с учётом СКП на частоте интермодуляционной помехи, дБ, определяется в соответствии с моделью (8); $f_{ИМ_{ИМ}} = |2f_{П_{a(c)}} - f_{П_{c(a)}}|$ – частота $ИМ$ -го продукта двухсигнальной интермодуляции, где $a = 1..b_{\Sigma} - 1, c = a + 1..b_{\Sigma}$; G – коэффициент усиления преселектора, дБ; $IP3_{ВЫХ}$ – точка пересечения 3-го порядка, отнесенная к выходу, дБм, $IP3_{ВЫХ} = IP3_{ВХ} + G$, $IP3_{ВХ}$ – точка пересечения третьего порядка, отнесённая к входу, дБм.

Суммарная мощность Q продуктов интермодуляции определяется, Вт:

$$P_{ИМ_{\Sigma}} = \sum_{ИМ=1}^Q \left(10^{(P_{ИМ_{ИМ}} - 30)/10} \right) \quad (35)$$

Для оценки степени воздействия продуктов интермодуляции используются энергетические критерии:

$$P_{ИМ_{ИМ}} \leq P_{П доп}, \quad P_{ИМ_{\Sigma}} \leq P_{П доп} \quad (36)$$

В завершении этапа КОП используется интегральный критерий ЭМС:

$$\begin{cases} P_{\Sigma} + P_{ИМ_{\Sigma}} + P_{Ш_{\Sigma}} \leq P_{П доп}, \\ K_{\Sigma БЛ} \leq K_{БЛ доп}. \end{cases} \quad (37)$$

где $P_{Ш_{\Sigma}} = 10^{P_{ШВН}/10} + 10^{P_{ИРП}/10}$ – суммарная мощность промышленных радиопомех $P_{ИРП}$, дБВт и внешних естественных источников шумов $P_{ШВН}$, дБВт.

Критерий учитывает энергетический вклад всех излучений, проникающих на выход ПРМ через различные каналы приёма, а также приращение мощности продуктов интермодуляции, мощности промышленных радиопомех и внешних источников естественных помех. Одновременно проверяется критерий блокирования, учитывающий совокупность парциальных коэффициентов блокирования от различных КППНЭ.

Предлагаемый подход также позволяет идентифицировать излучения и каналы приёма, которые образуют КПП и выявить наиболее опасные излучения и наиболее уязвимые каналы приёма в реальной ЭМО на основе оценки приращения мощности от отдельных КПП к совокупному уровню помех на выходе ПРМ. Энергетическая оценка помех производится с учётом характера частотной зависимости излучений и каналов приёма.

Третья глава посвящена разработке алгоритмов оценки ЭМС систем связи и оповещения МПС в чрезвычайных ситуациях и их реализации в составе

программного комплекса. На рисунке 10 представлен основной алгоритм оценки ЭМС, принцип работы которого состоит в следующем.

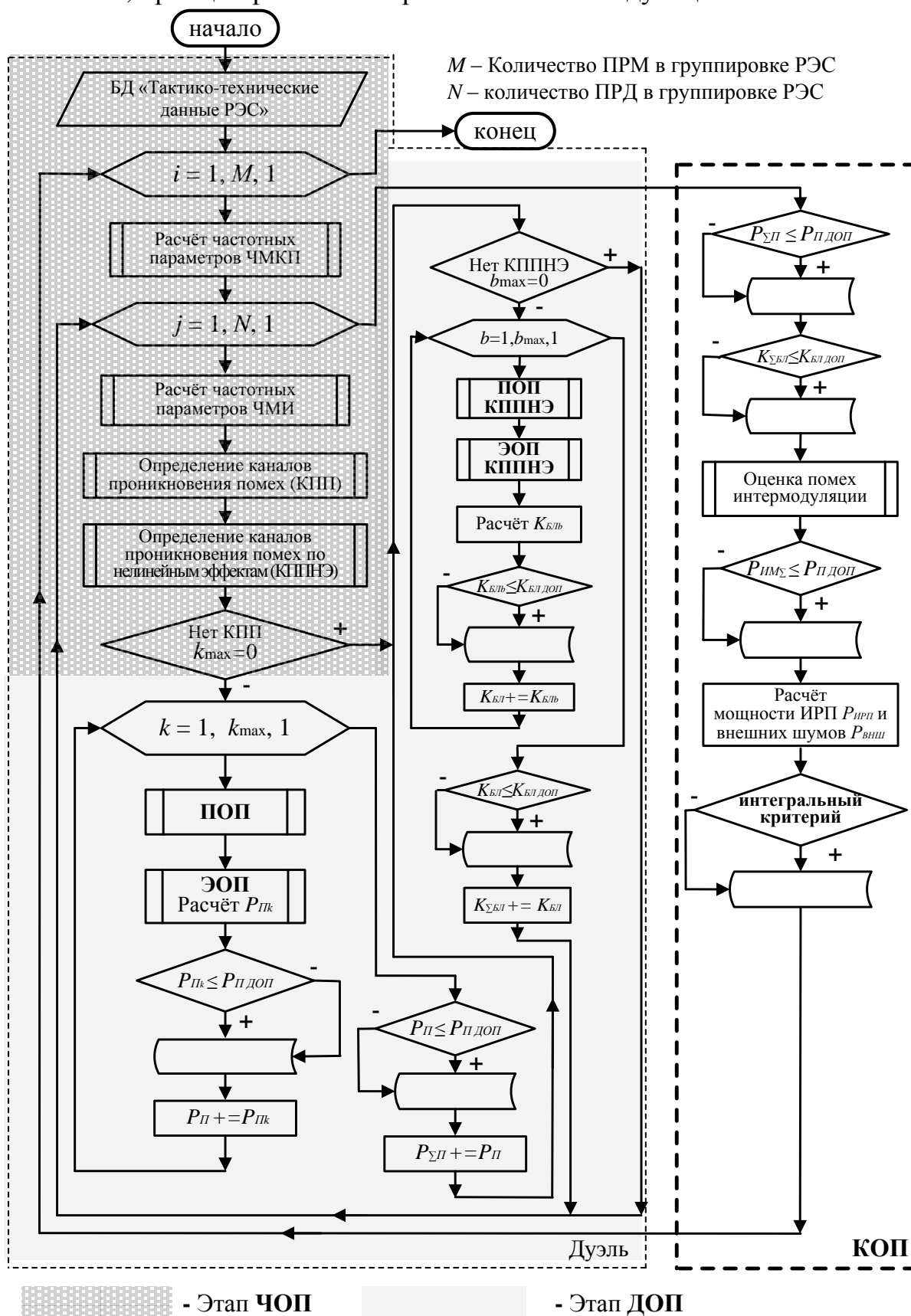


Рисунок 10 – Основной алгоритм оценки ЭМС

Если КПП существуют, т.е. $k_{max} > 0$, то необходимо определить: мощность помех в пределах каждого k -го КПП R_{pk} (24) и осуществить оценку мощности

при помощи соответствующего ЭК (28), $k=1..k_{\max}$; совокупную мощность помех от всех излучений j – го ПРД P_{Π} (26), образующих k_{\max} КПП, и осуществить оценку данной мощности при помощи ЭК (28).

Если КППНЭ существуют, т.е. $b_{\max} > 0$, то необходимо: определить мощность помех в пределах каждого b – го КППНЭ на входе БНУ (30), коэффициент блокирования по b – му КППНЭ $K_{БЛb}$ и осуществить оценку степени блокирования ПРМ при помощи соответствующего КБ (33), $b=1..b_{\max}$; определить коэффициент блокирования от совокупности b – х КППНЭ $K_{БЛ}$ и осуществить оценку степени блокирования ПРМ при помощи соответствующего КБ (33).

Комплексная оценка помех осуществляется на выходе вложенного цикла перебора j – х ПРД. В результате комплексной оценки помех для каждого i – го ПРМ: определяется совокупная мощность помех $P_{\Sigma\Pi}$ (27) от всех ПРД, которые образуют КПП и производится оценка мощности при помощи соответствующего ЭК (28); определяется суммарный коэффициент блокирования $K_{\SigmaБЛ}$ от совокупности ПРД, излучения которых образуют КППНЭ и производится оценка степени блокирования ПРМ при помощи КБ.

Далее определяется наличие или отсутствие помех интермодуляции. Если интермодуляционные помехи существуют, т.е. $Q > 0$, то: определяется мощность IM – й интермодуляционной помехи P_{IMIM} в соответствии с выражением (34) и осуществляется оценка мощности данной помехи при помощи соответствующего ЭК ИМ (36), $IM=1..Q$; определяется суммарная мощность от совокупности Q продуктов интермодуляции $P_{IM\Sigma}$ (35) и производится оценка данной мощности при помощи соответствующего ЭК ИМ (36). Далее производится расчёт мощности промышленных радиопомех $P_{ИРП}$ и внешних естественных шумов $P_{ШВН}$.

В завершении этапа комплексной оценки помех осуществляется проверка интегрального критерия ЭМС (38).

Основной алгоритм оценки ЭМС включает в себя вспомогательные алгоритмы:

1. Алгоритм расчёта частотных параметров излучений ПРД, который определяет частотную модель излучений, рисунок 2.

В алгоритме учитывается способ построения тракта формирования несущей частоты. Для ПРД, в которых используется умножение частоты низкочастотного задающего генератора, учитываются излучения на субгармониках. В противном случае учитываются побочные излучения только на гармониках. Также алгоритм позволяет определить количество ПИ, превышающих уровень ограничительной линии X_3 . Таким образом, в расчётах ЭМС учитывается необходимое количество излучений.

2. Алгоритм расчёта частотных параметров каналов приёма ПРМ и входной цепи, рисунок 4.

Особенностью алгоритма является возможность его применения как для ПРМ супергетеродинного типа, так и для ПРМ прямого усиления. Также алгоритм позволяет определить количество каналов приёма, относительный уровень избирательности которых ниже уровня ограничительной линии S_3 . Это

также позволяет в расчётах ЭМС учитывать необходимое количество каналов приёма.

3. Алгоритм определения каналов проникновения помех, который позволяет определить наличие КПП и КППНЭ, а также идентифицировать излучения и каналы приёма, образующие КПП, и излучения, которые образуют КППНЭ, рисунок 7.

При помощи данных алгоритмов определяются частотные параметры, которые необходимы для этапа энергетической оценки помех.

4. Алгоритмы энергетической оценки помех, которые основаны на использовании предложенных частотно-ограниченных моделей характеристики радиоизлучений (1), характеристики каналов приёма (8), характеристики входной цепи ПРМ.

5. Алгоритм расчёта коэффициента связи между ПРД и ПРМ на средней частоте КПП или КППНЭ (23).

Вторая часть главы посвящена реализации алгоритмов в структуре программного комплекса. Предлагается следующая структура программного комплекса, рисунок 11:

1. База данных. Предоставляет исходные данные для вычислительных модулей. Посредством элементов управления пользовательского интерфейса позволяет осуществлять ввод, отображение и редактирование данных по запросу пользователя;
2. Блоки вычислительных модулей, которые реализуют модели характеристик РЭС (модели ПРМ, модели ПРД, модели антенн, модели среды распространения радиоволн) и полный алгоритм оценки ЭМС РЭС;
3. Система представления результатов оценки ЭМС;
4. Единый графический интерфейс пользователя, обеспечивающий взаимодействие всех перечисленных блоков.

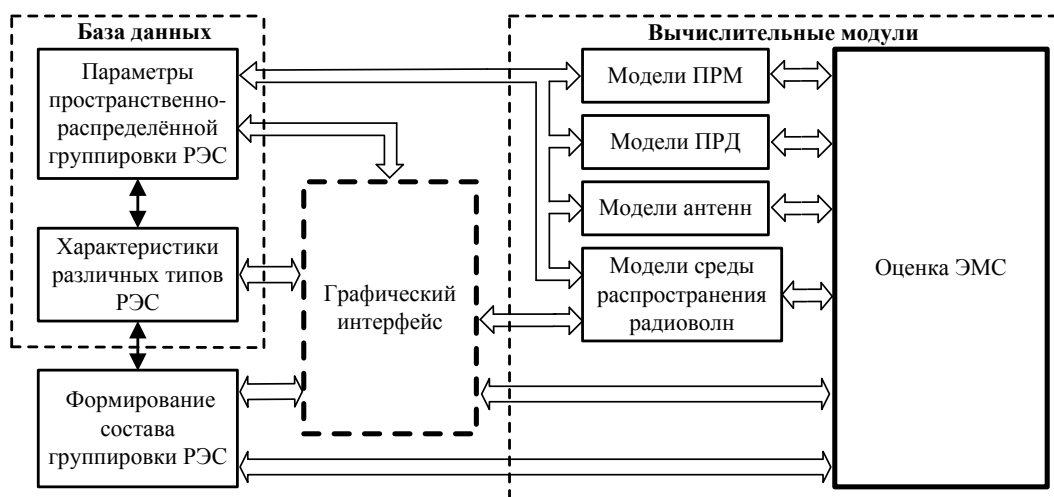


Рисунок 11 – Структура программного комплекса «Анализ ЭМС РЭС МПС»

Структура базы данных «Тактико-технические данные РЭС» включает в себя две категории данных:

1. Параметры пространственно-распределённой группировки РЭС - определяют все необходимые для оценки ЭМС параметры радиопередающих и

радиоприёмных устройств: типы ПРД и ПРМ, классы радиоизлучений, частоты излучений и приёма, мощность излучения, координаты размещения антенн радиопередающего и радиоприёмного устройств, условия распространения радиоволн, высоты, азимуты, углы наклона антенных систем.

2. Характеристики РЭС определяют данные об уровнях внеполосных и побочных излучений для различных типов ПРД, данные о характеристиках различных типов ПРМ – частотный план главного тракта приёма, чувствительность, избирательность по побочным каналам, параметры нелинейности и др., а также данные о характеристиках направленности антенных систем различных типов.

При реализации алгоритмов оценки ЭМС РЭС все классы представлены двумя категориями: классы моделей РЭС (ПРМ, ПРД); классы для реализации этапов оценки ЭМС РЭС (ЧОП, ЭОП, ПОП)

Система представления результатов, интегрированная в полный алгоритм оценки ЭМС, позволяет представлять детализированные результаты оценки ЭМС, что позволяет разрабатывать не только организационные меры по обеспечению ЭМС, но и технические. На рисунке 12 представлено основное окно программного комплекса.

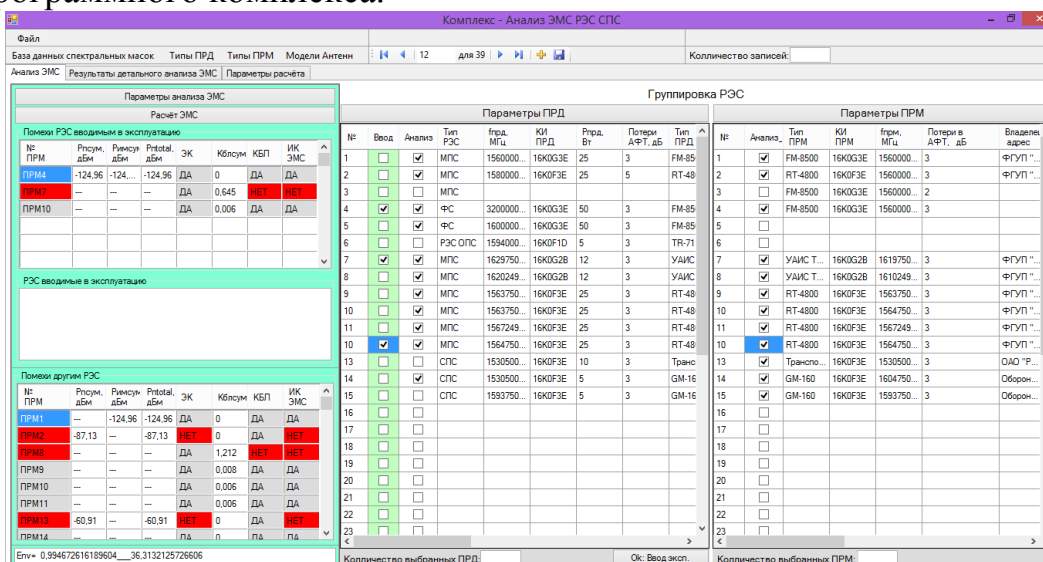


Рисунок 12 – Основное окно программного комплекса

В четвёртой главе представлены результаты вычислительного эксперимента и компьютерного моделирования характеристик РЭС, а также моделирования различных сценариев воздействия излучений на ПРМ. Представлены результаты применения программного комплекса для оценки условий ЭМС реальной группировки РЭС, действующих на объектах системы управления движением судов Калининградского управления Северо-Западного бассейнового филиала ФГУП «Росморпорт».

Целью вычислительного эксперимента является проверка адекватности моделей, методов и тестирование алгоритмов оценки ЭМС.

Основные результаты вычислительного эксперимента и компьютерного моделирования состоят в следующем.

1. Получена графическая модель характеристики основного излучения с учётом внеполосных и побочных излучений на гармониках и субгармониках,

основанная на предложенной модели (1). При этом количество излучений определяется строго в зависимости от заданного уровня ограничительной линии X_3 , а граничные частоты излучений определяются в точках пересечения огибающей характеристики спектральной плотности мощности излучений с ограничительной линией. В результате эксперимента видно, что побочные излучения на гармониках и субгармониках убывают логарифмически линейно.

2. Получена графическая модель основного канала приёма с учётом соседних и побочных каналов приёма, которые образуются при взаимодействии гармоник входного сигнала с гармониками гетеродина в смесителе, основанная на модели (8). Количество каналов приёма также определяется в зависимости от заданного уровня ограничительной линии S_3 . Граничные частоты каналов приёма определяются в точках пересечения огибающей характеристики избирательности с ограничительной линией. Также видно, что ширина полосы частот s -го канала приёма с увеличением номера гармоники входного сигнала уменьшается. Избирательность, а также ширина полосы частот побочных каналов, образованных при суммарном и разностном преобразовании, приблизительно одинаковы, что соответствует действительности для $f_{пч} \ll f_R$.

3. При моделировании сценариев воздействия излучений на ПРМ видно, что форма спектральной плотности мощности излучения на выходе ПРМ изменяется в зависимости от сдвига средней частоты излучения относительно средней частоты канала приёма, а также в зависимости от разницы ширины полосы излучения и ширины полосы канала приёма. При этом ширина полосы КПП и его граничные частоты определяются корректно в зависимости от взаимного расположения частотной модели излучения относительно частотной модели канала приёма для различных сценариев образования КПП.

Полученные результаты моделирования свидетельствуют об адекватности предлагаемых моделей характеристик РЭС, математического аппарата, методики оценки ЭМС и корректной работе алгоритмов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена частотно-ограниченная модель характеристики радиоизлучений. Модель радиоизлучений позволяет представлять основное, внеполосные и побочные излучения на гармониках и субгармониках.

2. Предложена модель одночастотной характеристики избирательности ПРМ, которая позволяет представлять основной и побочные каналы приёма, которые образуются при взаимодействии гармоник входного сигнала с гармониками гетеродина.

3. На основе предложенных моделей характеристик РЭС разработаны методы определения необходимого количества излучений и каналов приёма, которые учитываются в расчётах ЭМС.

4. Предложен метод определения граничных частот излучений и каналов приёма, основанный на поиске участка аппроксимации.

5. Разработана методика оценки ЭМС систем связи и оповещения МПС в чрезвычайных ситуациях основанная на частотно-ограниченных моделях

характеристик РЭС и математический аппарат для реализации алгоритмов.

6. Разработан основной алгоритм оценки ЭМС систем связи и оповещения МПС, на основе которого обоснованы задачи, решаемые на этапах частотной оценки помех, пространственной и энергетической оценки помех, а также комплексной оценки помех.

7. Разработаны алгоритмы частотной оценки помех, которые позволяют определить наличие КПП и КППНЭ и идентифицировать излучения и каналы приёма, которые их образуют.

8. Разработаны алгоритмы пространственной и энергетической оценки помех. Предложенные алгоритмы энергетической оценки помех позволяют выявить наиболее опасные излучения и ПРД, а также наиболее уязвимые каналы приёма и ПРМ в фактической ЭМО.

9. Создан программный комплекс «Анализ ЭМС РЭС МПС», который позволяет производить автоматизированный расчёт ЭМС для реальной группировки РЭС, сосредоточенной на объектах систем связи, адаптированный для получения детальных результатов оценки ЭМС.

10. Результаты работы апробированы и внедрены Калининградским управлением Северо-Западного бассейнового филиала ФГУП «Росморпорт» для оценки условий электромагнитной совместимости группировки РЭС на объектах системы управления движением судов, управлением по Калининградской области филиала ФГУП «Радиочастотный центр центрального федерального округа» в Северо-Западном федеральном округе для осуществления поиска и определения источников недопустимого воздействия помех в группировке РЭС на объектах систем связи.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Масаль А.В. Алгоритм спектрального метода анализа электромагнитной совместимости, основанный на частотно-ограниченных моделях характеристик РЭС // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. - 2011. - №6. С. 100-110.

2. Groshov G.A., Masal A.V. Methodology of analysis of electromagnetic safety of radioelectronic means under the influence of intentional radio interference // Vestnik of the Baltic Federal University named after I. Kant. – 2013. Vol. 10. P. 105-113.

3. Groshov G.A., Masal A.V. Imitation modeling of characteristics of radioelectronic means for assessment of electromagnetic compatibility // Electromagnetic waves and electronic systems. – 2013. T. 18. No 6. P. 15 - 26.

В других изданиях:

4. Masal A.V. Modeling of the base station of mobile communication systems // Scientific and technical developments in solving problems of the fishing fleet and training of personnel: materials of the 9th inter-university conference of aspirants, candidates and doctoral students, 11-12 November, 2008. / BGARF. – Kaliningrad: publ-house «BGA RF», 2009. - P. 181 – 187.

5. Масаль А.В. Вопросы создания вычислительных алгоритмов анализа электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств // IX Международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии: труды симпозиума, 13-16 сентября 2011 / ЛЭТИ. – Санкт-Петербург, 2011. – С.251-255.

6. Масаль А.В. Моделирование радиоэлектронных средств для целей создания программного комплекса анализа электромагнитной совместимости // Научно-технические разработки в решении проблем рыбопромыслового флота и подготовки кадров: материалы десятой межвузовской НТК аспирантов, соискателей и докторантов, 21 – 27 октября 2010 г. / БГАРФ. – Калининград: изд-во «БГА РФ», 2011. – С. 174 – 179.

7. Масаль А.В. Вопросы реализации программного комплекса анализа электромагнитной безопасности радиоэлектронных средств // Морская индустрия, транспорт и логистика в странах региона Балтийского моря: новые вызовы и ответы: материалы X Юбилейной международной конференции, 29-31 мая 2012 г. – Калининград: изд-во «БГАРФ», 2012. – С. 210 – 217.

8. Масаль, А.В. Оценка электромагнитной безопасности в группировке радиоэлектронных средств // I Балтийский морской форум: материалы международного морского форума, 28-31 мая 2013 г. – Калининград: изд-во «БГА РФ», 2013. – С. 52-56.

9. Масаль, А.В. Алгоритмы энергетической оценки помех для анализа ЭМС // Радиочастотный спектр. – 2014. - №7. – С.32-37.

10. Грошев Г.А., Масаль А.В. Программный комплекс оценки электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств // Известия КГТУ. – 2015, № 38. С. 170-180.

11. Грошев Г.А., Масаль А.В. Программный комплекс оценки ЭМС для обеспечения электромагнитной безопасности РЭС морской подвижной службы // III Балтийский морской форум: материалы международного форума: международная научная конференция «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии», 24-30 мая 2015 г. / «БГАРФ» ФГБОУ ВПО «КГТУ». – Калининград: изд-во «БГА РФ», 2015. – С. 366-378.

12. Масаль, А.В. Создание современного программного обеспечения для расчётов электромагнитной совместимости // Радиочастотный спектр. – 2015, №9. – С.40-44.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

13. Масаль А.В., Грошев Г.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012618790. Заявка № 2012616667. Дата поступления 6 августа 2012 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26 сентября 2012 г.

14. Масаль А.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012618789. Заявка № 2012616666. Дата поступления 6 августа 2012 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26 сентября 2012 г.

Масаль Андрей Витольдович

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ
ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ
СИСТЕМ СВЯЗИ И ОПОВЕЩЕНИЯ МОРСКОЙ ПОДВИЖНОЙ
СЛУЖБЫ
В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать _____ 2016 г.

Формат 60x84 1/16

Печать офсетная. Объем – 1,1 а.л.

Тираж 100 экз. Заказ _____.

Издательство БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ»
236029, г. Калининград, ул. Молодежная, 6