

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ АВИАЦИОННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи
УДК 004.621:004.681

ШАТИЛО ЯРОСЛАВ ЛЕОНИДОВИЧ

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ
ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ**

05.13.21 – системы защиты информации

Диссертация на соискание научной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Брыль Василий Михайлович,
кандидат технических наук, профессор,
профессор кафедры информационных
технологий ИИДС НАУ

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
РАЗДЕЛ 1. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СУЩЕСТВУЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ ТЗИ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ВЫЯВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ОПАСНЫХ СИГНАЛОВ	12
1.1. Носители информации, ее источники и каналы утечки	13
1.2. Средства выявления и цифровой обработки опасных сигналов.....	23
1.3. Возможности комплексов ТЗИ по защите информационного ресурса.....	30
1.4. Постановка задачи исследования.....	36
Выводы к первому разделу	38
РАЗДЕЛ 2. ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПОЛЕЙ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ ОПАСНЫХ СИГНАЛОВ КОМПЛЕКСАМИ ТЗИ	40
2.1. Методы дифференциальных преобразований при моделировании физических процессов в комплексах ТЗИ.....	40
2.1.1. Метод одномерных дифференциальных преобразований краевых задач	41
2.1.2. Метод одномерных дифференциальных преобразований нелинейных граничных условий краевых задач.....	49
2.2. Метод баланса дифференциальных спектров для моделирования физических процессов в комплексах ТЗИ.....	59
2.3. Моделирование процессов выявления опасных сигналов в комплексах ТЗИ	67
Выводы ко второму разделу	77
РАЗДЕЛ 3. МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ОПАСНЫХ СИГНАЛОВ КОМПЛЕКСАМИ ТЗИ	79
3.1. Метод оценки местоположения источника опасного сигнала.....	79
3.2. Методы ускоренного анализа опасных сигналов комплексами ТЗИ.....	87
3.3. Метод выявления каналов утечки информации	93
3.4. Структурно-автоматная модель перспективного комплекса ТЗИ.....	97
Выводы к третьему разделу	107
РАЗДЕЛ 4. ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСОВ ТЗИ	109
4.1. Апробация разработанных методов и моделей	109
4.2. Оценка предполагаемой эффективности использования комплексов ТЗИ	116
4.3. Расчет количественной оценки показателей эффективности комплексов ТЗИ	122
4.4. Сравнительный анализ эффективности смоделированного и существующих комплексов ТЗИ.....	129
Выводы к четвертому разделу	137
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	139
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	142
Приложение А. Формирование вербальной модели объекта исследования ...	151
Приложение Б. Формирование структурно-автоматной модели объекта исследования на основе базовых событий	160
Приложение В. Излучатели электромагнитных колебаний	169
Приложение Г. Акты внедрения	176

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ИРИ - источник радиоизлучения
ТС - технические средства
ВЧ – высокочастотные излучатели
ПЭМИН - побочные электромагнитные излучения и наводки
ПЭМИ - побочные электромагнитные излучения
ЦОС - процесс цифровой обработки сигнала
СВТ – средства вычислительной техники
БИС - большая интегральная схема
СБИС – сверхбольшая интегральная схема
СТЗИ – средства технической защиты информации
ППРЧ - псевдослучайная перестройка рабочей частоты
НИОС - неизвестные источники опасных сигналов
РИОС – радиотехнический источник опасных сигналов
РЭС - радиоэлектронные средства
РЭО - радиоэлектронная обстановка
ИОС - источник опасных сигналов
АРУ – автоматизированное радиоуправление
СРП - сканирующий радиоприемник
ИУС - информационно-управляющая система
ТОВ - телевизионно-оптический визир
СНИ - система накопления информации
БПФ – быстрое преобразование Фурье
АМ - амплитудная модуляция
ФМ – фазовая модуляция
ЧМ – частотная модуляция
ЭИ – эффективность использования
ПМВС - правила модификации компонентом вектора состояния
ИР – информационные ресурсы
БД – базы данных
ТЗИ – техническая защита информации
ФРИП – формула расчета интенсивности переходов
ФРИАП - формула расчета интенсивности альтернативных переходов
ФРВАП – формула расчета вероятностей альтернативных переходов
КТС – контроль технического состояния
АПОКУИ – алгоритм поиска или обнаружения канала утечки информации
ТСПИ – технические средства перехвата информации
ОТСС – основные технические средства и системы
ВТСС – вспомогательные технические средства и системы
ТСС - технические средства и системы

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В условиях глобализации и нарастающей конкурентной борьбы значение информации во всех без исключения сферах деятельности человека стремительно возрастает. Постепенно она становится одним из определяющих факторов, непосредственно влияющих на развитие как отдельных отраслей науки и техники, так и государства в целом.

Наряду с этим постоянно возрастают угрозы несанкционированного доступа к информации, нарушения ее целостности и конфиденциальности. Все это приводит к тому, что обеспечение защиты информационного ресурса на современном этапе развития цивилизации становится наиболее приоритетной задачей для подавляющего большинства служб информационной безопасности государственных учреждений и коммерческих организаций. Различные аспекты этого процесса приобретают с каждым годом все большую актуальность. Оценить их уровень можно разными способами, среди которых наиболее востребованными являются экспертные методы, а также современные методы и средства мониторинга.

В настоящее время фактически узаконена некоторая либерализация использования радиочастотного спектра и рынка радиосредств, что, в свою очередь, привело к появлению множества неконтролируемых устройств негласного съема информации и нелегальных средств ее передачи. В связи с этим на совершенно новый, качественный уровень вышла проблема адекватного противостояния возможным угрозам в ходе проведения контроля радиообстановки, обнаружения электромагнитных излучений, выявления и локализации потенциально опасных источников радиоизлучения (ИРИ). Решить ее классическими математическими методами, требующими выполнения значительного объема вычислений в пределах ограниченного времени или в режиме онлайн, в данное время становится все проблематичнее. В связи с этим возникает необходимость во внедрении других аналитических и

численно-аналитических методов решения сложных краевых задач, существенно уменьшающих вычислительную сложность моделирования физических процессов с использованием ПЭВМ, а также теоретических основ построения комплексов технической защиты информации (ТЗИ), которые являются одной из главных систем защиты информации, что и определило актуальность темы исследований.

Теоретические и прикладные вопросы выявления источников радиоизлучений комплексами ТЗИ являются предметом исследований многих отечественных и зарубежных ученых, таких как Скурихин В.И., Ценков Г.В., Тихонов В.И., Колмогоров А.Н., Пухов Г.Е., Поляков П.Ф., Петрович Н.Т., Розмахнин М. К., Варакин Л. Е., Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Баранов В. Л. и др.

В то же время исследования проблемы выявления и локализации потенциально опасных источников радиоизлучения, построения комплексов ТЗИ не приобрели завершенного характера, что обусловило выбор темы диссертационной работы, определило ее цель и задачи.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Диссертационная работа выполнялась в соответствии с тематикой научно-исследовательских работ (НИР), проводимых в Учебно-научном институте защиты информации Государственного университета телекоммуникаций в рамках НИР “Безпека – 07П” (госрегистрация № 01086 от 25.12.2005) и в Институте Управления государственной охраны Украины Киевского национального университета имени Тараса Шевченко в рамках постановки лабораторной базы по дисциплине “Технические средства охраны”.

Цель и задачи исследования

Целью работы является повышение эффективности функционирования комплексов ТЗИ путем внедрения адаптированных и усовершенствования существующих методов выявления и обработки опасных сигналов, возникающих в каналах утечки информации. Достижение поставленной цели обусловило постановку и решение следующих задач:

1) проанализировать причины возникновения источников и каналов утечки информации, возможности существующих комплексов ТЗИ при выявлении и обработке опасных сигналов в решении задач защиты информации;

2) внедрить методы для построения усовершенствованных моделей физических процессов (полей) в комплексах ТЗИ для выявления опасных сигналов в пределах допустимых погрешностей за заданное время;

3) усовершенствовать метод оценки местоположения источника опасного сигнала, а так же усовершенствовать ускоренные методы анализа и обработки опасных сигналов комплексами ТЗИ;

4) обосновать тактико-технические требования к современным комплексам ТЗИ, обосновать методы и сформулировать принципы их построения, а также оценить эффективность использования смоделированного комплекса ТЗИ.

Объектом исследования в работе является процесс измерения и вычисления в автоматическом режиме параметров опасных сигналов комплексами ТЗИ.

Предмет исследования – методы выявления и обработки (анализа) комплексами ТЗИ опасных сигналов, возникающих в каналах утечки информации.

Методы исследования. Для решения поставленной задачи в работе использовались методы теории графов и теории вероятностей, методы теории автоматов и информационных структур – для моделирования физических процессов (полей) и построения структурно-автоматной марковской модели комплексов ТЗИ, методы теории систем и защиты информации – для анализа возможностей комплексов ТЗИ по защите информационных ресурсов, методы факторного анализа – для определения совокупности показателей эффективности комплексов ТЗИ, ситуационного анализа – для выявления и идентификации опасных сигналов, графического анализа – для наглядного представления результатов оценки эффективности комплекса ТЗИ, корреляционного анализа – для усовершенствования ускоренного метода анализа опасных сигналов.

Научная новизна полученных результатов. Новыми научными результатами, полученными в работе, являются:

1) усовершенствована технология применения современных комплексов технической защиты информации (ТЗИ). Обоснована возможность внедрения нелегитимных получателей информации (злоумышленников) в систему информационного обмена, определен полный перечень необходимых действий для выявления побочных электромагнитных излучений и наводок, проведен анализ возможностей оборудования комплексов ТЗИ, что позволило создать модель цифровой системы мониторинга эфира;

2) для решения задач защиты информации комплексами ТЗИ впервые предложены существующие методы моделирования физических процессов на основе одномерных дифференциальных преобразований нелинейных краевых задач с линейными и нелинейными граничными условиями за заданное время в пределах допустимой ошибки, а также метод баланса дифференциальных спектров в нелинейных краевых задачах для максимально точного определения опасных сигналов комплексами ТЗИ.

3) усовершенствован метод оценки местоположения источника опасного сигнала, представленный в виде поэтапной процедуры и укрупненного пошагового алгоритма поиска и обнаружения каналов несанкционированного воздействия и получения информации, реализованного затем в построенной марковской структурно-автоматной модели комплекса ТЗИ; это позволило оптимизировать процесс выявления и обработки опасных сигналов, определить роль человека в процессах поиска и обнаружения каналов утечки информации, сократить время, необходимое комплексу ТЗИ для реализации этого процесса;

4) усовершенствованы ускоренные методы анализа опасных сигналов в комплексах ТЗИ, уменьшена вычислительная сложность моделирования физических процессов (полей) на ПЭВМ; усовершенствованы процедуры моделирования физических процессов (полей) в комплексах ТЗИ, что позволило выполнить моделирование процесса поиска и обнаружения сигнала, приема, распознавания, установления его адекватности определенному классу сигналов

для определения степени опасности для объекта и его информационной системы, связать модуль и аргумент комплексной функции преобразования Фурье для анализа опасных сигналов в пределах допустимых погрешностей за заданное время;

5) получили дальнейшее развитие методы и принципы построения комплексов ТЗИ, оценки их эффективности, что позволило с учетом сформулированных тактико-технических требований обосновать состав перспективных комплексов ТЗИ и формализовать процесс его проектирования; обосновать критерии идентификации и время анализа радиосигналов при разнесенном приеме; определить требования к неравномерности амплитудных характеристик каналов и степень развязки между ними; определить расстояние от неизвестных источников опасных сигналов до приемных антенн; исследовать показатели эффективности комплекса ТЗИ; доказано, что комплекс ТЗИ не теряет работоспособности при отказе отдельных устройств или подсистем, входящих в его состав, обладая структурной, временной, информационной избыточностью на уровне отдельных подсистем и функциональной избыточностью на уровне комплекса в целом;

6) из всего множества параметров, характеризующих функциональные особенности разработанного комплекса ТЗИ, выбраны и представлены в таблице 20 количественных и качественных параметров, в наибольшей степени влияющих на его эффективность;

7) сравнительный анализ параметров смоделированного комплекса ТЗИ и приведенных в таблице основных характеристик наиболее часто используемых на практике комплексов ТЗИ: Астра В, АКОР, RS-1000/8, Дельта, Крона 6Н показал - что по 7 параметрам смоделированный комплекс существенно превосходит аналогичные показатели рассматриваемых комплексов, а по 13 параметрам разработанный комплекс совпадает с лучшими образцами существующих комплексов ТЗИ.

Практическое значение полученных результатов. Новые научные результаты, полученные в диссертационной работе, в совокупности составляют почву для разработки:

1) методики моделирования процессов выявления опасных сигналов в комплексах ТЗИ, которая является дискретным аналогом способа, используемого при решении систем линейных интегральных уравнений, повышает скорость обработки и расширяет возможности анализа опасных сигналов;

2) методики моделирования физических процессов, позволяющей расширить область применения аналитических моделей на задачи с нелинейными краевыми условиями;

3) методики выделения антенны комплекса, имеющей наибольший уровень сигнала, для повышения точности определения местоположения источника опасного сигнала;

4) алгоритма поиска и обнаружения каналов утечки информации комплексом ТЗИ, когда в произвольные моменты времени дискретно измеряются параметры, характеризующие режим его использования;

5) ускоренного метода анализа опасных сигналов комплексами ТЗИ, который по своему быстрдействию превосходит наиболее быстрые известные классические методы;

6) методики выбора показателей эффективности комплексов ТЗИ, которая позволяет сократить время и существенно уменьшить затраты на проектирование комплексов за счет уменьшения объемов испытания.

Результаты исследований реализованы:

1) во время разработки специального программного обеспечения для комплектации информационно-аналитической системы «Технические средства защиты» Института Управления государственной охраны Украины Киевского национального университета им. Тараса Шевченко (Акт реализации № 3/11/3 – 210 от 28.10.2014 г.);

2) при обосновании принципов и путей создания, характеристик и параметров систем защиты в научно-исследовательской работе «Безпека – 07П» в Учебно-научном институте защиты информации Государственного университета телекоммуникаций (Акт реализации № 77/391 от 26.06.2012г.).

Личный вклад соискателя. Все положения, выносимые на защиту, получены диссертантом самостоятельно и опубликованы в научных профессиональных специализированных изданиях. В публикациях, написанных в соавторстве, автору принадлежат:

- в [29] – утверждения 1 и 2;
- в [49] – алгоритм предварительное сжатие сигнала перед его обработкой;
- в [51] – метод применение линейных интегральных преобразований для восстановления опасного сигнала по заданному модулю;
- в [70] – процедура усовершенствования мультипликативного метода определения корреляционной функции;
- в [95] – структура комплекса.

Апробация результатов диссертации. Основные научные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 5 научно-практических конференциях и семинарах, а именно на:

- 1) Третьей Международной научно-технической конференции (НТК) “Інформаційні технології та захист інформації”, (Харьков, 2012);
- 2) Первой Международной научно-технической конференции “Захист інформації і безпека інформаційних систем” (Львов, 2012);
- 3) Международной научно-технической конференции “Інформаційні технології та безпека інформаційно-комунікаційних систем” (Винница, 2012);
- 4) International Scientific-Practical Conference “Information Control Systems and Technologies”, ICST- Odessa (Одесса, 2013);
- 5) Межведомственной научно-практической конференции “Информационная безопасность в военной сфере. Современное состояние и перспективы развития” (Киев, 2015).

Публикации. Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в 13 научных работах, в том числе 8 статьях в научных специализированных профессиональных изданиях, утвержденных МОН Украины. Из них, 4 работы (30, 53, 67 и 71 публикации) без соавторов; все статьи напечатаны в изданиях Украины, которые включены в международные наукометричные базы. Дополнительно основные научные результаты отображены в 5 тезисах докладов на НТК (32, 53, 69, 72 и 95 публикации), а также в отчетах о проведении НИР «Безпека – 07П» и НИР «Технічні засоби охорони», что подтверждается соответствующими Актами реализаций (Приложения Г).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из вступления, 4 разделов, которые содержат 31 рисунок и 15 таблиц, выводов, 4 приложений и списка использованных источников, который содержит 105 наименований. Общий объем диссертации составляет 177 страниц, из которых 37 страниц занимают приложения, перечень условных сокращений и список использованных источников.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СУЩЕСТВУЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ ТЗИ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ВЫЯВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ОПАСНЫХ СИГНАЛОВ

Радиоэлектронные устройства, предназначенные для решения отдельных задач защиты информации, используемые автономно или объединенные в подсистемы, позволяют в нынешнее время с различной степенью эффективности решать задачи защиты информационных ресурсов (ИР) от их несанкционированного получения нелегитимными пользователями (злоумышленниками), а также от утечки информации по открытым и закрытым каналам. Учитывая тот факт что на сегодня четкая классификация таких каналов отсутствует, необходимым становится проведение прежде всего структурированного анализа физической природы возникновения опасных сигналов и оценивания возможностей по обеспечению их эффективному выявлению и обработке, а также использования носителей информации в качестве возможных каналов утечки ИР и их защиты средствами существующих комплексов ТЗИ. Под информацией (рис. 1.1) в данном случае будем понимать первичные, необработанные, но вместе с тем документально зафиксированные материалы (факты) из различных областей науки, техники и т.д., являющиеся основой для дальнейшей обработки и преобразования в сведения, данные.



Рис. 1.1. Классификация информации

Под информационным ресурсом будем понимать организованную совокупность информационных продуктов – материалов, сведений, данных и знаний, зафиксированную в информационных системах или же на соответствующих носителях информации и предназначенную для обеспечения реализации определенных информационных задач.

1.1. Носители информации, ее источники и каналы утечки

Носителем информации может быть, как известно, либо физическое лицо, либо же материальные объекты – документы, технические средства обработки информации с сопутствующими их работе информационными процессами, в том числе физические поля, в которых информация может быть отображена в виде символов, образов, сигналов, технических решений или действий. Носители, имеющие функциональную значимость для регламентированного некоторой технологией процесса информационного обмена между конечным пользователями, называют *прямыми носителями* информации. В силу своих физических свойств и наличия в собственной структуре электромагнитных, оптических и/или акустических излучателей они могут создавать вокруг себя множество физических полей, которые при взаимодействии друг с другом претерпевают различные преобразования, переходя из одного вида в другой. В результате этого возникает множество *косвенных носителей информации* первого уровня, которые, в свою очередь, создают множество носителей второго уровня и т.д. (рис. 1.2).

Перенос информации с одного носителя на другой или же на альтернативный носитель может осуществляться только при одновременном выполнении трех условий: пересечении пространственных характеристик носителей информации при непосредственном обмене данными между ними; совпадении временных характеристик носителей при обмене данными; распознавании формы представления передаваемой информации принимающей стороной. При этом перенос информации с прямых носителей на косвенные является односторонним, в связи с чем косвенные носители могут стать

предпосылкой для утечки информации, но не могут быть использованы злоумышленником для уничтожения, искажения или фальсификации данных.



Рис. 1.2. Источники излучения информационных сигналов

Если субъект, не включенный в систему обмена сообщениями, может выполнить описанные выше условия относительно хотя бы одного из прямых или косвенных носителей, то появляется угроза безопасности информации. Выполнение злоумышленником указанных условий в отношении прямых носителей создает угрозу не только утечки, но и возможность искажения или уничтожения информации, а в случае использования вычислительной техники угрозу блокирования нормального функционирования информационной системы.

Часто наряду с термином «носитель информации» встречается термин «источник информации». Источник – материальный объект или субъект информации, способный накапливать, хранить, преобразовывать и выдавать информацию в виде сообщений или сигналов различной физической природы. В последнее время до 90 % всей полезной информации берется из открытых и относительно открытых (конфиденциальных) источников [86]. При этом лишь от

10 до 15 % из указанных 90 % существует в готовом виде, а остальные 85–90 % получаются в результате сравнения, анализа и синтеза разносторонних и разбросанных по разным источникам данных и фактов. В этом контексте, например, специалистами по киберразведке под относительно открытыми (конфиденциальными) источниками понимаются электронные ресурсы, требующие регистрации для последующей работы в них (форумы, большинство из сетевых сервисов и т.п.) или люди, общающиеся с помощью социальных сетей, чатов, средств быстрого обмена сообщениями или по электронной почте. Под открытыми ресурсами – ресурсы, которые могут быть получены официальным путем без привлечения органов добывания и нарушения норм международного права и национального законодательства. К ним, как правило, принадлежат:

- средства коммуникации – информационные агентства, печатные СМИ (газеты, журналы и т.п.), аудиовизуальные СМИ (радио, телевидение), электронные СМИ, информационные ресурсы сети Internet и т.п.;

- общественная информация – правительственные сообщения, финансовые планы, демографические данные, законотворческие акты, материалы пресс-конференций, речи, презентации, результаты опрашиваний и т.п.;

- научные и профессиональные данные – академические исследования, НДДКР, материалы научных конференций, семинаров и круглых столов, научные публикации и т.п.;

- геоинформационные материалы – карты, атласы, географические сведения относительно определенных объектов и т.п.

Еще одним существенным источником открытой информации специалисты по киберразведке считают так называемые электронные “on-line” базы данных (БД), которые, как правило, делятся на такие группы: “on-line” системы для массового потребителя (consumer online market); информационные системы, реализованные в виде Internet-Сервера (например, информационная служба Business Intelligence and Data Warehouse); профессиональные базы данных. Исходя из этого можно сделать вывод, что любой носитель информации при взаимодействии через некоторую физическую среду с нелегитимным получателем информации (злоумышленником) может стать ее источником. Причем это взаимодействие может быть инициировано как

носителем, так и злоумышленником. Более подробно источники информации (источники излучения информативных сигналов) описаны в приложении В.

Всякий информационный обмен предполагает, как известно, наличие получателя информации, способного ее воспринимать. Получатель информации – «материальный объект или субъект, воспринимающий информацию во всех формах ее проявления с целью дальнейшей ее обработки и использования» [42]. В качестве получателя информации при радиомониторинге эфира выступают зачастую технические средства (ТС), образующие в процессе взаимодействия с источниками информации каналы четырех основных типов, а именно: пользователь – пользователь; пользователь – ТС; ТС – ТС; ТС – пользователь.

Это предопределяет направление потоков информации. При этом, если получатель является легитимным, то образуется *легитимный канал информационного обмена*. Если же получатель является нелегитимным (злоумышленником), то образуется *канал утечки*. При распределении информационного потока в направлении от носителя к получателю образуется *обобщенный канал утечки*. Если же информационный поток в виде явного или скрытого воздействия направлен по вышеуказанным четырем типам каналов от злоумышленника к носителю информации, который в этом случае может стать ее источником, то возникает так называемый *обобщенный канал информационного воздействия на носитель информации*. В зависимости от того, на какой параметр носителя информации задумано осуществить воздействие, злоумышленником могут быть применены психические, физические, программно-математические, радиоэлектронные и другие способы и средства. Параметрами, на которые злоумышленником задумано осуществить воздействие, могут являться различные характеристики материальных носителей, в том числе и личностные характеристики их главного прямого носителя информации объекта – пользователя.

Внедрение злоумышленника в систему информационного обмена (рис. 1.3), которая, в идеале, должна быть замкнута и ограничена кругом лиц, имеющих право на доступ к информации, может осуществляться через прямые или косвенные носители. Однако на практике замкнуть систему обмена не удастся из-за наличия множества структурных связей между элементами системы.

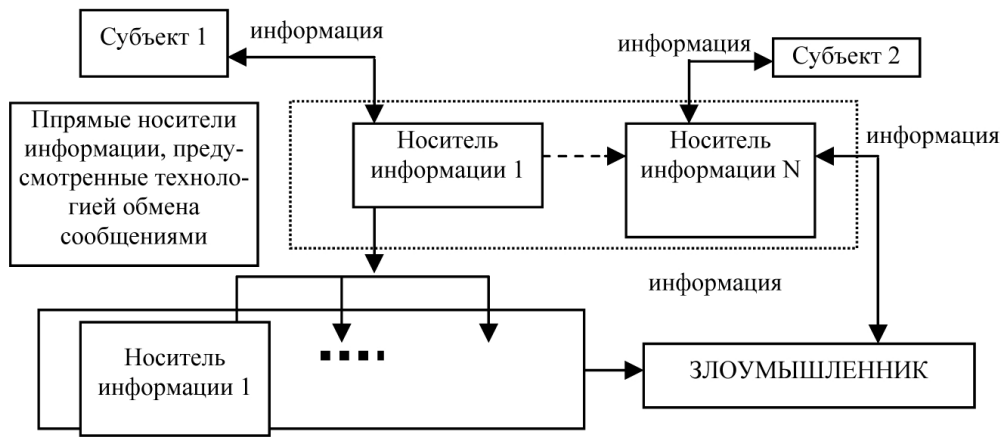


Рис. 1.3. Схема внедрения злоумышленника в систему информационного обмена

При радиомониторинге эфира канал передачи информации может быть образован с помощью модемов и коммутационного оборудования, являющихся прямыми носителями. При этом в компьютер на аппаратуру передачи информации поступают сигналы постоянного тока, преобразования которых в частотно или фазомодулированный сигнал выполняет на передающей стороне модулятор. На приемной стороне обратное преобразование реализуется демодулятором, принимающим сигналы, превращая их в сигналы постоянного тока. Значение частоты генераторов при частотной модуляции определяется исходя из заданной скорости передачи информации по каналу связи. При исправном кабеле и отсутствии дефектов в экранирующей оплетке перехватить информацию, передаваемую по каналу связи, из-за излучения кабеля очень трудно. Однако возможность перехвата появляется в результате плохого состояния оплетки кабеля, соединителей, направленных ответвлений и т.п. Это приводит к тому, что неисправные или покрытые коррозией элементы могут быть причиной излучений, создавая, таким образом, косвенные носители.

В подразделе 1.1 были рассмотрены физические принципы образования прямых и косвенных носителей информации, составляющих систему информационного обмена. Эта система при обработке информации, подлежащей защите, в идеале должна быть закрытой, но на практике всегда обладает той или иной степенью открытости множества структурных связей, которые существуют между элементами как внутри, так и вне системы. Наличие подобных связей дает основание рассматривать любую информационную систему как экосистему.

Метод анализа таких систем заключается в том, что любая экосистема при исследовании всегда разделяется на две подсистемы: «центральный» объект, с точки зрения которого все другие элементы этой системы рассматриваются как «среда и условия его существования» и «ресурсы». Под «центральным» объектом понимается выделенный компонент экосистемы, уровень активности которого зависит от совокупности качественных и количественных характеристик этого компонента и среды, а его связи с остальными компонентами экосистемы определяют взаимодействие между ним и окружающей его средой и устанавливают границы экосистемы. В качестве выделенного компонента системы («центрального» объекта) будем рассматривать каждый из множества выявленных прямых (функционально значимых) носителей информации. Прямые носители информации в силу своих физических свойств могут порождать функционально незначимые для данного процесса информационного обмена косвенные носители информации, которые, в свою очередь, также могут переносить информацию на другие косвенные носители, образуя таким образом канал утечки.

Множество каналов утечки информации представляет собой лес F , состоящий из множества деревьев M_1, \dots, M_m , каждое из которых характеризует конкретный канал утечки информации и состоит из корня (косвенного носителя) и из m попарно непересекающихся поддеревьев. Точка, в которой деревья разветвляются на ветви, представляет собой узел. Тогда множество узлов образует уровень информационного взаимодействия системы, если они обладают следующими свойствами:

- события, происходящие в узлах одного уровня, независимы;
- события, происходящие в узлах i -го и $i+1$ -го уровней, несовместимы;
- узлы, образующие i -й уровень, являются корнями поддеревьев, остальные узлы которых расположены на $i+1$ уровне.

При распространении в окружающей среде от «центрального» объекта (прямого носителя) к нижестоящему уровню (косвенному носителю) сообщения естественным образом искажаются и затухают, так как в канале утечки имеют место две принципиально различающиеся группы шумов: шум физического (флуктуационного) происхождения, вызывающий появление синтаксической ошибки, и шум семантический, вызывающий появление семантической ошибки при приеме и передаче сообщений. Очевидно, что

синтаксическая ошибка преобладает в среде распространения сообщений (побочной линии связи), а семантическая – в приемнике-преобразователе сообщений, причем вероятность того, что на выходе i -го приемника-преобразователя сообщений может иметь место некоторая ошибка (либо синтаксическая, либо семантическая, либо синтаксическая и семантическая одновременно), можно определить следующим образом:

$$P_{\text{юш}} = P_{\text{ил}}(1 - P_{\text{ипр}}) + P_{\text{ипр}}(1 - P_{\text{ил}}) + P_{\text{ил}}P_{\text{ипр}}, \quad (1.1)$$

где $P_{\text{юш}}$ – вероятность искажения сообщения;

$P_{\text{ил}}$ – вероятность синтаксического искажения сообщения в линии;

$P_{\text{ипр}}$ – вероятность семантического искажения сообщения в приемнике-преобразователе.

Для уничтожения, искажения или фальсификации информации злоумышленнику необходимо иметь доступ к прямым носителям. При этом каждый из выявленных прямых носителей информации рассматривается в качестве «центрального» объекта с его структурными связями, порождающими косвенные носители (функционально незначимые). Циркуляция файла информации в устройствах компьютера при его создании и передаче по каналу связи сопровождается образованием прямых (функционально значимых) носителей информации, которыми в данном конкретном случае являются:

1) субъект 1; устройства компьютера 1 (клавиатура, дисплей, накопители, принтер); канал передачи информации (данных);

2) субъект 2; устройства компьютера 2 (клавиатура, дисплей, накопители, принтер).

Рассмотрим более подробно каждый из перечисленных прямых носителей.

Субъект 1, Субъект 2. Пользователи (люди) являются самым ненадежным звеном в ряду носителей информации, что подтверждается данными, приводимыми в литературе, и практикой. Изучая их поведение, злоумышленник обычно просчитывает все возможности, допустимые пределы использования, а также степень их надежности как возможного источника. Существует тщательно разработанная классификация источников информации, среди которых встречаются как «инициативные», так и завербованные злоумышленником. Их деятельность направляется определенными целями и управляется психикой, представляющей собой ценностно-мотивированный комплекс. Поэтому

понимание ценностей конкретного человека и мотивов его поведения дает возможность подобрать к нему ключи и получить необходимую информацию.

Устройства компьютера 1 и компьютера 2 (клавиатура, дисплей, накопители на жестких, гибких оптических и других дисках, принтер). Каждое из перечисленных устройств является, прежде всего, прямым носителем информации. Кроме этого, создаваемые ими различные физические поля способствуют образованию косвенных носителей. В частности, набор пароля и другой информации с клавиатуры может сопровождаться акустическим излучением, а также создавать визуально-оптический, электрический и радиоканалы утечки, причем при удержании клавиши в течение времени, большем 0,1 с, возникают повторения и дальность перехвата может увеличиться. Дисплей является прямым носителем при считывании с него информации одним из субъектов, включенным в систему информационного обмена. Формирование изображения на экране дисплея сопровождается радиоизлучениями, включающими в себя широкополосную и узкополосную составляющие. Уровень широкополосного излучения зависит от числа знаков на экране, уровень узкополосной составляющей определяется системой синхронизации и частотой повторения светящихся точек – частотой следования импульсов. Таким образом, дисплей, являясь простым носителем, при формировании изображения создает косвенный носитель информации.

Полный перечень функционально значимых (прямых) и функционально незначимых (косвенных) носителей информации с описанием их физических свойств и характеристик, условий пространственного размещения представляет собой исходные данные для построения прогнозной модели поведения любой системы в условиях конкретного объекта. На основании вышеизложенного классификация каналов утечки может быть наглядно представлена табл. 1.1.

Классификация технических каналов утечки информации

	Каналы утечки информации	Источники утечки	Средства перехвата информации
Радиотехнический	электрические излучатели	электрическая составляющая низкочастотных, высокочастотных, оптических излучателей	пеленгаторы: одноканальные, многоканальные, поляризационно-чувствительные, фазочувствительные, доплеровские, корреляционные, двухканальные автоматические; интерферометры
	магнитные излучатели	магнитная составляющая низкочастотных, высокочастотных, оптических излучателей	
	электромагнитные поля	низкочастотные, высокочастотные, оптические излучатели	
	паразитные связи и наводки	обратная связь, по цепям питания	приемники наводок: вспомогательные ТС, системы, расположенные ряом, через общее полное сопротивление, через провода источника и приемника наводки
Электрический	каналы в сети электропитания технических средств и систем	емкостные, индуктивные, электромеханические связи	перехват ПЭМИ по элементам ТСПИ и соединительными линиями переменного тока
	вспомогательные технические средства: телефонные линии, сети питания, отопления, связи, заземления, кондиционирования и т.д.	связи через источники питания, заземления, инженерные коммуникации; воздействие промышленных радиотехнических устройств (радиовещательных РЛС, средств радиосвязи и т.п.)	перехват наводок побочных электромагнитных излучений, информационных сигналов с цепей заземления; внедрение закладок;
	преобразователи акустических сигналов в электрические	—	перехват сигналов, возникающих при преобразовании акустического сигнала в электрический за счет микрофонного эффекта
	воздействие высокочастотных сигналов на ТС	высокочастотные сигналы, создаваемые с помощью разведывательной аппаратуры	перехват ПЭМИ высокочастотных генераторов

Акустический	прямой акустический	щели, окна, двери, технологические проемы, вентиляционные каналы и т.п.	направленные микрофоны: специальные высокочувствительные микрофоны, электронные устройства перехвата речевой информации с датчиков микрофонного типа
	Акустовибрационный	ограждающие конструкции, трубы инженерных коммуникаций, преобразователи акустических сигналов в вибрационные	электронные стетоскопы в смежных помещениях, электронные устройства перехвата речевой информации с датчиков на инженерно-технических коммуникациях
	Акустооптический	оконные стекла	лазерные акустические системы
	акустоэлектромагнитный	аппаратура высокочастотного навязывания	Специальные радиоприемные устройства для перехвата ПЭМИ ВТСС, аппаратура высокочастотного облучения ВТСС за зоной
	Акустоэлектрический	соединительные линии ВТСС	Специальные низкочастотные усилители за пределами зоны к линиям ВТСС, аппаратура высокочастотного навязывания к линиям ВТСС, перехват акустических излучений
Визуально - оптический	Визуальное наблюдение	Бинокли, стереотрубы, средства ночного видения	
	Фотосъемка	Копировальные устройства, не зависящие от основного питания и освещенности	
	Видеосъемка	волоконные световиды, ПЗС-микросхемы, ТВ камеры	Видеопередатчики, видеоприемники, видеомагнитофоны, коммутаторы, мониторы, видеокамеры

Следовательно, существуют четыре обобщенных канала утечки информации: радиотехнический, электрический, акустический и визуально-оптический, каждый из которых, учитывая сопутствующие преобразования физических полей, можно разделить на конкретные подканалы. В данной

работе исследованию подлежит радиотехнический канал, причины утечки информации по которому определяются:

- излучением в окружающее пространство (в дальней зоне) электромагнитных полей технических средств (ТС) и соединяющих их линий связи;

- излучением в окружающее пространство (в ближней зоне) электрической составляющей электромагнитного поля ТС;

- излучением в окружающее пространство (в ближней зоне) магнитной составляющей электромагнитного поля ТС;

- паразитными наводками на отходящие и проходящие вблизи от ТС провода и кабели, на расположенные рядом вспомогательные технические средства и системы, взаимные наводки между линиями связи.

При этом прямые носители информации будут рассмотрены укрупненно (интегрально) без детализации их компонентов. В частности, будет опущен тот фактор, что каждый из прямых носителей имеет элементы памяти, дающие возможность воздействия на них со стороны злоумышленника и создания тем самым обобщенного канала информационного воздействия.

1.2. Средства выявления и цифровой обработки опасных сигналов

Поскольку в настоящее время узаконена некоторая либерализация использования радиочастотного спектра и рынка радиосредств, появилось большое число неконтролируемых устройств негласного съема информации и нелегальных средств ее передачи. Это привело к тому, что проблема защиты информации вышла на новый качественный уровень. Современные средства ТЗИ в сложившейся обстановке должны адекватно противостоять угрозам при проведении контроля радиообстановки, а также в процессе обнаружения электромагнитных излучений, выявления и локализации потенциально опасных источников радиоизлучения (ИРИ). Для этого необходимо:

- создать базу данных сигналов с характеристиками излучения;
- пополнять ее при обнаружении новых излучений, отсутствующих в базе данных, определять степень их опасности для защищаемого объекта;

- проводить панорамный спектральный анализ радиоэфира;
- пеленговать источники радиоизлучения с любыми видами модуляции по углу места и азимуту;
- определять местоположение стационарных и мобильных источников радиоизлучения;
- записывать радиосигналы вместе со служебными параметрами с возможностью последующего воспроизведения.

Все комплексы ТЗИ можно разбить при этом на группы *стационарных, мобильных, портативных, носимых и измерительных средств*. В *стационарных комплексах ТЗИ* автоматизированного радиомониторинга эфира можно реализовать наилучшие возможные параметры, использовать многоканальные цифровые панорамные радиоприемные устройства и получать наилучшие показатели по динамическому диапазону, скорости панорамного анализа и обработке поступающей информации.

Мобильные комплексы ТЗИ размещаются на транспортной базе наземного, воздушного или морского базирования, имеют возможность выполнения всех функций при движении и, несмотря на некоторые ограничения по весу, размерам и потреблению электроэнергии, они могут давать те же показатели по динамическому диапазону, скорости панорамного анализа и обработке поступающей информации, что и стационарные комплексы.

Портативные комплексы ТЗИ могут переноситься одним или несколькими операторами, разворачиваться, а затем использоваться на стационарных или временных постах, поэтому на них накладываются ограничения по весу, автономным источникам питания, потреблению энергии, размерам антенных систем.

Носимые комплексы ТЗИ, размещенные на теле или в руках оператора, предназначены для скрытого и открытого использования во время его движения, причем полное или частичное участие оператора в его управлении не всегда обязательно. Применение их оправдано для определения местонахождения источников радиоизлучения в труднодоступных местах или

скрытого наблюдения. Естественно, для них есть существенные ограничения по весу, габаритам, времени энергоснабжения.

Измерительные комплексы ТЗИ устройства предназначены для измерения параметров излучений штатных радиоэлектронных средств и обеспечения контроля эффективности принятых мер по защите от утечки информации. Измерительные комплексы ТЗИ должны быть сертифицированы государственными органами стандартизации. В каждой группе имеется базовое средство автоматизированного радиомониторинга эфира, возможности которого могут быть расширены дополнительными устройствами из других групп.

Опыт разработки и использования современных комплексов ТЗИ предлагает унифицированный набор следующих аппаратно-программных средств:

- одноканальный или многоканальный преобразователь сигналов;
- одноканальный или двухканальный блок аналогово-цифровой обработки;
- многоканальную аппаратуру цифровой записи радиосигналов в полосе одновременного анализа;
- аппаратуру технического анализа сигналов в реальном времени и в режиме отложенной обработки;
- блок цифровых демодуляторов, блок электропитания;
- аппаратуру записи демодулированных сигналов одновременно со служебными сигналами;
- аппаратуру привязки средства к местности;
- специальное унифицированное математическое обеспечение [48].

На эффективность их применения существенно влияют параметры радиоприемных устройств, предназначенных для извлечения энергии электромагнитного поля, селекции, усиления и преобразования радиосигналов с целью получения содержащейся в них информации (рис. 1.4).

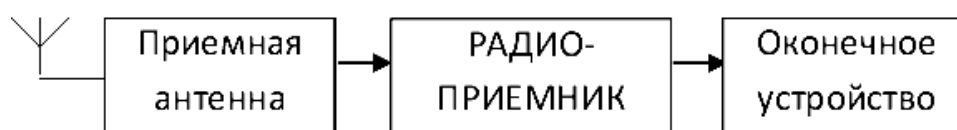


Рис. 1.4. Схема радиоприемного устройства

Наиболее известными видами радиоприемных устройств являются приемники прямого усиления (детекторный, рефлексный и сверхгетеродинный), а также супергетеродинный приемник.

Детекторный приемник – простейшее радиоприемное устройство прямого усиления с минимумом функциональных узлов для приема сигналов: антенна, избирательная цепь, детектор и оконечное устройство. Помехоустойчивость и качество приема низкие, так как отсутствуют усилительные элементы. Поэтому такие приемники ограниченно используются на сверхвысоких частотах и оптических диапазонах.

Рефлексный приемник использует один и тот же усилитель одновременно для додетекторного и последетекторного усиления. При этом вначале активный элемент усиливает сигнал радиочастоты, который детектируется и уже как сигнал звуковой частоты подается на вход того же усилителя.

Сверхрегенеративный приемник – это радиоприемное устройство прямого усиления, содержащий каскад усиления с контролируемым самовозбуждением. В нем положительная обратная связь с усилителем радиочастоты периодически изменяется с некоторой вспомогательной частотой, значительно превышающей частоту модуляции сигнала. В течение части периода вносимое сопротивление становится отрицательным, и в колебательном контуре возбуждаются колебания. В течение следующей части периода происходит срыв колебаний. Амплитуды этих колебаний превышают амплитуду принимаемых сигналов в 10^4 раз и больше. Их интенсивность пропорциональна принимаемым сигналам, действующим на колебательный контур. Достоинством сверхрегенеративных приемников является высокая чувствительность при простой электрической схеме. Их недостатком являются искажения сигналов и интенсивные паразитные излучения, что не соответствует требованиям электромагнитной совместимости.

Супергетеродинный приемник осуществляет преобразование частоты радиосигнала – линейный перенос спектра принятого сигнала в область более

низких частот, удобную для обработки. Особенностью супергетеродинного приемника, отличающей его от приемника прямого усиления, является:

- наличие специального преобразователя частоты, который состоит из гетеродина и смесителя;
- высокая избирательность и чувствительность;
- постоянство избирательности и чувствительности по диапазону;
- повышенная устойчивость.

Недостатком супергетеродинного приема является появление побочных каналов приема.

Побочный канал приема – полосы частот за пределами основного канала приема, в которой радиопомеха вызывает появление отклика, обусловленного ее прохождением на вход устройства демодуляции или детектирования. К ним относятся каналы, включающие:

- промежуточные частоты;
- зеркальные частоты;
- комбинационные частоты;
- частоты, которые в целое число раз меньше частоты настройки радиоприемного устройства, промежуточных и зеркальных частот.

В настоящее время чаще всего используются следующие виды радиоприемных устройств для радиомониторинга эфира: сканирующие радиоприемники, селективные микровольтметры, анализаторы спектра, панорамные радиоприемники, панорамные измерительные радиоприемники (табл. 1.2).

Выбор конкретных аппаратно-программных средств комплекса ТЗИ зависит от защищаемого объекта, его деятельности, задач и функций. Рынок таких средств предлагает достаточно широкий спектр товаров, которые могут удовлетворить любые потребности в пределах имеющихся возможностей.

Рассмотрим модель цифровой системы комплекса ТЗИ (выявления, приема, передачи и обработки информации).

Виды радиоприемных устройств для комплекса ТЗИ

Виды устройств	Характеристики
Сканирующий радиоприемник	<ul style="list-style-type: none"> – высокая реальная чувствительность; – высокая реальная избирательность; – помехоустойчивость и надежность
Селективный микровольтметр	<ul style="list-style-type: none"> – перестраиваемый узкополосный фильтр; – измеряет уровень сигналов на выходе антенны в заданной полосе диапазона частот; – имеет ручную перестройку; – не имеет панорамного отображения
Анализатор спектра	<ul style="list-style-type: none"> – исследует спектральный состав сигналов и его параметры; – не имеет блоков предварительной селекции сигналов
Панорамный радиоприемник	<ul style="list-style-type: none"> – широкая полоса пропускания; – отображает спектральный состав сигналов; – высокая скорость спектрального анализа; – имеет демодуляторы сигналов с амплитудной, фазовой, частотной модуляциями; – имеет возможность подключения к ПЭВМ
Панорамный измерительный радиоприемник	<ul style="list-style-type: none"> – высокие метрологические характеристиками измерения уровня, частоты и др. параметров радиосигналов; – широкое частотное разрешение; – работа под управлением ПЭВМ

При кодировании, передаче и приеме опасного сигнала происходит его искажение за счет добавления к нему шума. *Процесс цифровой обработки сигнала* (ЦОС) включает как получение дискретных представлений сигнала на основе уточненной модели, представленной на рис. 1.5, так и применение специальных алгоритмов для преобразования полученных дискретных представлений [37].

Цель этого процесса – получение оптимального или наилучшего восстановления опасного сигнала на фоне шума, или выявление и определение сигнала. При этом сигнал на входе средства вычислительной техники (СВТ) дискретен по времени и состоянию.

Цель этого процесса – получение оптимального или наилучшего восстановления опасного сигнала на фоне шума, или выявление и определение сигнала. При этом сигнал на входе средства вычислительной техники (СВТ) дискретен по времени и состоянию.

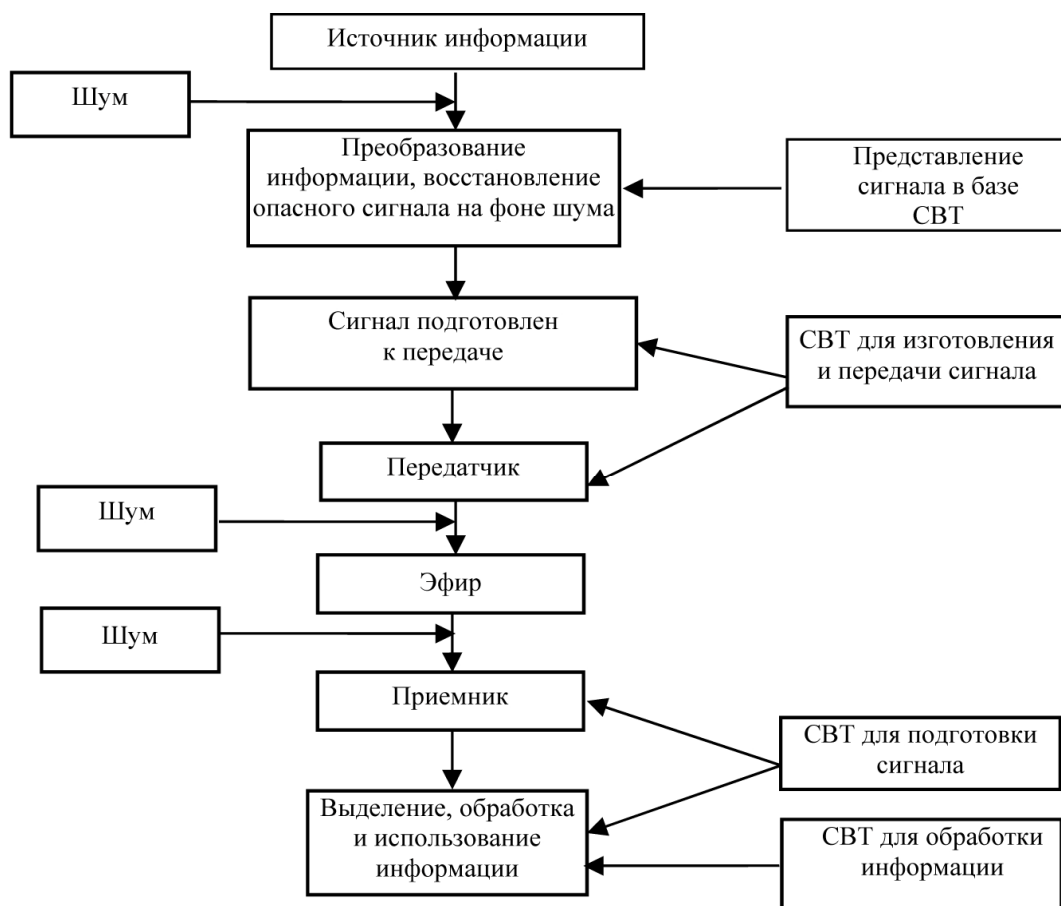


Рис. 1.5. Модель цифровой системы комплекса ТЗИ

Преимущества и недостатки ЦОС представлены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Преимущества и недостатки цифровой обработки сигналов

Преимущества	Принципиальные	<ul style="list-style-type: none"> – многофункциональность; – возможность мультиплексирования; – реализация практически любых видов преобразования сигналов; – отсутствие принципиальных ограничений и сложности
	Реализационные	<ul style="list-style-type: none"> – высокая стабильность характеристик; – уникальные возможности их перестройки; – высокая точность воспроизведения оператора обработки; – реализация устройств при помощи БИС и СБИС
	Технико-эксплуатационные	<ul style="list-style-type: none"> – высокая надежность и живучесть; – малые вес и габаритные размеры; – возможности диагностирования; – возможности перепрограммирования; – возможности унификации
Недостатки	Относительно низкая скорость обработки сигнала из-за ограничений быстродействия СВТ	
	Шумы округления, нелинейные эффекты переполнения	
	Зависимость скорости от точности	

Существующие ЦОС можно классифицировать по времени и условно разделить на три группы (табл. 1.4):

Таблица 1.4

Классификация ЦОС по времени реализации алгоритмов

Группа	Процедуры алгоритмов	Время реализации алгоритмов
1	Цифровые фильтры с конечно-импульсной и бесконечно-импульсной характеристиками (линиями задержки)	Затраты времени пропорциональны количеству отсчетов N
2	Процедуры вычисления свертки и корреляционных функций; процедуры дисперсного преобразования Фурье; алгоритмы быстрого преобразования Фурье	Затраты времени пропорциональны количеству отсчетов N и $N \log N$
3	Алгоритмы свертки и преобразования Фурье; операции умножения матриц; решение систем линейных уравнений; аппроксимация по методу наименьших квадратов	Затраты времени пропорциональны количеству отсчетов N

Существенно улучшить характеристики ЦОС позволяет использование современных сигнальных СВТ, которые могут осуществлять обработку сигналов любого вида.

1.3. Возможности комплексов ТЗИ по защите информационного ресурса

Комплекс технической защиты информации (ТЗИ) – это совокупность радиоэлектронных подсистем, использование информации от которых определяет человек-оператор и (или) информационно-управляющая система. Комплекс ТЗИ предназначен для выявления каналов утечки информации из защищенных объектов, санкционированного и несанкционированного получения этой информации, определения и математической обработки ее с накоплением и передачей на устройство управления. Проведенный в подразделах 1.1 и 1.2 анализ показал, что для решения поставленных задач в состав комплекса ТЗИ должны быть включены следующие радиоэлектронные подсистемы: *сканирующий радиоприемник (СРП) или многоканальный сканирующий приемник, информационно-управляющая система (ИУС), которой может быть ПЭВМ, телевизионно-оптический визир (ТОВ) и система накопления информации (СНИ)* (рис. 1.6). Для организации постоянного

контроля основное оборудование комплекса ТЗИ – сканирующий приемник, устройство спектральной обработки сигналов (блок быстрого панорамного анализа на основе процессора БПФ), компьютер с установленным специальным программным обеспечением, опорная антенна, которая может быть как комнатной, так и наружной, антенный коммутатор, микроконтроллер, отвечающий за внутрисистемные коммутации и управляющий периферийными устройствами и т.п. устанавливаются в служебном помещении.

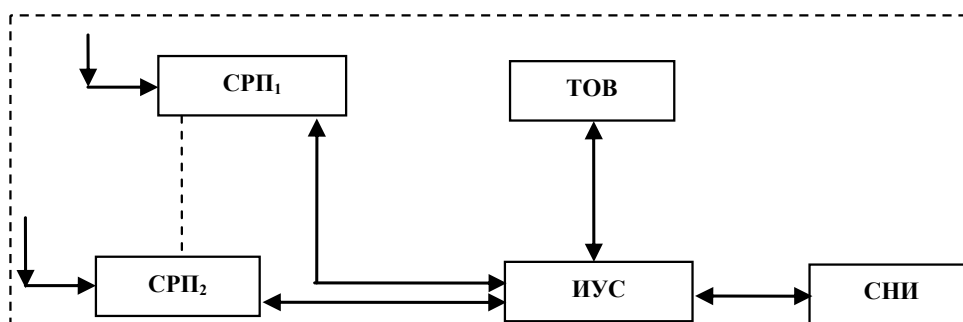


Рис. 1.6. Структурная схема комплекса ТЗИ

Все функции комплексов ТЗИ, обеспечивающие комплексное решение задач по защите объектов, выявление технических каналов утечки информации в контролируемых зонах на объектах и на их границах, а также контроль эффективности мер по предотвращению утечки информации, разбиваются на три основные группы:

- универсальные функции, безусловное выполнение которых требуется во всех задачах комплексов;
- дополнительные функции для решения задач мониторинга радиоэфира на местности и на границах контролируемого объекта;
- дополнительные функции для решения задач мониторинга радиоэфира в одном отдельном контролируемом помещении и группе наиболее важных помещений, размещенных на объекте.

Для реализации этих функций необходима разработка комплексной модели комплекса ТЗИ, входными данными для построения которой являются:

- состав и структурная схема комплекса;
- параметры подсистем, входящих в состав комплекса;
- блок-схема алгоритма поведения комплекса;

- среднее значение и дисперсия времени выполнения каждого операционного блока алгоритма поведения;

- приемлемые вероятности принятия решения «ДА» и дополнение к единице вероятности принятия решения «НЕТ» для каждого блока сравнения алгоритма поведения;

- допустимая вероятность безотказной работы комплекса.

Стремительное развитие таких систем начиная с 90-ых годов прошлого столетия обусловлено рядом существенных и неоспоримых тенденций [69].

Во-первых, существенным увеличением штатных телевизионных и радиовещательных передатчиков, введением сотовых и пейджерных систем связи. Высокая эффективность *радиоэлектронных средств* (РЭС) стимулировала быстрые темпы их распространения во всех сферах человеческой деятельности и была обусловлена:

- общей тенденцией к повышению мощности передатчиков РЭС, поддиктованной стремлением к увеличению их дальности действия, что эквивалентно увеличению числа РЭС;

- непрерывным увеличением чувствительности радиоприемных устройств комплексов ТЗИ, требуемой для оценки и анализа опасных сигналов в РЭО;

- высокой перегрузкой некоторых специально выделенных участков радиотехнического диапазона, возникающей в силу объективных обстоятельств;

- постоянным повышением верхней границы рабочего диапазона РЭС, что связано с бурным развитием современных технологий;

- использованием различных типов опасных сигналов, как узкополосных с фиксированным распределением частот или с динамическим частотно-временным распределением излучений, так и широкополосных с кодовым разделением источников.

Во-вторых, резким увеличением в городах и промышленных центрах Украины числа нелегализованных *источников опасных сигналов* (ИОС) с

различными уровнями мощности и большим числом паразитных излучений, не соответствующих допустимым нормам и международным стандартам.

В-третьих, использованием радиочастотного спектра, что проявляется, в частности, в появлении устройств несанкционированного получения информации и нелегальных средств ее передачи.

В-четвертых, резким увеличением объема используемой оргтехники и электронной техники, которые имеют побочные электромагнитные излучения и технические каналы утечки информации.

На развитие таких систем влияет также ряд факторов, связанных с усложнением РЭО на охраняемых объектах. Первый из них связан с использованием большого числа РЭС, расположенных в ограниченном и очень малом пространстве, что приводит к большим сложностям выявления источников опасного сигнала. Вторым фактором является существенное увеличение скорости передачи информации и применение избыточности для получения тактико-технических характеристик РЭС, используемые как в государственных, так и коммерческих структурах, что приводит к существенному усложнению РЭС и возможностей по ее вскрытию. Третьим фактором является неравномерное по времени использование РЭС, что приводит к усложнению РЭО в моменты большей интенсивности работы радиосистем.

Поскольку все перечисленные факторы и тенденции в основе своей неустранимы, возникает задача повышения эффективности функционирования разрабатываемых комплексов ТЗИ. Для этого при проектировании перспективных комплексов ТЗИ необходимо выбрать обобщенный критерий качества комплексов, существенное влияние на который могут оказать информационный, энергетический, пространственный и временной аспекты.

Информационный аспект в наибольшей степени используется для идентификации сигналов, несущих информацию с объектов, на фоне многочисленных мешающих сигналов и излучений от внешних и посторонних источников. Существующие поисковые средства и комплексы ТЗИ предназначены для обнаружения и идентификации непрерывных сигналов или

сигналов типа кратковременных. Возможности комплексов ТЗИ обнаружения сигналов с *псевдослучайной перестройкой рабочей частоты* (ППРЧ) определяются конкретными параметрами сигналов, т.е. скоростью переключения каналов, количеством этих каналов и шириной полосы частот каждого канала. Возможность обнаружения кратковременных сигналов при использовании перестраиваемых приемников в составе комплексов ТЗИ зависит от скорости его перестройки в сравнении со скоростью изменения частоты сигнала, но при длительном анализе частотного диапазона вероятность обнаружения такого сигнала стремится к 1. Сигналы со случайной базой характеризуются появлением в случайные моменты времени радиоизлучения в произвольных участках частотного диапазона. Для такой ситуации подходят известные в радиотехнике энергетические приемники типа радиометров.

Энергетический аспект при решении задач обнаружения опасных сигналов означает определение требований к составным частям комплексов ТЗИ с учетом чувствительности приемников, мощности излучения и условий их расположения. С энергетических позиций принцип действия перемещаемых устройств обнаружения имеет определенные преимущества, так как при перемещении по пространству достигается требуемое или меньшее расстояние между антеннами источника опасного сигнала и устройства обнаружения.

Пространственный аспект заключается в предполагаемом наличии у антенны источника опасного сигнала направленных свойств с учетом расположения комплекса ТЗИ. Учет таких свойств существенно повысит требования к минимальному расстоянию антенны обнаружителя до антенны источника опасного сигнала, а в диапазоне СВЧ может вообще привести к необходимости размещения приемных антенн на внешней стороне объекта.

Временной аспект заключается в необходимости совпадения по времени функционирования источника опасного сигнала и поисковых средств. Для опасных сигналов со случайной базой или кратковременных посылок, а также для комплексов с внешним управлением такое совпадение носит вероятностный характер. Стационарные комплексы ТЗИ рассчитаны на

длительное наблюдение опасных сигналов в частотном диапазоне более широкого класса и основной проблемой для них является соответствие требований к времени перестройки приемника обнаружения моделям временных параметров комплекса ТЗИ.

Основными факторами, позволяющими проводить оптимизацию комплекса ТЗИ, является:

- ориентация на источник опасного сигнала как на шумовой процесс;
- расположение антенн устройств обнаружения на определенном минимальном расстоянии от источника излучения;
- возможность выявления опасных сигналов широкого класса с произвольными видами управления режимом работы источников.

При этом следует учитывать, что, например, зависимость интенсивности опасного сигнала от взаимного расположения источника опасного сигнала и приемной антенны комплекса ТЗИ является весьма неоднозначной. Однако в среднем, естественно, близость источника к хотя бы одной из приемных антенн приводит к заметному увеличению мощности соответствующего сигнала по сравнению с сигналом, принимаемым в опорном канале. При правильном размещении опорной антенны, сигналы от внутренних источников опасного сигнала при прохождении через железобетонные перекрытия, стены и т.п. претерпевают существенное ослабление. Соответственно прием опорной антенной сигналов от источника опасного сигнала вне объекта осуществляется в лучших условиях. Данные факторы в сочетании с синхронностью двухканального приема обуславливают возможность разделения массива принятых сигналов и соответственно порождающих их внешних и внутренних (внутри контролируемой зоны) источников.

При практическом использовании комплексов ТЗИ в конкретных ситуациях требуется четкое представление о моделях опасного сигнала, подлежащих контролю. Поскольку большинство существующих комплексов ТЗИ не позволяют обнаруживать радиосигналы, работающие под прикрытием легальных радиосигналов, то необходим анализ ситуации, когда сигналы неизвестных

источников опасных сигналов (НИОС) и от посторонних легальных источников работают в различных частотных диапазонах. Для комплекса ТЗИ вероятность правильного обнаружения соответствует случаю правильной идентификации принятого радиосигнала как сигнала от НИОС, а вероятность ложной тревоги соответствует случаю, когда источники радиосигналов, расположенные вне защищаемого помещения, идентифицируются как сигналы от НИОС.

Требования к величине числа отсчетов (времени анализа сигналов и помех на одном шаге сканирования радиоприемника) существенно возрастают, если увеличивается прогнозируемая вероятность правильного обнаружения сигнала, уменьшается вероятность ложной тревоги и уменьшается абсолютное значение величины затухания сигнала между двумя антеннами. Вообще это затухание является самым мощным ресурсом комплекса ТЗИ, так как при малом его значении требования на время анализа становятся невыполнимыми и решение задачи сводится к нереализуемому прецизионному измерению мощностей двух случайных процессов.

За несколько последовательных циклов сканирования приемника вероятность правильного обнаружения сигнала может быть повышена даже при небольшой вероятности правильного обнаружения за один цикл сканирования.

С увеличением числа циклов сканирования приемника при ограничении времени обнаружения происходит уменьшение вероятности правильного обнаружения по сравнению с анализом в течение одного цикла перестройки. Значит выгоднее проводить длительный анализ на одном цикле сканирования, чем разбивать это время на несколько периодов (это касается только непрерывных сигналов). Если же ограничить время анализа на каждом шаге сканирования, то очевидно с увеличением числа циклов сканирования вероятность правильного обнаружения сигнала будет возрастать.

1.4. Постановка задачи исследования

В соответствии с Законом Украины «Про захист інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах» [1] вопросы безопасности информационных ресурсов являются наиболее актуальными в настоящее время.

Целью работы является разработка теоретических и методологических основ для повышения эффективности функционирования комплексов ТЗИ с учетом происходящих в них физических процессов, а также методов оценки и норм эффективной защиты информации от ее утечки по техническим каналам.

Для достижения поставленной цели **на первом этапе** диссертационной работы были проанализированы прямые и косвенные носители информации, опасные сигналы и их свойства, возможные каналы утечки информации, существующие средства выявления и цифровой обработки сигналов. Построенная структурно-функциональная модель комплексов ТЗИ и их сравнительный анализ позволили выделить наиболее часто используемые на практике. Так же проведенный анализ будет использован для формулирования основных принципов построения перспективных комплексов ТЗИ с учетом факторов и тенденций, влияющих на повышение эффективности их функционирования.

На втором этапе необходимо совершить моделирование физических процессов, возникающих при выявлении опасных сигналов комплексами ТЗИ, а именно:

– методы одномерных дифференциальных преобразований для решения задач с линейными и нелинейными краевыми условиями при выявлении опасных сигналов комплексами ТЗИ;

– метод баланса дифференциальных спектров для расширения области применения аналитических моделей при выявлении опасных сигналов комплексами ТЗИ на задачи с нелинейными краевыми условиями;

– метод выявления опасных сигналов, а также возможных каналов утечки информации для усовершенствования процедур их поиска и обнаружения.

На третьем этапе необходимо сформировать теоретические основы улучшения эффективности функционирования комплексов ТЗИ с учетом их особенностей. Для этого в процессе выполнения диссертационной работы следует:

– усовершенствовать метод оценки местоположения источника опасного сигнала в условиях сложной помеховой радиообстановки, разработать алгоритм поиска и обнаружения каналов утечки информации;

– усовершенствовать ускоренные методы анализа опасных сигналов в комплексах ТЗИ для возможности обработки нестационарных процессов;

– усовершенствовать структурно-автоматную модель комплекса ТЗИ путем введения в нее стохастической составляющей.

На четвертом этапе необходимо разработать метод оценки предполагаемой эффективности использования комплексов ТЗИ, усовершенствовать методику исследования показателей эффективности комплекса ТЗИ при обработке опасных сигналов, а также апробировать усовершенствованную методику для получения решения функциональных задач при заданной совокупности показателей эффективности. Таким образом можно не только сократить время и уменьшить затраты на проектирование комплексов, но и повысить эффективность их функционирования.

Выводы к первому разделу

Проведенный анализ прямых и косвенных носителей информации с учетом источников излучения опасных информационных сигналов, а также существующих каналов утечки информации, средств выявления и цифровой обработки опасных сигналов комплексами ТЗИ показал, что:

– прямые носители информации порождают множество косвенных носителей, в результате чего возникает возможность внедрения нелегитимных получателей информации (злоумышленников) в систему информационного обмена;

– вследствие наличия паразитных связей между источником и приемником излучения через электромагнитное поле, при работе ТС возникают наводки информационных сигналов на все провода и кабели, расположенные рядом и внутри;

– косвенные носители могут стать причиной утечки информации, но не могут быть использованы злоумышленником для уничтожения, искажения или фальсификации информации;

– подробно рассмотрен полный перечень необходимых действий для выявления побочных электромагнитных излучений и наводок комплексами ТЗИ;

– проведен анализ оборудования комплексов ТЗИ, что позволило создать модель цифровой системы комплекса ТЗИ;

– проведен анализ оборудования и радиоприемных устройств, влияющих на эффективность решения возложенных на комплекс ТЗИ задач;

– дано обоснование тактико-технических требований к комплексам ТЗИ, сформулированы требования к идентификации. Показано, что за несколько последовательных циклов сканирования радиоприемника вероятность правильного обнаружения сигнала может быть повышена даже при небольшой вероятности правильного обнаружения за один цикл сканирования.

Результаты проведенного анализа показали, что для большинства выполняемых комплексами ТЗИ задач необходимо разработать новый общий подход, заключающийся в оценке качества проектируемых комплексов по критерию «эффективность-стоимость» при выполнении ряда заданных дополнительных условий.

РАЗДЕЛ 2

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЫЯВЛЕНИИ ОПАСНЫХ СИГНАЛОВ КОМПЛЕКСАМИ ТЗИ

Любые модели, как известно, отражают свойства объекта или системы, являясь при этом инструментом, помогающим найти и использовать закономерности их жизнедеятельности и функционирования. Эти же свойства присущи и математическим моделям физических процессов в комплексах ТЗИ. Во многих практических приложениях они представлены в виде уравнений в частных производных с граничными условиями.

Реализация таких моделей в пределах заданного ограничения на время моделирования требует, как правило, выполнения значительного объема вычислений. К тому же, в случае необходимости решения комплексами ТЗИ нештатной задачи, когда априори свойства объектов информационной безопасности недостаточно известны и могут изменяться в процессе функционирования, эти объекты плохо формализуются, соответственно известный математический аппарат не в состоянии решить все задачи, связанные с анализом и синтезом процессов, происходящих при функционировании комплексов ТЗИ. Эти особенности могут привести к усложнению математических моделей физических процессов и полей комплексов ТЗИ, построенных на основе классических методов математических наук, что, в свою очередь, обуславливает необходимость их совершенствования и дальнейшего развития [35].

2.1. Методы дифференциальных преобразований при моделировании физических процессов в комплексах ТЗИ

На сегодня известно большое количество аналитических и численно-аналитических методов решения краевых задач. Анализ последних исследований и публикаций [35,39,43,48,65,70,79] показал, что с практической стороны наибольшее распространение среди них получили методы, основанные на интегральных и дифференциальных преобразованиях [35,39,43]. Основной

недостаток интегральных преобразований связан с ограничением области применения классом линейных уравнений с частными производными с линейными граничными условиями. Дифференциальные преобразования наоборот расширяют область их применения на нелинейные краевые задачи, но вносят ограничения на область моделирования физических процессов [83,84]. При этом рассмотрение различных физических процессов (механических, электрических, акустических, тепловых и пр.) приводит, в подавляющем большинстве случаев, к линейным дифференциальным уравнениям в частных производных 2-го порядка, для которых допустимы различные начальные и граничные условия, обеспечивающие существование единственного решения задачи [36]. Исходя из того, что рассматриваемые нами в данной работе параметры опасных сигналов являются изоморфными параметрам, для расчета которых уже применялись существующие методы, адаптируем и впервые применим данные методы для решения наших задач в выявлении опасных сигналов комплексами ТЗИ с целью повышении эффективности их функционирования [35,96].

2.1.1. Метод одномерных дифференциальных преобразований краевых задач

Рассмотрим физические процессы, которые описываются функцией $u(x_1, x_2)$ двух независимых переменных в области, определяемой ограничениями:

$$0 \leq x_1 \leq H_1, \quad (2.1)$$

$$0 \leq x_2 \leq H_2, \quad (2.2)$$

где H_1, H_2 – заданные положительные константы.

Моделирование процессов вида $u(x_1, x_2)$ выполним, используя систему двух одномерных смещенных дифференциальных преобразований вида:

$$U_v(k_1, x_2) = \frac{H_1^{k_1}}{k_1!} \left(\frac{\partial^{k_1} u(x_1, x_2)}{\partial x_1^{k_1}} \right) x_1 = x_{1v}, \quad (2.3)$$

$$u(x_1, x_2) = \sum_{k_1=0}^{\infty} \left(\frac{x_1 - x_{1v}}{H_1} \right)^{k_1} U_v(k_1, x_2), \quad (2.4)$$

$$U_v(x_1, k_2) = \frac{H_2^{k_2}}{k_2!} \left(\frac{\partial^{k_2} u(x_1, x_2)}{\partial x_2^{k_2}} \right)_{x_2 = x_{2v}}, \quad (2.5)$$

$$u(x_1, x_2) = \sum_{k_2=0}^{\infty} \left(\frac{x_2 - x_{2v}}{H_2} \right)^{k_2} U_v(x_1, k_2), \quad (2.6)$$

где целочисленные аргументы k_1 и k_2 принимают значения $0, 1, 2, \dots, C$, x_{1v}, x_{2v} – координаты фиксированной точки в пределах области.

Выражение (2.3) описывает смещенные дифференциальные преобразования функции $u(x_1, x_2)$ в функцию $U_v(k_1, x_2)$ целочисленного аргумента k_1 и независимой переменной x_2 , которая называется изображением, или дифференциальным спектром процесса $u(x_1, x_2)$, который моделируется. Обратные дифференциальные преобразования (2.4) позволяют с дифференциальным спектром $U_v(k_1, x_2)$ восстановить в области оригиналов процесс $u(x_1, x_2)$, который моделируется. Аналогичным образом выражения (2.5) и (2.6) описывают соответственно прямые и обратные смещенные дифференциальные преобразования по переменной x_2 .

Дифференциальные спектры $U_v(k_1, x_2)$, $U_v(x_1, k_2)$ являются аналогами в области изображений физического процесса, математическая модель которого задается функцией $u(x_1, x_2)$. Эти дифференциальные спектры зависят от выбора фиксированной точки (x_{1v}, x_{2v}) .

С целью моделирования физических процессов может использоваться дифференциальный спектр $U_v(k_1, x_2)$, или $U_v(x_1, k_2)$. В некоторых краевых задачах возникает потребность в исследовании обоих дифференциальных спектров $U_v(k_1, x_2)$ и $U_v(x_1, k_2)$.

Основные свойства одномерных дифференциальных преобразований, установленные в [35], справедливы для преобразований (2.3) и (2.5). Математические операции в области изображений (2.3), (2.5) выполняются по правилам соответствия и определяются следующими выражениями:

$$u(x_1, x_2) \pm v(x_1, x_2) \leftrightarrow \begin{cases} U_v(k_1, x_2) \pm V_v(k_1, x_2), \\ U_v(x_1, k_2) \pm V_v(x_1, k_2), \end{cases} \quad (2.7)$$

$$Cu(x_1, x_2) \leftrightarrow \begin{cases} CU_v(k_1, x_2), \\ CU_v(x_1, k_2), \end{cases} \quad (2.8)$$

$$u(x_1, x_2) \cdot v(x_1, x_2) \leftrightarrow \begin{cases} U_v(k_1, x_2) \cdot V_v(k_1, x_2), \\ U_v(x_1, k_2) \cdot V_v(x_1, k_2), \end{cases} \quad (2.9)$$

$$U_v(k_1, x_2) \cdot V_v(k_1, x_2) = \sum_{l=0}^{l=k_1} U_v(l, x_2) \cdot V_v(k_1 - l, x_2), \quad (2.10)$$

$$U_v(x_1, k_2) \cdot V_v(x_1, k_2) = \sum_{l=0}^{l=k_1} U_v(x_1, l) \cdot V_v(x_1, k_2 - l), \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial^m u(x_1, x_2)}{\partial x_1^m} \leftrightarrow D_1^m U_v(k_1, x_2), \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial^m u(x_1, x_2)}{\partial x_2^m} \leftrightarrow D_2^m U_v(x_1, k_2), \quad (2.13)$$

$$D_1^m U_v(x_1, k_2) = \frac{(k_1 + m)!}{k_1! H_1^m} U_v(k_1 + m, x_2), \quad (2.14)$$

$$D_2^m U_v(x_1, k_2) = \frac{(k_2 + m)!}{k_2! H_2^m} U_v(x_1, k_2 + m). \quad (2.15)$$

Фигурными скобками в (2.7)–(2.9) обозначены математические операции в области изображений. Верхняя строка выражения в фигурных скобках обозначает выполнения операций в области изображений (2.3), а нижняя строка – в области изображений (2.5).

Выражение (2.7) показывает, что выполнению операций сложения и вычитания в области оригиналов соответствуют те же операции сложения и вычитания дифференциальных спектров в области изображений (2.3), (2.5). Умножению функции $u(x_1, x_2)$ на константу C (2.8) соответствует умножению на ту же константу дифференциальных спектров $U_v(k_1, x_2)$ и $U_v(x_1, k_2)$. Операции p -умножения двух функций в области оригиналов (2.9) отвечает специальная операция умножения, обозначенная символом $*$ двух дифференциальных спектров в области изображений (2.3), (2.5). Операция m -кратного дифференцирования функции $u(x_1, x_2)$ по переменной x_l в области изображений (2.3) обозначена символом в (2.12).

Аналогичным символом в (2.13) обозначено m -кратное дифференцирование функции $u(x_1, x_2)$ по переменной x_2 в области изображений (2.5). Выполнение операций умножения двух дифференциальных спектров в областях изображений (2.3) и (2.5) раскрывается в соответствии с выражениями (2.10), (2.11). Операции m -кратного дифференцирования в областях изображений (2.3), (2.5) реализуют соответственно по выражениям (2.14), (2.15).

Рассмотрим математическую модель физического процесса в виде дифференциального уравнения в частных производных с двумя независимыми переменными:

$$f\left(x_1, x_2, u, \frac{\partial u}{\partial x_1}, \frac{\partial u}{\partial x_2}, \frac{\partial^2 u}{\partial x_2^2}, \dots, \frac{\partial^m u}{\partial x_1^m}\right) = 0 \quad (2.16)$$

Уравнение (2.16) может иметь бесконечное количество частных решений. Моделирование конкретных физических процессов требует выбора из всех решений уравнения (2.16) решения, удовлетворяющего граничным условиям. Как правило, граничные условия задают на границе Γ среды, в которой протекает физический процесс.

Граничные условия задают в виде:

$$\text{– условия Дирихле:} \quad u(x)|_{x \in \Gamma} = \varphi(x), \quad (2.17)$$

$$\text{– условия Неймана:} \quad \frac{du(x)}{dn}|_{x \in \Gamma} = \varphi(x), \quad (2.18)$$

$$\text{– смешанные условия:} \quad \left| \frac{du(x)}{dn} + \beta u \right|_{x \in \Gamma} = \varphi^*(x), \quad (2.19)$$

где $\varphi, \bar{\varphi}, \varphi^*, \beta$ – непрерывные функции, определенные на граничной поверхности Γ , а $\frac{du(x)}{dn}$ обозначает производную, взятую в точке поверхности Γ в направлении нормали к ней.

Ограничимся классом краевых задач (2.16)–(2.19), задачами, которые допускают запись уравнения (2.16) в виде одного из двух, т.е.:

$$\frac{\partial^m u(x_1, x_2)}{\partial x_1^m} = \varphi_1\left(x_1, x_2, u, \frac{\partial u}{\partial x_1}, \frac{\partial u}{\partial x_2}, \frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2}, \dots, \frac{\partial^m u}{\partial x_2^m}\right), \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial^m u(x_1, x_2)}{\partial x_2^m} = \Phi_2 \left(x_1, x_2, u, \frac{\partial u}{\partial x_1}, \frac{\partial u}{\partial x_2}, \frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2}, \dots, \frac{\partial^m u}{\partial x_1^m} \right). \quad (2.21)$$

К виду (2.20), (2.21) можно привести линейные и квазилинейные уравнения (2.16). Переведем уравнение (2.20) дифференциальными преобразованиями (2.3) в область изображений, а перевод уравнения (2.21) в область изображений выполним дифференциальными преобразованиями (2.5). Получим:

$$U_v(k_1 + m, x_2) = \frac{k_1! H_1^m}{(k_1 + m)!} \Phi_1 \left[k_1, x_2, U_v(k_1, x_2), \frac{k_1 + 1}{H_1} U_v(k_1 + 1, x_2), \frac{dU_v(k_1, x_2)}{dx_2}, \frac{(k_1 + 1)(k_1 + 2)}{H_1^2} U_v(k_1 + 2, x_2), \dots, \frac{d^m U_v(k_1, x_2)}{dx_2^m} \right] \quad (2.22)$$

$$U_v(x_1, k_2 + m) = \frac{k_1! H_2^m}{(k_2 + m)!} \Phi_2 \left[x_1, k_2, U_v(x_1, k_2), \frac{dU_v(x_1, k_2)}{dx_1}, \frac{(k_2 + 1)}{H_2} U_v(x_1, k_2 + 1), \frac{d^2 U_v(x_1, k_2)}{dx_1^2}, \dots, \frac{d^m U_v(x_1, k_2)}{dx_1^m} \right], \quad (2.23)$$

где Φ_1 – изображение функции φ_1 на основе преобразований (2.3);

Φ_2 – изображение функции φ_2 на основе преобразований (2.5).

Рекуррентный вид выражений (2.22), (2.23), позволяет находить дискреты дифференциальных спектров $U_v(k_1, x_2)$ и $U_v(x_1, k_2)$ последовательно предоставляя целочисленным аргументам k_1 и k_2 значение 0, 1, 2, 3, Аналитические вычисления по формулам можно выполнять с неизвестными начальными дискретами дифференциальных спектров, используя их символьные обозначения. Уравнение для определения неизвестных дискретных дифференциальных спектров составляют на основе граничных условий, используя обратные преобразования (2.16), (2.18). Граничные условия в области (2.13), (2.14) выражаются на основе свойств одномерных дифференциальных преобразований следующим образом:

$$u(0, x_2) = U_v(0, x_2), u(x_1, 0) = U_v(x_1, 0), \quad (2.24)$$

$$u(H_1, x_2) = \sum_{k_1=0}^{\infty} U_v(k_1, x_2) = \Psi_1(x_2), \quad (2.25)$$

$$u(x_1, H_2) = \sum_{k_2=0}^{\infty} U_v(x_1, k_2) = \Psi_2(x_1), \quad (2.26)$$

$$U_v(m, x_2) = \frac{H_1^m}{m!} \left[\frac{d^m u(x_1, x_2)}{\partial x_1^m} \right]_{x_1=x_{1v}}, \quad (2.27)$$

$$U_v(x_1, m) = \frac{H_2^m}{m!} \left[\frac{d^m u(x_1, x_2)}{\partial x_2^m} \right]_{x_2=x_{2v}},$$

$$\left[\frac{d^m u(x_1, x_2)}{\partial x_1^m} \right]_{x_1=H_1+x_{1v}} = \frac{1}{H_1^m} \sum_{k_1=0}^{\infty} \frac{(k_1+m)!}{k_1!} U_v(k_1+m, x_2) = \bar{\Psi}_1(x_2), \quad (2.28)$$

$$\left[\frac{d^m u(x_1, x_2)}{\partial x_2^m} \right]_{x_2=H_2+x_{2v}} = \frac{1}{H_2^m} \sum_{k_2=0}^{\infty} \frac{(k_2+m)!}{k_2!} U_v(x_1, k_2+m) = \bar{\Psi}_2(x_1), \quad (2.29)$$

Граничные условия (2.19) выражаются через дискретизацию дифференциальных спектров на основе выражений (2.24), (2.29). Граничные условия (2.24), (2.27) определяют начальные дискреты дифференциальных спектров $U_v(k_1, x_2)$ и $U_v(x_1, k_2)$. Неизвестные дискретизации дифференциальных спектров определяются на основе решения уравнений (2.25), (2.29), которые в общем случае являются обыкновенными дифференциальными уравнениями по аргументу x_1 или x_2 . В случае линейных уравнений с частными производными (2.16) и линейных граничных условий (2.17)–(2.19) обыкновенные дифференциальные уравнения (2.25), (2.26), (2.28), (2.29) также являются линейными и решение их может быть найден в общем виде. После определения дискретных дифференциальных спектров $U_v(k_1, x_2)$ или $U_v(x_1, k_2)$ решение краевой задачи (2.16)–(2.19), полученное в области изображений, переводится в область оригиналов обратными преобразованиями (2.4) или (2.6).

Поэтапная схема реализации метода представлена на рис. 2.1.

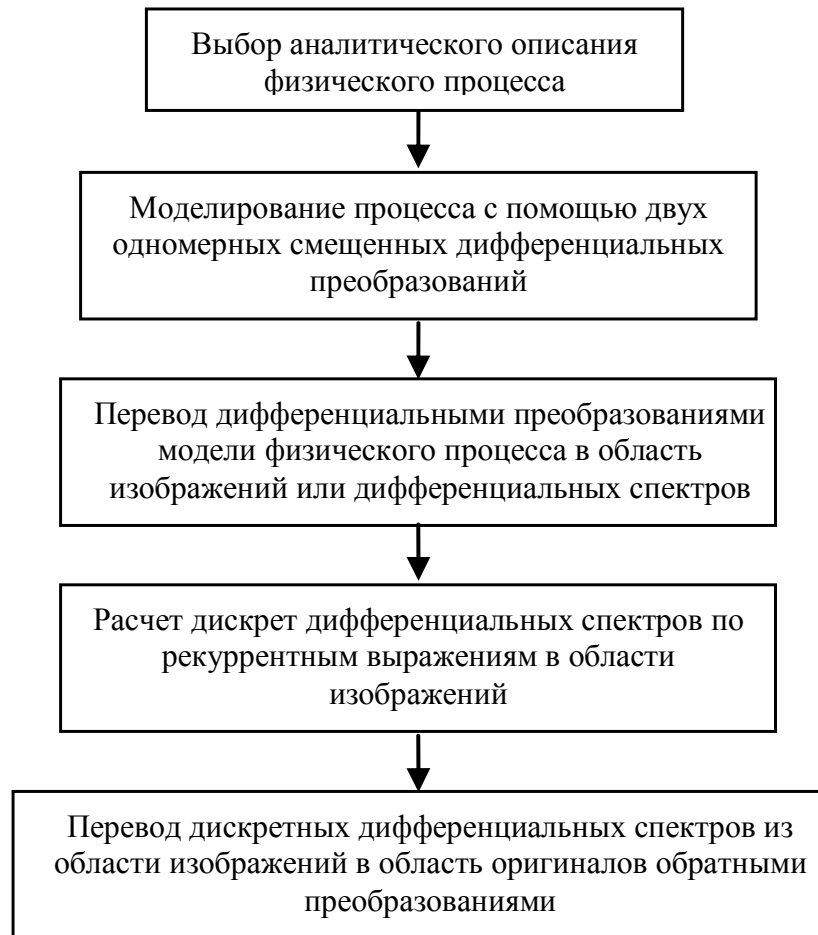


Рис. 2.1. Метод одномерных дифференциальных преобразований краевых задач

Его реализацию рассмотрим на примере моделирования физического процесса, описываемого волновыми уравнениями:

$$\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} \quad (2.30)$$

$$\text{– с граничными условиями: } u(0, t) = u(\pi, t) = 0, \quad (2.31)$$

$$\text{– с начальными условиями: } u(x, 0) = \sin x, \left. \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \right|_{t=0} = 0. \quad (2.32)$$

Решим его путем аппроксимации производных по x центральным разностям с применением одномерных дифференциальных преобразований по временному аргументу. При этом моделирование физического процесса (2.30)–(2.32) выполним несколькими дифференциальными преобразованиями краевых задач. Введем обозначения $x = x_1$, $t = x_2$ и переведем уравнения (2.30) дифференциальными преобразованиями (2.5) в область изображений (2.23) в фиксированной точке ($x_{1v}=0, x_{2v}=0$)

$$U_v(x_1, k_2 + 2) = \frac{H_2^2}{(k_2 + 1)(k_2 + 2)} \frac{d^2 U_v(x_1, k_2)}{dx_1^2}. \quad (2.33)$$

Начальные дискретизации дифференциального спектра $U_v(x_1, k_2)$ определяем по начальным условиям (2.32) и соотношениями (2.24), (2.27):

$$U_v(x_1, 0) = \sin x_1, U_v(x_1, 1) = \frac{H_m}{1} \left(\frac{du(x, t)}{dt} \right)_{t=0} = 0. \quad (2.34)$$

Исходя из рекуррентного выражения (2.33) и начальных дискрет (2.34), придавая целочисленному аргументу k_2 значения 0, 1, 2, 3, определяем дифференциальный спектр $U_v(x_1, k_2)$:

$$\begin{aligned} U_v(x_1, 0) = \sin x, U_v(x_1, 1) = 0, U_v(x_1, 2) = -\frac{H_2^2}{2!} \sin x_1 U_v(x_1, 3) = 0, \\ U_v(x_1, 4) = \frac{H_2^4}{4!} \sin x U_v(x_1, 5) = 0, U_v(x_1, 6) = -\frac{H_2^6}{6!} \sin x_1. \end{aligned} \quad (2.35)$$

Используя обратные преобразования (2.6) при $x_{2v}=0$ дифференциального спектра (2.35), получаем решение в области оригиналов:

$$\begin{aligned} u(x_1, x_2) &= \sum_{k_2}^{\infty} \left(\frac{x_2}{H_2} \right)^{k_2} U_v(x_1, k_2) = \\ &= \left(1 - \frac{x_2^2}{2!} + \frac{x_2^4}{4!} - \frac{x_2^6}{6!} + \dots \right) \sin x_1 = \sin x_1 \cos x_2. \end{aligned} \quad (2.36)$$

Если вернуться к исходным обозначениям, то получим решение, точно удовлетворяющее уравнению (2.30) граничным условиям (2.31) и начальным условиям (2.32):

$$U(x, t) = \sin x \cdot \cos t. \quad (2.37)$$

Пример показывает, что в данном случае нет необходимости в аппроксимации производных по x центральными разностями, которая вносит методическую погрешность. Решение краевой задачи (2.30)–(2.32) комбинированным методом одномерных дифференциальных преобразований и конечно-разностной аппроксимацией производных по x дает приближенный вид:

$$u\left(\frac{\pi}{2}, t\right) = \left(1 - 4\left(\frac{t}{\pi}\right)^2 + \frac{8}{3}\left(\frac{t}{\pi}\right)^4 - \dots \right). \quad (2.38)$$

Если ограничиться в решении (2.36) таким же количеством членов строки как в (2.38), то при $x = \frac{\pi}{2}$ получим:

$$u\left(\frac{\pi}{2}, t\right) = 1 - \frac{t^2}{2!} + \frac{t^4}{4!}. \quad (2.39)$$

Сравним погрешности решений (2.38) и (2.39) при $t = \frac{\pi}{3}$, учитывая, что точное решение (2.37) получим в точке $u\left(\frac{\pi}{2}, t = \frac{\pi}{3}\right) = 0,5$.

Таким образом, вычисление по формулам (2.38) и (2.39) дают соответственно значения решения 0,59 и 0,5018, а абсолютные погрешности составляют при этом $\varepsilon_1 = 0,09$, $\varepsilon_2 = 0,0018$. Абсолютная погрешность решения краевой задачи (2.30)–(2.32) предложенным методом для выбранной точки $x = \frac{\pi}{2}, t = \frac{\pi}{3}$ в 50 раз меньше, чем комбинированным методом одномерных дифференциальных преобразований по одной переменной и конечно-разностной аппроксимацией производных по другой переменной.

2.1.2. Метод одномерных дифференциальных преобразований нелинейных граничных условий краевых задач

Из широкого класса нелинейных краевых задач (2.16)–(2.19) выделим нелинейные задачи в области

$$0 \leq |x_1| \leq \bar{H}_1, 0 \leq |x_2| \leq \bar{H}_2, \quad (2.40)$$

где \bar{H}_1, \bar{H}_2 – заданные константы, с граничными условиями (2.17)–(2.19), в которых дифференциальное уравнение в частных производных

$$f\left(x_1, x_2, u, \frac{\partial u}{\partial x_1}, \frac{\partial u}{\partial x_2}, \frac{\partial^2 u}{\partial x_1 \partial x_2}, \frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2}, \frac{\partial^2 u}{\partial x_2^2}\right) = 0 \quad (2.41)$$

можно представить в виде одной из двух форм:

$$\frac{\partial^2 u(x_1, x_2)}{\partial x_1^2} = \varphi_1\left(x_1, x_2, u, \frac{\partial u}{\partial x_1}, \frac{\partial u}{\partial x_2}, \frac{\partial^2 u}{\partial x_1 \partial x_2}, \dots, \frac{\partial^2 u}{\partial x_2^2}\right), \quad (2.42)$$

$$\frac{\partial^2 u(x_1, x_2)}{\partial x_1^2} = \Phi_2 \left(x_1, x_2, u, \frac{\partial u}{\partial x_1}, \frac{\partial u}{\partial x_2}, \frac{\partial^2 u}{\partial x_1 \partial x_2}, \dots, \frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2} \right), \quad (2.43)$$

где Φ_1, Φ_2 — произвольные функции своих аргументов.

Нелинейные краевые задачи (2.17)–(2.19), (2.42)–(2.43) предлагается моделировать на основе системы двух смешанных дифференциальных преобразований

$$U(k_1, x_2) = \frac{H_1^{k_1}}{k_1!} \left(\frac{d^{k_1} u(x_1, x_2)}{\partial x_1^{k_1}} \right)_{x_1=x_{1v}}, \quad (2.44)$$

$$U(x_1, k_2) = \frac{H_2^{k_2}}{k_2!} \left(\frac{d^{k_2} u(x_1, x_2)}{\partial x_2^{k_2}} \right)_{x_2=x_{2v}}, \quad (2.45)$$

где x_{1v}, x_{2v} — координаты фиксированной точки в границах области (2.40);

k_1, k_2 — целочисленные аргументы, принимающие значения $0, 1, 2, \dots, \infty$;

$U(k_1, x_2), U(x_1, k_2)$ — дифференциальные изображения функции $u(x_1, x_2)$;

H_1, H_2 — заданные дополнительные константы, определяющие ограничения на независимые переменные в среде, в которой рассматривается физический процесс:

$$x_{1v} \leq x_1 \leq x_{1v} + H_1, \quad x_{2v} \leq x_2 \leq x_{2v} + H_2. \quad (2.46)$$

Обратный переход из области изображений в область оригиналов осуществляется обратными дифференциальными преобразованиями вида (2.4), (2.6):

$$u(x_1, x_2) = \sum_{k_1=0}^{\infty} \left(\frac{x_1 - x_{1v}}{H_1} \right)^{k_1} U(k_1, x_2), \quad (2.47)$$

$$u(x_1, x_2) = \sum_{k_2=0}^{\infty} \left(\frac{x_2 - x_{2v}}{H_2} \right)^{k_2} U(x_1, k_2). \quad (2.48)$$

Все основные свойства одномерных дифференциальных преобразований, установленные в разделе (2.1) для преобразований вида (2.44), (2.45), сохраняются. Исходя из этого уравнения, (2.42) переведем в область изображений дифференциальными преобразованиями (2.44), а перевод

уравнения (2.43) в область изображений выполним дифференциальными преобразованиями (2.45). Получим:

$$U(k_1 + 2, x_2) = \frac{k_2! H_1^2}{(k_2 + 2)!} \cdot \Phi_1 \left[k_1, x_2, U(k_1, x_2), \right. \\ \left. \frac{k_1 + 1}{H_1} U(k_1 + 1, x_2), \frac{dU(k_1, x_2)}{dx_2}, \frac{(k_1 + 1)dU(k_1 + 1, x_2)}{H_1}, \frac{d^2U(k_1, x_2)}{dx_2^2} \right], \quad (2.49)$$

$$U(x_1, k_2 + 2) = \frac{k_2! H_2^2}{(k_2 + 2)!} \cdot \Phi_2 \left[x_1, k_2, U(x_1, kx_2), \frac{dU(x_1, k_2)}{dx_1}, \right. \\ \left. \frac{k_2 + 1}{H_2} U(x_1 k_2 + 1), \frac{(k_2 + 1)dU(x_1, k_2 + 1)}{dx_1}, \frac{d^2U(x_1, k_2)}{dx_1^2} \right], \quad (2.50)$$

где Φ_1 – изображение функции φ_1 на основе преобразований (2.44);

Φ_2 – изображение функции φ_2 на основе преобразований (2.45).

Рекуррентный вид выражений (2.49), (2.50) позволяет находить дискреты дифференциальных спектров $U(k_1, x_2)$, $U(x_1, k_2)$ последовательно, предоставляя целочисленным аргументам k_1 и k_2 значение $0, 1, 2, 3, \dots$. Аналитические вычисления по выражениям (2.49), (2.50) можно выполнять с неизвестными начальными дискретами дифференциальных спектров, используя их символьные обозначения. Уравнение для определения неизвестных дискрет дифференциальных спектров составляют на основе граничных условий (2.17)–(2.19), используя обратные преобразования (2.47), (2.48). Граничные условия вида (2.17), (2.18) связаны с дискретами дифференциальных спектров (2.44), (2.45) следующим образом [83]:

$$u(x_{1v}, x_2) = U(0, x_2), \quad u(x_1, x_{2v}) = U(x_1, 0), \\ u(x_{1v} + H_1, x_2) = \sum_{k_1=0}^{\infty} U(k_1, x_2) = \psi_1(x_2), \\ u(x_1, x_{2v} + H_2) = \sum_{k_2=0}^{\infty} U(x_1, k_2) = \psi_2(x_1), \\ U(1, x_2) = H_1 \left[\frac{\partial u(x_1, x_2)}{\partial x_1} \right]_{x_1=x_{1v}}, \quad U(x_1, 1) = H_2 \left[\frac{\partial u(x_1, x_2)}{\partial x_2} \right]_{x_2=x_{2v}}, \quad (2.51) \\ \left[\frac{\partial u(x_1, x_2)}{\partial x_1} \right]_{x_1=H_1+x_{1v}} = \frac{1}{H_1} \sum_{k_1=0}^{\infty} (k_1 + 1) U(k_1 + 1, x_2) = \overline{\psi}_1(x_2),$$

$$\left[\frac{\partial u(x_1, x_2)}{\partial x_2} \right]_{x_2=H_2+x_{2v}} = \frac{1}{H_2} \sum_{k_2=0}^{\infty} (k_2+1) U(x_1, k_2+2) = \overline{\psi}_2(x_1),$$

Подстановка функции $u(x_1, x_2)$ из выражений (2.47), (2.48) в граничное условие (2.19) дает обычные нелинейные дифференциальные уравнения для определения неизвестных дискрет дифференциальных спектров:

$$\left[\frac{\partial u(x_1, x_2)}{\partial x_1} \right]_{x_1=H_1+x_{1v}} = \sum_{k_1=0}^{\infty} \frac{k_1}{H_1} U(k_1, x_2) = \delta(u) \Big|_{x_1=H_1+x_{1v}}, \quad (2.52)$$

$$\left[\frac{\partial u(x_1, x_2)}{\partial x_2} \right]_{x_2=H_2+x_{2v}} = \sum_{k_2=0}^{\infty} \frac{k_2}{H_2} U(k_1, x_2) = \delta(u) \Big|_{x_2=H_2+x_{2v}}. \quad (2.53)$$

Аналитическое решение нелинейных дифференциальных уравнений (2.52), (2.53) можно найти двумя способами. Первый из них заключается в применении одномерных дифференциальных преобразований Пухова Г. Е. [96] Второй – требует линеаризации нелинейной функции δ , переводящей дифференциальные уравнения (2.52), (2.53) в класс линейных уравнений.

Поэтапный алгоритм реализации предложенного метода представлен на рис. 2.2. От модели, представленной на рис. 2.1, он отличается дополнительным введением этапов 6 и 7, необходимых для выделения единственного решения из множества решений путем использования граничных условий и регуляризующего функционала.

Первый шагом к ее реализации является перевод уравнений, которые имеют обозначения $p = x_1, z = x_2$, к виду (2.54), (2.55):

$$\frac{\partial v}{\partial x_1} = -x_1 \frac{\partial^2 u}{\partial x_2^2}, \quad v(x_1, x_2) = x_1 \frac{\partial u}{\partial x_1};$$

$$V(k+1, x_2) = \frac{H_1}{(k+1)} \sum_{l=0}^{l=k} \binom{1}{l} \gamma^{1-l} \cdot H_1^l \frac{d^2 U(k-l, x_2)}{\partial x_2^2}, \quad (2.54)$$

$$V(k, x_2) = \sum_{l=0}^{l=k} \binom{1}{l} \gamma^{1-l} \cdot H_1^{l-1} (k-l+1) U(k-l+1, x_2), \quad (2.55)$$

где $k_1, k_2 = 0, 1, 2, 3, \dots$ – целочисленный аргумент; $\binom{1}{l} = \frac{1}{l!(1-l)!}$ – биномиальные коэффициенты.



Рис. 2.2. Моделирование физических процессов и полей на основе дифференциальных преобразований нелинейных краевых задач

На основе соотношений (2.51) граничные условия $u \Big|_{x_1=\gamma} = \alpha, \frac{\partial u}{\partial x_2} \Big|_{x_2=0}$

позволяют задать начальные дифференциального спектра $U(k_1, x_2)$ в виде

$$U(0, x_2) = \alpha, U(1, x_2) = H_1 \varphi(x_2), \quad (2.56)$$

где $\varphi(x_2)$ – произвольная функция, которую нужно определить.

Второй шаг состоит в аналитическом определении дискрет дифференциального спектра $U(k_1, x_2)$ по выражениям (2.54), (2.55), (2.56) путем последовательного присвоения целочисленному аргументу k значений $0, 1, 2, \dots$. В результате выполнения этого шага получаем дифференциальный спектр:

$$U(0, x_2) = \alpha, U(1, x_2) = H_1 \varphi(x_2), U(2, x_2) = -\frac{H_1^2}{2\gamma} \varphi(x_2), \quad (2.57)$$

$$U(3, x_2) = -\frac{H_1^3}{3} \left[\frac{\varphi(x_2)}{\gamma^2} - \frac{\ddot{\varphi}(x_2)}{2} \right],$$

где $\varphi(x_2) = \frac{d^2\varphi(x_2)}{dx_2^2}$.

На третьем шаге происходит восстановление оригинала решения граничной задачи $u(x_1, x_2)$ обратными преобразованиями (2.47), используя при этом дифференциальный спектр (2.57):

$$u(x_1, x_2) = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{x_1 - \gamma}{H_1} \right)^k U(k, x_2) = \alpha + \gamma \cdot \varphi(x_2) \left[\frac{x_1 - \gamma}{\gamma} - \frac{1}{2} \left(\frac{x_1 - \gamma}{\gamma} \right)^2 + \right. \quad (2.58)$$

$$\left. \frac{1}{3} \left(\frac{x_1 - \gamma}{\gamma} \right)^3 - \frac{(x_1 - \gamma)^3}{6} \cdot \ddot{\varphi} x_2 \right] = \alpha + \gamma \cdot \varphi(x_2) \ln \frac{x_1}{\gamma} - \frac{(x_1 - \gamma)^3}{6} \cdot \ddot{\varphi} x_2.$$

В решении граничной задачи (2.58) содержится неизвестная функция $\varphi(x_2)$ которая должна удовлетворять граничным условиям:

$$u|_{x_1=\gamma} = \alpha, \quad \left. \frac{\partial u}{\partial x_2} \right|_{x_2=0} = 0, \quad \left. \left(\frac{\partial u}{\partial x_1} + hu^4 \right) \right|_{x_1=\beta} = 0, \quad \left. \left(\frac{\partial u}{\partial x_2} + hu^4 \right) \right|_{x_2=1} = 0.$$

Четвертый шаг метода состоит в определении неизвестной функции $\varphi(x_2)$. С этой целью подставляем решение (2.58) в граничное условие

$$\left. \left(\frac{\partial u}{\partial x_1} + hu^4 \right) \right|_{x_1=\beta} = 0.$$

В результате получаем нелинейное дифференциальное уравнение:

$$\frac{1}{2} (\beta - \gamma)^2 \ddot{\varphi} x_2 - \frac{\gamma}{\beta} \varphi(x_2) = h \cdot \left[\alpha + \gamma \cdot \varphi(x_2) \ln \frac{\beta}{\gamma} - \frac{(\beta - \gamma)^3}{6} - \ddot{\varphi} x_2 \right]^4. \quad (2.59)$$

Умножим левую и правую части уравнения (2.59) на $\frac{1}{h\alpha^4}$ и введем обозначение:

$$b_1 = \frac{(\beta - \gamma)^2}{2h\alpha^4}, \quad b_2 = \frac{\gamma}{\beta \cdot h\alpha^4}, \quad b_3 = \frac{\gamma}{\alpha} \ln \frac{\beta}{\gamma}, \quad b_4 = \frac{(\beta - \gamma)^3}{6\alpha}. \quad (2.60)$$

С учетом обозначений (2.60) уравнение (2.59) приведем к виду:

$$\sqrt[4]{1 - [1 + b_2\varphi(x_2) - b_1\ddot{\varphi}(x_2)]} = 1 + b_3\varphi(x_2) - b_4\ddot{\varphi}(x_2). \quad (2.61)$$

Нелинейное дифференциальное уравнение (2.61) можно решить одномерными дифференциальными преобразованиями по переменной x_2 или

другими известными численно-аналитическими методами. Например, решение нелинейного дифференциального уравнения (2.61) выполним известным методом линеаризации [83]. Разложим левую часть уравнения (2.61) в степенной ряд кубического члена и выделим из нелинейных составляющих главную линейную часть. В результате получим линейное дифференциальное уравнение:

$$1 - \frac{1}{4} [1 + b_2 \varphi(x_2) - b_1 \ddot{\varphi}(x_2)] - \frac{1}{32} (1 + 2 [b_2 \varphi(x_2) - b_1 \ddot{\varphi}(x_2)]) - \frac{21}{384} (1 + 3 [b_2 \varphi(x_2) - b_1 \ddot{\varphi}(x_2)]) = 1 + b_3 \varphi(x_2) - b_4 \ddot{\varphi}(x_2). \quad (2.62)$$

Уравнение (2.62) приведем к виду:

$$\left(\frac{77}{128} b_1 + b_4 \right) \cdot \ddot{\varphi}(x_2) - \left(\frac{77}{128} b_2 + b_3 \right) \cdot \varphi(x_2) = \frac{51}{128}. \quad (2.63)$$

Из граничных условий $u|_{x_1=\gamma} = \alpha$, $\left. \frac{\partial u}{\partial x_2} \right|_{x_2=0} = 0$, с учетом (2.58), (2.63)

вытекает условие $\varphi(0) = 0$, которое имеет вид:

$$\varphi(x_2) = -C - C_4 \cdot ch C_2 x_2, \quad (2.64)$$

где $C_2 = \sqrt{\frac{\frac{77}{128} b_2 + b_3}{\frac{77}{128} b_1 + b_4}} = 22,75$ при $x_1 = \beta = 0,25$.

Подстановка уравнения (2.64) в выражение (2.58) даст решение нелинейной граничной задачи в аналитическом виде:

$$u(x_1, x_2) = \alpha - C_1 \ln \frac{x_1}{\gamma} - C_3 \frac{ch C_2 x_2}{ch C_2} \left[\ln \frac{x_1}{\gamma} - \frac{C_2^2}{6\gamma} (x_1 - \gamma)^3 \right], \quad (2.65)$$

где $C_1 = C\gamma$, $C_3 = C_4 \cdot \gamma \cdot ch C_2$.

Решение (2.65) удовлетворяет граничным условиям, но содержит неизвестные параметры C_1 , C_2 , C_3 для определения которых имеем только одно граничное условие:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x_2} + hu^4 \right) \Big|_{x_2=1} = 0. \quad (2.66)$$

Пятый шаг заключается в решении некорректной задачи определения параметров C_1, C_2, C_3 (2.65) при одном граничном условии (2.66).

Для этого воспользуемся методом Тихонова А.М. [83] путем введения регуляризующего функционала в виде квадрата нормы параметров C_1, C_3 , так как для определения C_2 имеем одно граничное условие (2.66):

$$I = C_1^2 + C_3^2. \quad (2.67)$$

Подстановка решения (2.65) в граничное условие (2.66) дает уравнение:

$$-\frac{\partial u}{\partial x_2} \Big|_{x_2=1} = C_2 \cdot C_3 \cdot thC_2 \left[\ln \frac{x_1}{\gamma} - \frac{C_2^2}{6\gamma} (x_1 - \gamma)^3 \right] = hu^4 \Big|_{x_2=1}, \quad (2.68)$$

где thC_2 при $C_2 = 22,75$ в (2.64) можно принять равным единице.

Тогда уравнение (2.68) принимает вид:

$$C_2 \cdot C_3 \left[\ln \frac{x_1}{\gamma} - \frac{C_2^2}{6\gamma} (x_1 - \gamma)^3 \right] = hu^4 \Big|_{x_2=1}. \quad (2.69)$$

Некорректная задача свелась к оптимизационной задаче нахождения минимума регуляризующего функционала (2.67) при ограничении в виде равенства (2.69). Подстановка C_3 из уравнения (2.69) в выражение (2.67) дает регуляризующий функционал в виде:

$$I = C_1^2 + \left(\frac{hu^4 \Big|_{x_2=1}}{C_2 \left[\ln \frac{x_1}{\gamma} - \frac{C_2^2}{6\gamma} (x_1 - \gamma)^3 \right]} \right)^2. \quad (2.70)$$

Необходимые условия минимизации (2.70) дают уравнению (2.69) дополнительно два уравнения:

$$\frac{\partial I}{\partial C_1} = 0, \quad \frac{\partial I}{\partial C_2} = 0. \quad (2.71)$$

Условия (2.71) с учетом (2.70) преобразуют к виду:

$$C_1 \cdot C_2 \left[\ln \frac{x_1}{\gamma} - \frac{C_2^2}{6\gamma} (x_1 - \gamma)^3 \right] - 4hC_3 \ln \frac{x_1}{\gamma} \cdot u^3 \Big|_{x_2=1} = 0, \quad (2.72)$$

$$4C_2^2 \cdot C_3 \left[\ln \frac{x_1}{\gamma} - \frac{C_2^2}{6\gamma} (x_1 - \gamma)^3 \right] - \frac{(x_1 - \gamma)^3}{3\gamma} - \left[\ln \frac{x_1}{\gamma} - \frac{C_2^2}{6\gamma} (x_1 - \gamma)^3 \right] u \Big|_{x_2=1} = 0,$$

$$u \Big|_{x_2=1} = \alpha - C_1 \ln \frac{x_1}{\gamma} - C_3 \left[\ln \frac{x_1}{\gamma} - \frac{C_2^2}{6\gamma} (x_1 - \gamma)^3 \right]. \quad (2.73)$$

Таким образом, неизвестные в диапазоне изменения определяются из системы трех нелинейных уравнений (2.69), (2.72), (2.73). Из всех корней, удовлетворяющих эту систему, следует выбрать положительные действительные корни, которые дают минимальное значение регуляризующего функционала (2.70). Решим неопределенности в особых точках $x_1 = \beta = 0,25$, $x_2 = 1$, в которых неопределенно направление внешней нормали. С учетом этого граничные условия излучения по закону Стефана-Больцмана в особых точках имеют вид:

$$-\frac{\partial u}{\partial x_1} \Big|_{\substack{x_1=\beta \\ x_2=1}} = \frac{\sqrt{2}}{2} hu^4 \Big|_{\substack{x_1=\beta \\ x_2=1}}, \quad (2.74)$$

$$-\frac{\partial u}{\partial x_2} \Big|_{\substack{x_1=\beta \\ x_2=1}} = \frac{\sqrt{2}}{2} hu^4 \Big|_{\substack{x_1=\beta \\ x_2=1}}. \quad (2.75)$$

Подстановка уравнения (2.65) в выражения (2.74), (2.75) позволяет определить C_1 и C_3 в особых точках $x_1 = \beta = 0,25$, $x_2 = 1$ при $x_2 = 1$:

$$C_2 \cdot C_3 \left[\ln \frac{x_1}{\gamma} - \frac{C_2^2}{6\gamma} (x_1 - \gamma)^3 \right] = \frac{\sqrt{2}}{2} hu^4 \Big|_{\substack{x_1=\beta \\ x_2=1}}, \quad (2.76)$$

$$\frac{C_1}{\beta} + C_3 \cdot \left[\frac{1}{\beta} - \frac{C_2^2}{2\gamma} (x_1 - \gamma)^2 \right] = \frac{\sqrt{2}}{2} hu^4 \Big|_{\substack{x_1=\beta \\ x_2=1}}, \quad (2.77)$$

где

$$u \Big|_{\substack{x_1=\beta \\ x_2=1}} = \alpha - C_1 \ln \frac{\beta}{\gamma} - C_3 \cdot \left[\ln \frac{\beta}{\gamma} - \frac{C_2^2}{6\gamma} (x_1 - \gamma)^3 \right].$$

В особых точках согласно (2.64) $C_2 = 22,75$, а неизвестные параметры C_1 и C_3 определяются из системы нелинейных уравнений (2.76), (2.77) всех корней, удовлетворяющих эту систему, нужно выбрать положительные действительные корни C_1 и C_3 , которые дают минимальное значение регуляризующего функционала (2.77). Таким образом, моделирование поля выполнено в аналитическом виде (2.76). Численные расчеты поля с выражениями (2.66), (2.69), (2.72), (2.73), (2.76), (2.77) показали, что результаты аналитического решения нелинейной краевой задачи в соответствии с решением уравнения Лапласа в виде:

$$\frac{1}{p} \cdot \frac{\partial}{\partial p} \left(p \cdot \frac{\partial u}{\partial p} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0, \quad \gamma < p < \beta, \quad 0 < z < l,$$

с граничными условиями

$$u \Big|_{p=\gamma} = \alpha, \quad \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial p} + hu^4 \right) \Big|_{z=1} = 0, \quad \gamma = 0,1875,$$

согласуется с результатами, полученными другими методами, описанными в 2.1.1.

Таким образом, предложенный метод моделирования физических процессов на основе одномерных дифференциальных преобразований краевых задач расширен на область применения аналитических моделей на задачи с нелинейными краевыми условиями. Благодаря применению операции умножения двух функций в области изображений по выражениям (2.10) и (2.11) его реализация значительно проще метода, описанного в предыдущем разделе. Это позволяет применять его для анализа большого объема вычислений на ПЭВМ при выявлении опасных сигналов комплексами ТЗИ в условиях моделирования физических процессов в реальном или ускоренном времени.

2.2. Метод баланса дифференциальных спектров для моделирования физических процессов в комплексах ТЗИ

Целью исследования является внедрение численно-аналитического метода, который уменьшает вычислительную сложность моделирования физических процессов в комплексах ТЗИ на ПЭВМ.

Рассмотрим физические процессы, которые описываются функцией $u(x_1, x_2)$ независимых переменных в области, определяется ограничениями:

$$0 \leq x_1 \leq H_1, \quad (2.78)$$

$$0 \leq x_2 \leq H_2, \quad (2.79)$$

где H_1, H_2 – заданные дополнительные константы.

Моделирование процессов вида $u(x_1, x_2)$ выполним, используя систему двух одномерных смещенных дифференциальных преобразований вида:

$$U(k_1, x_2) = \frac{H_1^{k_1}}{k_1!} \left(\frac{\partial^{k_1} u(x_1, x_2)}{\partial x_1^{k_1}} \right)_{x_1=0}, \quad (2.80)$$

$$u(x_1, x_2) = \sum_{k_1=0}^{\infty} \left(\frac{x_1 - x_{1v}}{H_1} \right)^{k_1} U(k_1, x_2), \quad (2.81)$$

$$U(x_1, k_2) = \frac{H_2^{k_2}}{k_2!} \left(\frac{\partial^{k_2} u(x_1, x_2)}{\partial x_2^{k_2}} \right)_{x_2=0}, \quad (2.82)$$

$$u(x_1, x_2) = \sum_{k_2=0}^{\infty} \left(\frac{x_2 - x_{2v}}{H_2} \right)^{k_2} U(x_1, k_2), \quad (2.83)$$

где целочисленные аргументы k_1 и k_2 принимают значения $0, 1, 2, 3, \dots$.

Выражение (2.80) описывает прямые дифференциальные преобразования функции $u(x_1, x_2)$ в функцию $U(k_1, x_2)$ целочисленного аргумента k_1 и независимой переменной x_2 . Обратные дифференциальные преобразования (2.81) позволяют по дифференциальным спектрам $U(k_1, x_2)$ восстановить в области оригиналов процесс $u(x_1, x_2)$. Выражения (2.82) и (2.83) описывают соответственно прямые и обратные смещенные дифференциальные преобразования по переменной x_2 .

Дифференциальные спектры $U(k_1, x_2), U(x_1, k_2)$ являются аналогами в области изображений физического процесса, математическая модель которого задается функцией $u(x_1, x_2)$.

В разделе 2.1 предложено после определения дискретных дифференциальных спектров $U(k_1, x_2)$ и $U(x_1, k_2)$ решение краевой задачи (2.16) - (2.19), полученное в области изображений, и переходящее в область оригиналов обратными преобразованиями (2.81) или (2.83). Основным недостатком аналитического описания физических процессов в виде рядов вида (2.81) и (2.83) является ограничение области изменения независимых переменных (2.78), (2.79) радиусом сходимости этих рядов. В данном разделе предлагается получить аналитическое описание физического процесса методом баланса дифференциальных спектров. На основе экспериментальных исследований физических процессов, или в результате предварительного анализа их математических моделей во многих практических приложениях удастся выбрать аналитическое описание физического процесса, который больше всего подходит, например, в виде ряда следующего вида:

$$\begin{aligned}
 u(x_1, x_2) &= \sum_{i=0}^{\infty} a_i(x_1) \cdot x_2^i, \\
 u(x_1, x_2) &= \frac{\sum_{i=0}^{\infty} a_i(x_1) \cdot x_2^i}{1 + \sum_{j=0}^{\infty} b_j(x_1) \cdot x_2^j}, \\
 u(x_1, x_2) &= \sum_{i=0}^{\infty} A_i(x_1) \cdot e^{a_i + x_2}, \\
 u(x_1, x_2) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{i=0}^{\infty} a_i(x_1) \cdot \sin \omega_i x_2.
 \end{aligned} \tag{2.84}$$

Если в выражении (2.46) поменять местами индексы независимых переменных i , то получим еще четыре аналитические формы описания физических процессов. В общем случае аналитическое описание физического процесса можно выбрать в одной из двух форм:

$$u(x_1, x_2) = \begin{cases} f_1[A(x_1), x_2, a] \\ f_2[x_1, B(x_2), \beta] \end{cases} \tag{2.84}$$

где f_1, f_2 – заданные дифференциальные функции;

$$A(x_1) = \{a_1(x_1), a_2(x_1), \dots, a_n(x_1)\},$$

$B(x_2) = \{b_1(x_2), b_2(x_2), \dots, b_n(x_2)\}$ – совокупность функций одной переменной x_1 или x_2 , которые нужно определить;

$\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}, \beta = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n\}$ – совокупность независимых параметров.

Реализация метода баланса дифференциальных спектров предполагает выполнение нескольких взаимосвязанных этапов (рис. 2.3).

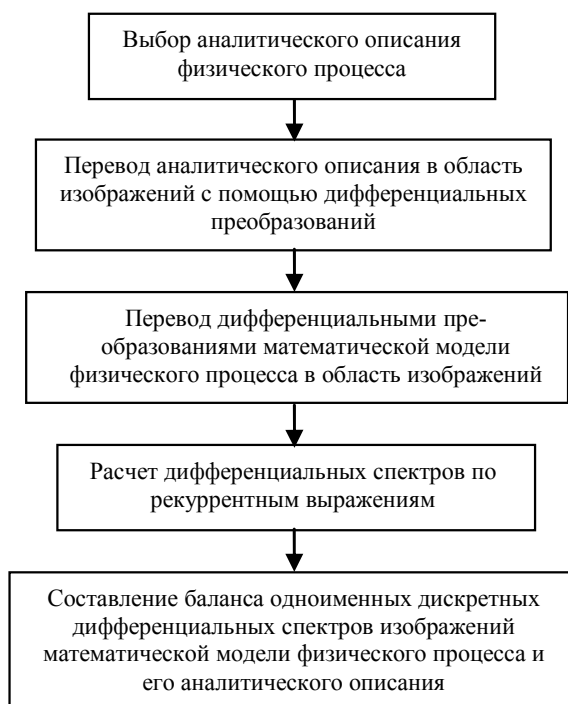


Рис. 2.3. Метод баланса дифференциальных спектров

На первом этапе выбирается аналитическое описание (2.85) физического процесса, удовлетворяющего граничным условиям вида (2.17)–(2.19).

На втором этапе дифференциальными преобразованиями (2.80) или (2.82) переводят аналитическое описание (2.85) физического процесса в область изображений:

$$U(k_1, x_2) = F_2[k_1 B(x_2), \beta], \quad (2.86)$$

$$U(x_1, k_2) = F_1[A(x_1), k_2, \alpha], \quad (2.87)$$

где F_1 – изображение функции f_1 полученное преобразованиями (2.82);

F_2 – изображение функции f_2 , полученное на основе преобразований (2.80).

На третьем этапе математическую модель физического процесса (2.20) или (2.21) переводят дифференциальными преобразованиями (2.80) или (2.82) в область изображений (2.22) или (2.23).

Четвертый этап заключается в расчете дифференциальных спектров $U(k_1, x_2)$ или $U(x_1, k_2)$ по рекуррентным выражениям (2.22) или (2.23), используя в качестве исходных дискреты дифференциального спектра (2.86) или (2.87).

Заключительный этап реализуется составлением баланса одноименных дискретных дифференциальных спектров изображений математической модели (2.22) или (2.23) физического процесса и его аналитического описания (2.85) или (2.87):

$$\begin{aligned}
 U(k_1 + m, x_2) &= \\
 &= \frac{k_1! H_1^m}{(k_1 + m)!} \cdot \Phi_1 \left[k_1, x_2, U(k_1, x_2), \frac{k_1 + 1}{H_1} U(k_1 + 1, x_2), \frac{dU(k_1, x_2)}{dx_2}, \right. \\
 & \left. \frac{(k_1 + 1)(k_1 + 2)}{H_1^2} u(k_1 + 2, x_2), \dots, \frac{d^m u(k_1, x_2)}{dx_2^m} \right] = \\
 &= F_2[k_1 + m, B(x_2), \beta],
 \end{aligned} \tag{2.88}$$

$$\begin{aligned}
 U(x_1, k_2 + m) &= \\
 &= \frac{k_2! H_2^m}{(k_2 + m)!} \cdot \Phi_2 \left[x_1, k_2, U(x_1, k_2), \frac{dU(x_1, k_2)}{dx_1}, \frac{k_2 + 1}{H_2} U(x_1, k_2 + 1), \right. \\
 & \left. \frac{d^2 U(x_1, k_2)}{dx_1^2}, \dots, \frac{d^m U(x_1, k_2)}{dx_1^m} \right] = \\
 &= F_1[A(x_1), k_2 + m, \alpha].
 \end{aligned} \tag{2.89}$$

где $k_1, k_2 = 0, 1, 2, \dots$.

Система обыкновенных дифференциальных уравнений (2.88) или (2.89) с учетом (2.86) или (2.87) позволяет определить совокупность неизвестных функций $B(x_2)$ или $A(x_1)$, а также неизвестные параметры β или α . Начальные условия для системы обыкновенных дифференциальных уравнений (2.88) или (2.89) определяют из граничных условий (2.17)–(2.19), (2.24)–(2.29). Размерность системы (2.88) или (2.89) задается выбором максимального значения целочисленного аргумента k_1 или k_2 таким образом, чтобы количество уравнений соответствовало количеству неизвестных функций и параметров.

Таким образом, метод баланса дифференциальных спектров сводит краевую задачу для уравнений в частных производных к более простой задаче интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений (2.86) или (2.89), которая, в свою очередь, может быть решена одномерными дифференциальными преобразованиями. Это является важным аспектом для достижения поставленных в диссертации целей.

Рассмотрим в области $0 < x < 1$, $t > 0$ моделирования колебательных процессов, описываемых волновым уравнением вида:

$$\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} + A \cdot e^{-t} \cdot \sin \frac{\pi}{l} x, \quad (2.90)$$

с начальными и граничными условиями

$$\begin{aligned} u(x, 0) = 0, \quad \frac{\partial u(x, 0)}{\partial t} = 0, \\ u(0, t) = u(l, t) = 0, \end{aligned} \quad (2.91)$$

где A , a , l – заданные дополнительные константы.

Введем обозначения: $x = x_1$, $t = x_2$ и приведем краевую задачу (2.90), (2.91) к уравнению:

$$\frac{\partial^2 u(x_1, x_2)}{\partial x_2^2} = a^2 \frac{\partial^2 u(x_1, x_2)}{\partial x_1^2} + A \cdot e^{-x_2} \cdot \sin \frac{\pi}{l} x_1, \quad (2.92)$$

с граничными условиями:

$$u(x_1, 0) = 0, \quad \frac{\partial u(x_1, 0)}{\partial x_2} = 0, \quad (2.93)$$

Первый этап выбора аналитического описания физического процесса реализуем на основе приближенного решения краевой задачи (2.92)–(2.93) дифференциальными преобразованиями (2.82)–(2.83). Переведем уравнения (2.92) дифференциальными преобразованиями (2.82) в область изображений и представим его в виде

$$U(x_1 k_2 + 2) = \frac{H_2^2}{(k_2 + 1)(k_2 + 2)} \left[a^2 \frac{\partial^2 u(x_1, k_2)}{\partial x_1^2} + A \cdot \frac{(-H_2)^{k_2}}{k_2!} \cdot \sin \frac{\pi}{l} x_1 \right]. \quad (2.94)$$

На основе граничных условий (2.93) находим начальные дискреты дифференциального спектра $U(x_1, k_2)$:

$$U(x_1, 0) = 0; U(x_1, 1) = H_2 \left[\frac{\partial u(x_1, x_2)}{\partial x_2} \right]_{x_2=0} = 0. \quad (2.95)$$

Придавая целочисленному аргументу k_2 значения $0, 1, 2, \dots$ по рекуррентному выражению (2.94) и начальным дискретам (2.95) определим другие дискреты дифференциального спектра $U(x_1, k_2)$:

$$U(x_1, 2) = \frac{H_2^2}{2} A \cdot \sin \frac{\pi}{l} x_1, U(x_1, 3) = -\frac{H_2^2}{6} A \cdot \sin \frac{\pi}{l} x_1, \dots \quad (2.96)$$

Обратным преобразованием (2.83) дифференциального спектра (2.95), (2.96) восстанавливаем аналитическое описание физического процесса в виде:

$$U(x_1, x_2) = \sum_{k_2=0}^{\infty} \left(\frac{x_2}{k_2} \right)^{k_2} \cdot U(x_1, k_2) = A \left(\frac{x_2^2}{2} - \frac{x_2^3}{6} + \dots \right) \sin \frac{\pi}{l} x_1 \quad (2.97)$$

Решение (2.97) удовлетворяет уравнению (2.92) и граничным условиям (2.93), (2.94). На основе (2.97) аналитическое описание физического процесса будем искать в виде:

$$U(x_1, x_2) = A \cdot f(x_2) \cdot \sin \frac{\pi}{l} x_1, \quad (2.98)$$

На втором этапе с помощью дифференциальных преобразований (2.80) переведем аналитическое описание физического процесса (2.98) в область изображений

$$U(x_1, k_2) = \frac{A \cdot f(x_2)}{k_1} \cdot \left(\frac{\pi}{l} \cdot H_1 \right)^{k_1} \cdot \sin \frac{\pi}{2} k_1, \quad (2.99)$$

Третий этап метода реализуем на основе дифференциального преобразования (2.80) физического процесса (2.90) и представление его в области изображений в виде (2.22):

$$U(k_1 + 2, x_2) = \frac{H_2^2}{a^2 (k_2 + 1)(k_2 + 2)} \left(\frac{\partial^2 u(k_1, x_2)}{\partial x_2^2} \cdot A \cdot \frac{e^{-x_2}}{k_1!} \cdot \left(\frac{\pi}{l} H_1 \right)^{k_1} \cdot \sin \frac{\pi}{2} k_1 \right). \quad (2.100)$$

На четвертом этапе метода по выражениям (2.99) и (2.100) определяются две формы дискрет дифференциального спектра $U(k_1, x_2)$.

Сначала, предоставляя целочисленному аргументу k_1 значения $0, 1, 2, 3, \dots$, по выражению (2.99) находим дифференциальный спектр аналитического описания (2.98) физического процесса:

$$\begin{aligned} U(0, x_2) &= 0; U(1, x_2) = \frac{\pi}{l} H_1 A \cdot f(x_2), \\ U(2, x_2) &= 0; U(3, x_2) = \frac{A}{6} \left(\frac{\pi}{l} H_1 \right)^3 f(x_2). \end{aligned} \quad (2.101)$$

Потом, используя начальные дискреты дифференциального спектра (2.101)

$$U(0, x_2) = 0; U(1, x_2) = \frac{\pi}{l} H_1 A \cdot f(x_2),$$

по рекуррентным выражением (2.100) при $k_1 = 0, 1, 2, \dots$ находим дифференциальный спектр математической модели (2.92) физического процесса:

$$\begin{aligned} U(0, x_2) &= 0; U(1, x_2) = \frac{\pi}{l} H_1 A \cdot f(x_2), \\ U(2, x_2) &= 0, \\ U(3, x_2) &= -\frac{\pi}{l} \cdot \frac{A \cdot H_1^3}{6a^2} \cdot \left[\frac{d^2 f(x_2)}{dx_2^2} - e^{-x_2} \right]. \end{aligned} \quad (2.102)$$

На заключительном этапе приравниваем дискретизации при одинаковых значениях целочисленного аргумента дифференциального спектра (2.101) аналитического описания (2.98) физического процесса и дифференциального спектра (2.102) математической модели (2.92) физического процесса. Баланс дифференциальных спектров (2.101) и (2.102) для рассматриваемого примера дает выражение (2.88) в виде обыкновенного дифференциального уравнения:

$$U(3, x_2) = \frac{1}{a^2} \cdot \left[\frac{d^2 f(x_2)}{dx_2^2} - e^{-x_2} \right] = -\left(\frac{\pi}{l} \right)^2 \cdot f(x_2). \quad (2.103)$$

Уравнение (2.103) приведем к виду:

$$\frac{d^2 f(x_2)}{dx_2^2} + \left(\frac{a\pi}{l} \right)^2 f(x_2) = e^{-x_2}. \quad (2.104)$$

Начальные условия для обыкновенного дифференциального уравнения (2.104) определяются на основе граничных условий (2.93) и аналитического описания (2.98) физического процесса:

$$f(0) = 0, \frac{df(0)}{dx_2} = 0. \quad (2.105)$$

Решение обычного линейного дифференциального уравнения (2.104) с начальными условиями (2.105) имеет вид:

$$f(x_2) = \frac{1}{1 + \left(\frac{a\pi}{l}\right)^2} \cdot \left[e^{-x_2} - \cos \frac{a\pi}{l} x_2 + \frac{l}{a\pi} \sin \frac{a\pi}{l} x_2 \right]. \quad (2.106)$$

Подстановка (2.106) в выражение (2.98) дает аналитическое описание физического процесса, который точно удовлетворяет волновому уравнению (2.92) и граничным условиям (2.93):

$$u(x_1, x_2) = \frac{1}{1 + \left(\frac{a\pi}{l}\right)^2} \cdot \left[e^{-x_2} - \cos \frac{a\pi}{l} x_2 + \frac{l}{a\pi} \sin \frac{a\pi}{l} x_2 \right] \cdot \sin \frac{\pi}{l} x_1. \quad (2.107)$$

В данном примере метод баланса дифференциальных спектров позволяет по приближенному описанию (2.97) физического процесса восстановить его точное аналитическое описание (2.107) в области $0 < x_1 < 1, x_2 > 0$.

Таким образом, усовершенствование метода баланса дифференциальных спектров сводит краевую задачу для уравнений с частными производными к более простой задаче интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений и этим снижает объем численных операций на ПЭВМ. Основываясь на точном операционном преобразовании это дает, в общем случае, приближенное описание (2.85) физического процесса или поля, который может быть восстановлен до его точной аналитической модели.

Такая возможность реализуется следующим образом. Сначала по одному рекуррентному выражению (2.88) или (2.89), используя в качестве исходных данных задачи граничные условия, рассчитывают один дифференциальный спектр, например $U(k_1, x_2)$. Обращенными дифференциальными

преобразованиями (2.81), (2.83) восстанавливается структура аналитического описания физического процесса или поля $f_1[A(x_1), x_2, \alpha]$, которая содержит неизвестную совокупность функций $A(x_1)$ и параметров α . Эти неизвестные функции $A(x_1)$ и параметры α находим методом баланса дифференциальных спектров (2.85)–(2.89).

2.3. Моделирование процессов выявления опасных сигналов в комплексах ТЗИ

Основная задача применения комплексов ТЗИ, как известно, – извлечение полезной информации из сигнала с учетом шума. Сигналом может быть при этом не только определенный материальный носитель информации, но и любой физический процесс, параметры которого изменяются в соответствии с передаваемым сообщением. Для решения задачи необходимо этот сигнал принять, распознать, установить его адекватность определенному классу и степень опасности для объекта и его информационной системы (рис. 2.4).

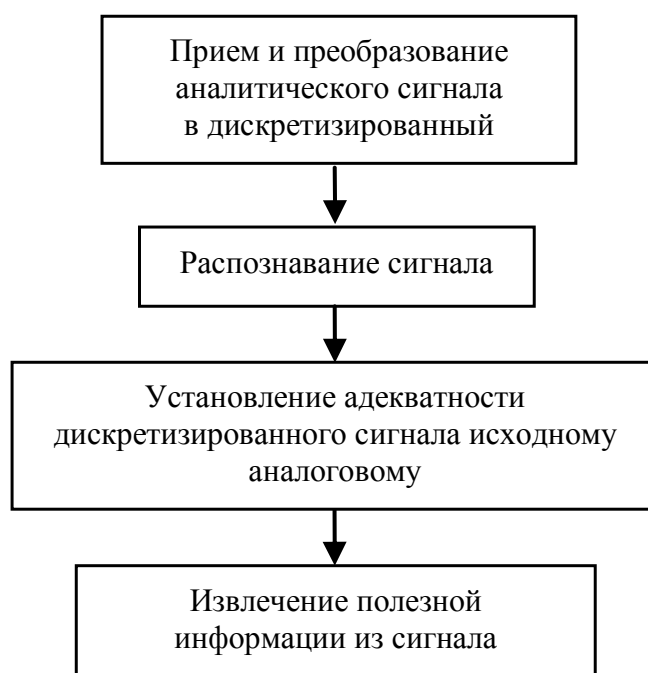


Рис. 2.4. Моделирование процесса выявления опасных сигналов комплексами ТЗИ

Большинство сигналов имеют аналоговую природу, поэтому обрабатывать такие сигналы в цифровой системе невозможно, так как для их точного представления требуются числа бесконечной разрядности. Поэтому

необходимо преобразовывать аналоговый сигнал на временном интервале в последовательность чисел заданной разрядности, взятых в дискретные моменты t_i временного интервала. Промежутки времени между последовательными значениями сигнала $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ называются *интервалом дискретизации*. Значения сигнала $x(t)$ в моменты измерения $x_i = x(t_i)$ называются *отсчетами*.

Выражение

$$X = \{x_i\}, i = 1, 2, \dots \quad (2.108)$$

называют скалярной моделью сигнала. Она соответствует приему сигнала одним приемником от одного источника. Обобщением скалярной модели сигнала являются векторные модели сигналов, представляющие собой упорядоченные наборы отдельных скалярных функций с определенной взаимосвязью компонентов вектора друг с другом:

$$X(t) = [X_1(t), \dots, X_j(t), \dots, X_p(t)], j = 1, \dots, p. \quad (2.109)$$

На практике векторная модель соответствует, в частности, одновременному приему сигнала несколькими приемниками с последующей совместной обработкой.

Важной задачей стоит вопрос приема информационных сигналов, когда одновременно наблюдается несколько случайных процессов, поступающих от различных источников. Некоторые процессы имеют векторный характер, модель таких процессов имеет вид:

$$\vec{X}(t) = [X_1^i(t), \dots, X_j^i(t), \dots, X_p^i(t)]^T, i = \overline{1, M}, j = 1, \dots, p, \quad (2.110)$$

$$|t| \leq T_c / 2.$$

Для распознавания принятого сигнала используется множество всех возможных сигналов, называемых генеральной совокупностью. Выборка – конечный набор сигналов, выбранных некоторым способом из этой совокупности. Распознаются объекты выборки по их принадлежности к определенным классам. Результатом распознавания каждого объекта является распределение или список всех классов распознавания в порядке убывания степени сходства распознаваемого объекта с ними.

В работе комплексов ТЗИ чаще всего используются такие методы распознавания, заимствованные из классической теории статистических решений, в которой объекты распознавания рассматриваются как реализация многомерной случайной величины, распределенной в пространстве признаков по какому-либо закону:

- метод сравнения с прототипом для задач небольшой размерности пространства признаков;

- методы, основанные на оценках плотностей распределения значений признаков (или сходства и различия объектов), используются в задачах с известным распределением (как правило, нормальным) и набором большой статистики [46, 66];

- методы, основанные на предположениях о классе решающих функций, в задачах, если классы хорошо разделяемы и система признаков ортонормированна.

Задача распознавания гауссовых информационных (векторных) сигналов с неизвестными параметрами законов распределений решается методами теории распознавания образов. Сначала векторный сигнал представляется числовым вектором в координатной области, затем вводится адаптивное решающее правило. При этом основное внимание уделяется координатному представлению векторного сигнала и сравнению систем распознавания, подстроенных на основе обычного адаптивного подхода и методов теории распознавания образов.

Пусть распознаванию подлежат M p -мерных векторных случайных сигналов $\vec{X}^i(t) = [X_1^i(t), \dots, X_j^i(t), \dots, X_p^i(t)]^T$, $i = \overline{1, M}$, $j = 1, \dots, p$, наблюдаемых в интервале $|t| \leq T_c/2$. Они появляются с вероятностью P_i , причем $\sum_{i=1}^M P_i = 1$.

Эта задача обычно решается на основе адаптивного байесова подхода, который состоит в выборе наилучшего алгоритма обработки данных в условиях априорной неопределенности, исходя из минимума ожидаемых потерь. Адаптивный метод решения задачи приводит к системе распознавания

сигналов, которая при большой их размерности труднореализуема, поэтому возникает дополнительная задача уменьшения размерности сигнала.

Одним из эффективных методов уменьшения размерности сигналов является разложение Карунена–Лоэва для векторных случайных процессов [52,53]. Его можно построить непосредственно для совокупности векторных случайных процессов $\overline{X}_i(t)$, $i = \overline{1, M}$. Однако возможности нахождения в явном виде базисных функций Карунена–Лоэва при непрерывном множестве t ограничены одним классом процессов (стационарных с дробнорациональным энергетическим спектром). Предварительная их дискретизация позволяет обойти это затруднение.

На практике рационально применять двухэтапную процедуру построения базиса Карунена–Лоэва, дискретизировав сначала сигналы и получив их разложение Карунена–Лоэва [52, 53]. На практике в соответствующих условиях компоненты векторного процесса обычно дискретизируются по Котельникову: если аналоговый сигнал имеет конечный спектр, то он может быть восстановлен однозначно и без потерь по своим отсчетам, взятым с частотой, строго большей удвоенной максимальной частоты реального сигнала. Но реальные сигналы (например, звук на цифровом носителе) конечны во времени и имеют разрывы во временной характеристике, значит, любой аналоговый сигнал может быть восстановлен с какой угодно точностью, если частота сигнала будет меньше половины частоты дискретизации.

Рассмотрим особенности этих этапов для векторных сигналов. Пусть $\vec{X}^i(t) = [X_1^i(t), \dots, X_j^i(t), \dots, X_p^i(t)]^T$ – векторный случайный процесс. Разложим $\vec{X}^i(t)^p$ в ряд Фурье. В качестве координатных выберем скалярные функции. Тогда, разлагая векторную функцию $\vec{X}^i(t)$ в ряд по ортонормированному базису $\{\varphi_k(t)\}$ и ограничиваясь конечным числом L членов разложения, получим:

$$\vec{X}_L^i(t) = \sum_{k=1}^L \vec{c}_k^i \varphi_k(t), \quad (2.111)$$

где

$$\vec{C}_k^i = \int_{-T_c/2}^{T_c/2} \vec{X}^i(t) \varphi_k(t) dt, \quad \vec{C}_k^i = (\epsilon_{k_1}^i, \dots, \epsilon_{k_j}^i, \dots, \epsilon_{k_p}^i)^T$$

При этом процессе $\vec{X}^i(t)$ представляется гипервектором

$$\vec{C}^i = (\vec{C}_{1,\dots}^{iT}, \vec{C}_{k,\dots}^{iT}, \vec{C}_{L,\dots}^{iT})^T. \quad (2.112)$$

Переобозначив координаты \vec{C}^i , выражение (2.112) можно рассматривать как обычный вектор размерности pL . Гипервектор \vec{C}^i дает численное представление векторного сигнала $\vec{X}^i(t)$ относительно выбранного базиса. Вид базисных функций определяется требованиями реализации, а их число необходимой точностью аппроксимации.

Для построения Карунена–Лоэва введем пространство гипервекторов \vec{C} со скалярным произведением

$$(\vec{C}^1, \vec{C}^2) = \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^L C_{kj}^1 C_{kj}^2.$$

Представим гипервектор \vec{C}^i в виде ряда по ортонормированному базису из гипервекторов $\{\vec{\Psi}^s\}$:

$$\vec{C}^i = \sum_{s=1}^{pL} \alpha_s^i \vec{\Psi}^s, \quad (2.113)$$

где

$$\alpha_s^i = (\vec{C}^i, \vec{\Psi}^s) = \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^L C_{kj}^i \Psi_{kj}^s;$$

$$(\vec{\Psi}^s, \vec{\Psi}^n) = \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^L \Psi_{kj}^s \Psi_{kj}^n = \delta_{sn};$$

δ_{sn} – символ Кронекера; $\delta_{sn} = \begin{cases} 1, s = n \\ 0, s \neq n. \end{cases}$

В найденном базисе Карунена–Лоэва гипервектор (2.112) может быть представлен обычным вектором

$$\vec{\alpha}^i = E_N^T \vec{S}_N^i, \quad (2.114)$$

где E_N – матрица из N столбцов векторов \vec{e}^s ;

$$E_N = (e^1, \dots, e^N);$$

$$S^i = (S_1^i, \dots, S_n^i, \dots, S_{pL}^i)^T \vec{\alpha}^i = E_N^T \vec{S}_N^i.$$

При использовании этого представления относительная среднеквадратичная точность аппроксимации гипервектора \vec{C}^i гипервектором \vec{C}_N^i в среднем по M сигналам составляет $\delta^2 = \sum_{s=1}^N \lambda_s / \sum_{s=1}^{pL} \lambda_s$. В соответствии с принятой в теории распознавания образов терминологией описанная процедура может быть названа сжатием описания сигналов, а найденные базисные гипервекторы – общими признаками Карунена–Лоэва.

Операции дискретизации и сжатия описания сигналов можно трактовать следующим образом. Исследуемый сигнал $\vec{X}^i(t)$ векторный, заданный на конечном непрерывном интервале. При дискретизации в соответствии с выражением (2.112) этот сигнал описывается гипервектором \vec{C}^i . Если раньше компоненты сигнала были функциями непрерывного времени $X_S^M(t)$, то сейчас это векторы \vec{C}_K^i . Рассматривая последние функции, заданные на конечном дискретном интервале, гипервектор \vec{C}^i можно трактовать как векторный сигнал, заданный на конечном дискретном интервале. Разлагая полученный векторный сигнал в ряд Фурье по базису той же структуры, что и сам сигнал, можно найти описание сигнала совокупностью коэффициентов Фурье – числовым вектором. Областью описания сигналов в этом случае является координатная область. Для скалярных детерминированных сигналов это спектральная область – пространство совокупностей коэффициентов Фурье разложения сигналов в ряд Фурье.

При дискретизации векторного сигнала он заменяется гипервектором. Уменьшение размерности гипервекторов рациональнее осуществлять на основе разложения Карунена–Лоэва, нахождение которого можно свести к стандартной процедуре диагонализации некоторой матрицы [49].

Частичные решения задач, связанных с нахождением сигналов по известному модулю или квадрату модуля преобразования Фурье этого сигнала, известны в разных областях техники [45]. Однако не найдены общие условия, при которых возможно точное решение задачи синтеза сигнала по модулю или аргументу комплексного спектра на основе интегральных преобразований.

Анализ свойств преобразования Фурье позволяет сформулировать условия, когда эта задача решается с достаточной для прикладных задач точностью.

Существует важная для многих практических приложений связь между функциями, равными нулю по полуоси $(-\infty, 0)$ и асимптотическими функциями, интегрируемыми в полуплоскости. Для установления этой связи используются следующие теоремы [45].

Теорема 1. Для того, чтобы комплексная функция $f(\omega) \in L_2(-\infty, \infty)$ была пределом при $z \rightarrow \infty$ аналитической в верхней полуплоскости функции $f(z)$, такой, что

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(\omega) + j\eta|^2 d\omega < K, \quad (2.115)$$

необходимо и достаточно выполнения любого из двух условий:

$$f(\omega) = g_1(\omega) + jg_2(\omega), \quad (2.116)$$

где g_1 и g_2 – сопряжения по Гильберту функции класса L_2 .

Преобразование Фурье

$$\tilde{f}(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(\omega) e^{-j\omega x} d\omega = 0, \text{ при } x < 0. \quad (2.117)$$

Условие (2.116) позволяет для некоторого класса аналитических функций связать действительную и мнимую части $f(\omega)$.

Теорема 2. Преобразование Фурье от ограниченной функции обращается в нуль на интервале $(-\infty, \infty)$ тогда и только тогда, когда $f(\omega)$ есть предел на действительной оси функции $f(z)$, $z = \omega + j\eta$, аналитической в верхней полуплоскости и удовлетворяющей неравенству

$$\sup |f(\omega + j\eta)| \leq e^{-\alpha\eta} \sup |f(\omega)|, \eta \geq 0. \quad (2.118)$$

Если преобразование Фурье от ограниченной функции \tilde{f} обращается в нуль на интервале (β, ∞) , то аналогичная теорема утверждает, что $f(\omega)$ является пределом на действительной оси функции $f(z)$, $z = \omega + j\eta$, аналитической в нижней полуплоскости, $\eta \leq 0$.

Теорема 3. Если $f(z)$ – функция, аналитическая в верхней полуплоскости так, что

$$\sup |f(\omega)| < \infty \text{ для } \eta \geq 0 \quad (2.119)$$

и имеет место асимптотическая оценка

$$\sup |f(\omega + j\eta)| = O\{e^{-\alpha\eta}\}, \eta \rightarrow \infty, \quad (2.120)$$

то справедливо неравенство

$$\sup |f(\omega + j\eta)| < e^{-\alpha\eta} \sup |f(\omega)|, \eta \geq 0. \quad (2.121)$$

Во многих приложениях, а особенно при выявлении и обработке опасных сигналов комплексами ТЗИ с защищенных объектов, нужно связать модуль и аргумент комплексной функции $\tilde{f}(\omega)$, которая является преобразованием Фурье некоторой действительной функции $\tilde{f}(x)$.

На практике всегда используются конечные интервалы для числового представления функции и ее преобразования Фурье. С учетом предположений относительно поведения $F(\omega)$, когда $\omega \rightarrow \infty$, функция $F(\omega)$ удовлетворяет условиям теоремы, а, следовательно, ее преобразование Фурье обращается в нуль на интервале $(-\infty, 0)$. Этот вывод важен для практической реализации алгоритма синтеза сигнала, поскольку позволяет свести вычисление преобразования Гильберта к операциям преобразования Фурье и фильтрации, определенной соответствующим образом.

Функцию $f(x)$ можно восстановить по заданному модулю преобразования Фурье $|f(\omega)|$, если выполнены условия теорем 1, 2. Наиболее удобно сформулировать их как частные ограничения, касающиеся функции $f(x)$ и ее преобразования Фурье $\tilde{f}(\omega)$. Если $f(x) \in L_2$, то $f(x)$ восстанавливается однозначно, когда

$$|\tilde{f}(\omega)| \neq 0 \text{ при } |\omega| < \infty; \quad (2.122)$$

$$\max |f(x)| = |f(0)|; f(x) = 0 \text{ при } x < 0 \quad (2.123)$$

Большинство встречающихся сигналов и описывающих их функций не удовлетворяет условиям (2.122) и (2.123). Однако практически любые сигналы с конечной энергией можно моделировать так, чтобы полученный новый сигнал с точностью до сдвига по оси x описывался функцией, удовлетворяющей условиям (2.122) и (2.123), и имелась возможность обратного перехода от модифицированной функции к исходной. Однако подобные правила модификации применимы и к спектрам опасных сигналов. Аналогично условиям (2.122), (2.123) можно получить требования к структуре модифицированных спектров:

$$|f(x)| \neq 0, \max |f(\omega)| = |f(\omega_0)|, \omega_0 \geq 0; \quad (2.124)$$

$$f(\omega) = 0 \text{ при } \omega < \omega_0.$$

Один из возможных путей модификации состоит в суммировании исходной функции $f(x)$ с некоторой вспомогательной функцией $\psi(x)$, выбранной так, чтобы модифицированная функция $f_M(x) = f(x) + \psi(x)$ удовлетворяла условиям (2.122) и (2.123). Такое преобразование удобно в случае финитных функций, когда $f(x) = 0$ при $x < a, x > b (b > a)$.

Здесь возможны следующие правила модификации. Вспомогательную функцию $\psi(x)$ можно выбрать так, что $\psi(x) = 0$ при $x < c$, где $c \leq a$, а ее преобразование Фурье $\tilde{\psi}(\omega) \neq 0$ и $|\tilde{\psi}(\omega)| > |f(\omega)|$. При этих условиях модифицированная функция f_M восстанавливается по модулю $|f(\omega) + \tilde{\psi}(\omega)|$ с точностью до сдвига по оси x и $\max |f_M(x)| = |f_M(0)|$.

Выполнить требование $\tilde{f}_M(\omega) \neq 0$ можно и в том случае, когда

$$f_M(x) = 0 \text{ при } x > a, a \geq b, \max |f_M(x)| = |f_M(a)|.$$

Теперь $f_M(\omega)$ – предел на действительной оси функции $f_M(z)$, аналитической в нижней полуплоскости.

Определяем условия, которым должны удовлетворять функция $f(x)$ и ее преобразование Фурье $f(\omega)$, чтобы $f(\omega)$ и $f(x)$ можно было определить по заданному модулю $|f(\omega)|$.

Пусть $f(x)$ – интегрируемая в квадрате односторонняя функция, т.е. $f(x)=0$ при $x<0$. Тогда ее преобразование Фурье $\tilde{f}(\omega) = U(\omega) + jV(\omega)$ – предел на действительной оси аналитической в верхней полуплоскости функции $\tilde{f}(z) = U(z) + jV(z)$.

Другой возможный путь модификации заключается в весовой обработке финитной функции $f(x)$, если она принимает значение отличное от нуля по крайней мере на одной из границ интервала $[a, b]$, ограничена внутри и равна нулю вне этого интервала. Тогда можно найти такую функцию $P(x)$, чтобы произведение $P(x)f(x)$ удовлетворяло условиям (2.122) и (2.123). Очевидно, одна и та же функция $f(x)$ может быть модифицирована различными путями. Двум упомянутым правилам модификации – суммированию с дополнительным известным точно сигналом и весовой обработке финитного сигнала соответствуют эквивалентные операции над их преобразованиями Фурье – суммирование и свертка спектров.

Информацию, достаточную для восстановления модифицированной функции $f_M(x)$, содержит не только модуль спектра $|\tilde{f}_M(\omega)|$, но и функция $A(\omega) = R|\tilde{f}_M(\omega)|$, где R – любой невырожденный оператор, т.е. справедливо обратное преобразование $|\tilde{f}_M(\omega)| = R^{-1}[A(\omega)]$. Если в качестве первичных данных о модифицированном сигнале используется аргумент комплексного спектра, то любая функция $B(\omega) = R[\arg \tilde{f}(\omega)]$ сохраняет признаки сигнала, достаточные для его восстановления с точностью до постоянного множителя. Таким образом, модифицированный сигнал может быть интегрирован по модулю, аргументу спектра или по какой-либо из указанных выше функций при известном R . Этот путь синтеза опирается на необходимые и достаточные условия, при которых справедливы используемые интегральные преобразования. Наряду с описанным алгоритмом возможны и другие методы восстановления некоторых модифицированных сигналов.

Таким образом, существует подкласс функций, которые могут быть с достаточной точностью восстановлены по известному модулю преобразования

Фурье с помощью линейных интегральных преобразований. Если задан аргумент комплексного спектра, то функции из этого подкласса восстанавливаются с точностью до последнего множителя. Признаком принадлежности функции $f(x)$ к указанному подклассу является выполнение условий (2.122) и (2.123), сформулированных для $f(x)$ и ее преобразования Фурье $f(\omega)$. Эти условия характеризуют поведение $f(x)$ и $f(\omega)$ как функций действительных аргументов x, ω и поэтому удобны в инженерных приложениях, особенно в радиомониторинге комплексами ТЗИ [51].

Пользуясь приведенными признаками можно финитные и односторонние функции с конечной энергией модифицировать, т.е. перевести в изучаемый подкласс с помощью различных, в том числе очень простых преобразований. Выбор конкретного правила модификации зависит от характера решаемой задачи и особенности преобразования сигналов. Модификация сигналов в ряде случаев расширяет возможности их анализа и обработки.

Выводы ко второму разделу

Многие методы моделирования физических процессов и полей, наиболее часто используемые на практике, не обеспечивают нужной информативности при рассмотрении процессов, протекающих при функционировании комплексов ТЗИ. На основании исследований, проведенных в этом разделе, получены следующие результаты:

– для решения задач при выявлении и анализе опасных сигналов комплексами ТЗИ впервые предложен существующий метод моделирования физических процессов на основе одномерных дифференциальных преобразований нелинейных краевых задач с линейными граничными условиями, который не содержит методологической погрешности отображения математической модели физического процесса в область изображений;

– для решения задач при выявлении и анализе опасных сигналов комплексами ТЗИ с нелинейными краевыми условиями впервые предложен существующий метод дифференциальных преобразований нелинейных

граничных условий, а также предложено связать модуль и аргумент используемой комплексной функции, которая является преобразованием Фурье некоторой действительной функции, для анализа опасных сигналов в пределах допустимых погрешностей за заданное время;

– для максимально точного описания физического процесса (или поля) при выявлении опасного сигнала комплексами ТЗИ впервые предложен существующий метод баланса дифференциальных спектров, который сводит краевую задачу для уравнений в частных производных к задаче интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений.

– для решения основной задачи при выявлении и анализе опасных сигналов комплексами ТЗИ – извлечения полезной информации из сигнала с учетом шума выполнено моделирование процесса поиска и обнаружения сигнала, приема, распознавания, установления его адекватности определенному классу сигналов для определения степени опасности для объекта и его информационной системы.

РАЗДЕЛ 3

МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ОПАСНЫХ СИГНАЛОВ КОМПЛЕКСАМИ ТЗИ

Для гарантированного обнаружения и идентификации опасных сигналов в конкретных ситуациях требуется, как известно, четкое представление о моделях опасного сигнала, методах поиска источников распространения таких сигналов и обработки их основных показателей, а также методах выявления возможных каналов утечки информации. На решение именно этих проблемных аспектов направлены результаты, полученные в ходе проведенного диссертационного исследования.

3.1. Метод оценки местоположения источника опасного сигнала

Известно, что в случае использования радиоэлектронных сигналов (РЭС) с моночастотным или динамическим частотно-временным излучением с перестройкой частоты, оценка вероятности обнаружения источника опасного сигнала (ИОС) при ширине диапазона излучения до 10 МГц и длительности 3-5 сек, разносе частот между каналами до 25 кГц и скорости ИОС до 300 скачков в секунду соответствует, как правило, типовому среднему значению. При этом, например, ширина диапазона излучения до 300 МГц соответствует задаче, когда панорамный анализ осуществляется только в диапазонах связных РЭС. При ширине рабочего частотного диапазона 900, 2000 и 3000 МГц полный анализ структуры опасного сигнала не производится. *Сигнал считается обнаруженным, если определена хотя бы одна из его характеристик*, после чего может быть начат следующий этап – уточнение частотных границ сигнала с ИОС и пространственной селекции порождающего данный сигнал источника.

Результаты исследований, проведенных для вероятности обнаружения $P(t_{\text{обн}} \leq T_c)$ моночастотного РЭС приведены на рис. 3.1 и 3.2, а для случая обнаружения РЭС с перестройкой частоты – на рис. 3.3 и 3.4. При этом наиболее удобной совокупностью исходных данных применительно к решаемой задаче для обнаружения опасного сигнала в контролируемой зоне

является набор отсчетов $X_{Ro}(n)$ усредненного энергетического спектра, рассчитанный для опорного канала и аналогичный набор отсчетов $X_{Rc}(n)$, рассчитанный для сигнального канала, имеющий вид:

$$X_R(n) = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R |C_{(r)}(n)|^2. \quad (3.1)$$

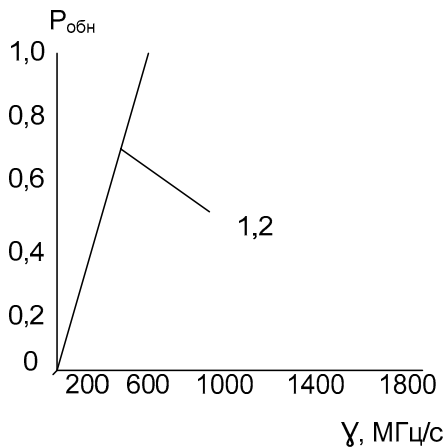


Рис. 3.1. Зависимость вероятности обнаружения многочастотного сигнала от производительности системы за время $T=3$ с в диапазоне поиска $\Delta F = 2000$ МГц при следующих значениях полосы анализа: 1. $\Delta f = 2$ МГц; 2. $\Delta f = 10$ МГц

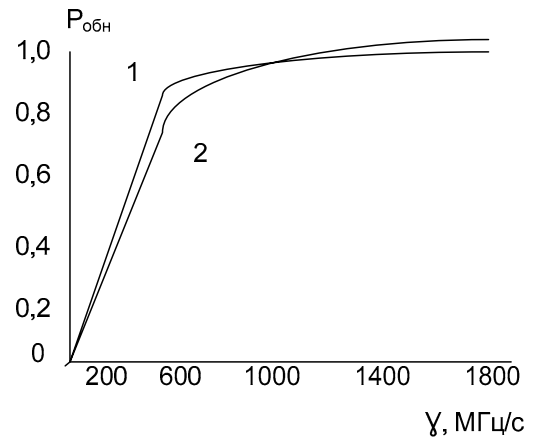


Рис. 3.2. Зависимость вероятности обнаружения сигнала с ППРЧ от производительности системы за время $T=3$ с в диапазоне поиска $\Delta F = 2000$ МГц при следующих значениях полосы анализа: 1. $\Delta f = 2$ МГц; 2. $\Delta f = 10$ МГц

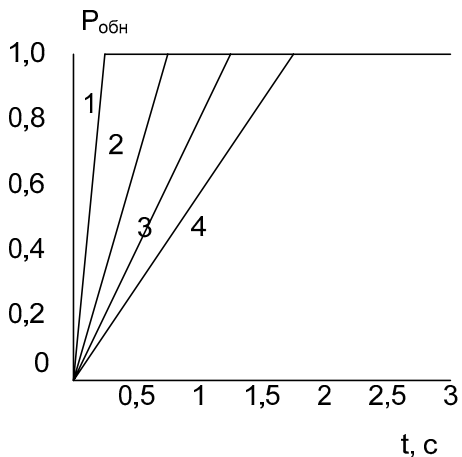


Рис. 3.3. Зависимость вероятности обнаружения многочастотного сигнала от времени при заданной производительности системы ($\gamma=1500$ МГц/с) и полосе анализа $\Delta f = 2$ МГц и диапазонах поиска: 1. $\Delta F = 300$ МГц; 2. $\Delta F = 900$ МГц; 3. $\Delta F = 2000$ МГц; 4. $\Delta F = 3000$ МГц

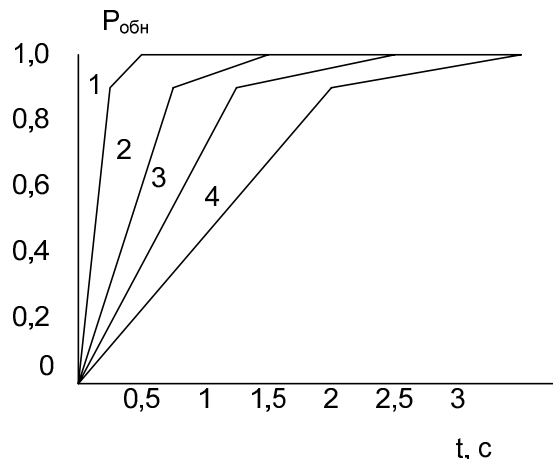


Рис. 3.4. Зависимость вероятности обнаружения сигнала ППРЧ от времени при заданной производительности системы ($\gamma=1500$ МГц/с) и полосе анализа $\Delta f = 2$ МГц и диапазонах поиска: 1. $\Delta F = 300$ МГц; 2. $\Delta F = 900$ МГц; 3. $\Delta F = 2000$ МГц; 4. $\Delta F = 3000$ МГц

С физической точки зрения отсчеты $X_R(n)$ характеризуют распределение по частотам мощности случайного процесса. В соответствии с этим средняя мощность случайного процесса $U_m(t)$, представленного в частотной области совокупностью значений $X_R(n)$ номерами от n_{\min} до n_{\max}

$$P_m = 10 \lg \left[\sum_{n=n_{\min}}^{n_{\max}} X_R(n) \right] + \mu, \text{ дБ}, \quad (3.2)$$

где μ – поправочный коэффициент, определяемый калибровкой системы и аппаратуры используемого канала комплекса ТЗИ.

При двухканальной обработке наблюдаемая интенсивность сигналов, регистрируемых по каждому из каналов, будет различной. Эта разница определяется не только реальным отличием напряженности поля в точке размещения приемных антенн, но и отличием поправочных коэффициентов μ , вызываемым различиями в калибровке и режиме автоматического радиуправления (АРУ) разных каналов. Кроме того, зависимость интенсивности опасного сигнала от взаимного расположения источника опасного сигнала и приемной антенны комплекса ТЗИ является весьма неоднозначной и сложно зависит от многих факторов. Однако в среднем, естественно, близость источника к хотя бы одной из приемных антенн приводит к заметному увеличению мощности соответствующего сигнала по сравнению с сигналом, принимаемым в опорном канале.

При правильном размещении опорной антенны, сигналы от внутренних источников опасного сигнала при прохождении на пути к опорной антенне через железобетонные перекрытия, стены и т.п. претерпевают существенное ослабление. Соответственно прием опорной антенной сигналов от источника опасного сигнала вне объекта осуществляется в лучших условиях. Данные факторы в сочетании с синхронностью двухканального приема обуславливают возможность разделения массива принятых сигналов и соответственно порождающих их внешних и внутренних (внутри контролируемой зоны)

источников. В зависимости от характеристик используемого комплекса ТЗИ возможны два варианта учета отличий в свойствах каналов приема.

Первый (детерминированный) **подход** базируется на отключении АРУ (или оценке его влияния путем соответствующего пересчета значений) и строгой калибровке каждого канала. В подобном случае можно априори зафиксировать поправочные коэффициенты μ_0 и μ_c , необходимые для расчета оценки (3.2) мощности сигнала $U_m(t)$ в каждом канале приема и определить превышение мощности сигнала в сигнальном канале по отношению к опорному каналу:

$$\Delta P_{CO_M} = 10 \lg \left(\frac{\sum_{n=n_{\min}}^{n_{\max}} R_C(n)}{\sum_{n=n_{\min}}^{n_{\max}} R_0(n)} \right) + (\mu_c - \mu_0), \text{ дБ.} \quad (3.3)$$

Второй подход. Если невозможно контролировать текущий режим работы канала, а, следовательно, и текущее значение поправочного коэффициента μ , то соответствующие поправки необходимо корректировать адаптивно. Учитывая равенство или близость собственных коэффициентов шума для разных каналов приемника комплекса ТЗИ, для сравнения величин μ достаточно сопоставить наблюдаемую мощность в сигнальном и опорном каналах. Эта мощность пропорциональна сумме отсчетов энергетического спектра, принадлежащих шумовому подмножеству $S_{\text{шум}}$. При этом для комплексов, осуществляющих упрощенную оценку источника опасного сигнала, интерес представляют сигналы, порождаемые источником внутри зоны контроля. Подобные сигналы имеют большую наблюдаемую мощность в сигнальном канале, работающем через внутреннюю антенну. Повышенная мощность гарантирует более надежное обнаружение, поэтому начинать обработку целесообразно с сигнального канала.

Исходя из изложенного, *метод оценки местоположения источника опасного сигнала* предполагает выполнение следующих взаимосвязанных этапов.

Этап 1. По отсчетам энергетического спектра случайного входного процесса, наблюдаемого в сигнальном канале, рассчитывается оценка интенсивности шума.

Этап 2. В сигнальном и опорном каналах производится обнаружение узкополосных сигналов в полосе частот одновременного анализа.

Этап 3. Для каждого из обнаруженных в сигнальном канале сигналов $U_m(t)$ рассчитывается оценка отличия в наблюдаемой интенсивности ΔP_{com} по правилу (3.3).

Этап 4. Определяется класс источника опасных сигналов ξ_m в соответствии с правилом:

$$\xi_m = \begin{cases} S_{\text{контр}}, & \text{при } \Delta P_{com} > \Delta_{\text{пор}2}, \\ \text{неопределен}, & \text{при } \Delta_{\text{пор}1} < \Delta P_{com} < \Delta_{\text{пор}2}, \\ S_{\text{внеш}}, & \text{при } \Delta P_{com} < \Delta_{\text{пор}1}, \end{cases} \quad (3.4)$$

где $S_{\text{контр}}$ – объединяет источник опасного сигнала, принадлежащего зоне контроля;

$S_{\text{внеш}}$ – удаленные источники радиоизлучений;

$\Delta P_{\text{пор}1}$ и $\Delta P_{\text{пор}2}$ – используемые пороги, которые могут в каждом конкретном случае корректироваться с учетом свойств области контроля и размещения приемных антенн.

Показатели качества предложенной процедуры существенно зависят не только от выбранных порогов, но и от большого количества других различных факторов, поэтому сложно построить какую-то четкую математическую модель, дающую корректные практические показатели эффективности. Кроме того, для увеличения зоны электромагнитной доступности радиомониторинга эфира используют разнесенный двухканальный прием с накоплением. Поступающую на вход двухканального приемника смесь сигналов $U_m(t)$ и шума можно принимать и обрабатывать сразу по двум каналам, поэтому в качестве решающей функции целесообразно использовать по R выборкам усредненный взаимный энергетический спектр $X_{\text{ВЗЭ}}(n)$:

$$X_{\text{ВЗЭ}}(n) = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R C_{C(r)}(n) C_{0(r)}^*(n), \quad (3.5)$$

где $C_{C(r)}(n) = a_{(r)}(n) + jb_{(r)}(n)$ – спектр выборки в сеансе обнаружения с номером r процесса $U_{bx}(t)$ в *сигнальном канале*;

$C_{0(r)}(n) = g_{(r)}(n) + jh_{(r)}(n)$ – спектр выборки, полученной одновременно в данном сеансе в *опорном канале*.

С позиции обнаружения опасных сигналов наибольший интерес имеет не само комплексное значение усредненного взаимного спектра, а его модуль. Действительно, применительно к шумовым отсчетам усреднение слагаемых с хаотично меняющимися фазами дает итог с модулем, близким к нулю. Применительно же к сигнальным компонентам для каждой из R выборок в отдельности, перемножение комплексно-сопряженных значений в (3.5) приводит к взаимной компенсации начальных фаз составляющих. Поэтому накопление в каждом из сеансов выполняется «когерентно», а модуль получаемого результата лишь незначительно (вследствие влияния шумовой компоненты) отличается от $S_{mq}^2/4$, где S_{mq} – амплитуда спектральной составляющей m -го *опасного сигнала*.

От сеанса к сеансу когерентность в каждом из каналов не сохраняется, что является платой за отсутствие полных априорных данных о параметрах обрабатываемого излучения, но между каналами когерентность в каждом из сеансов сохраняется, т.к. на обе антенны поступает один и тот же сигнал.

Таким образом, при накоплении результатов по многим сеансам будем иметь случай разнесенного во времени и пространстве приема с накоплением, причем число ветвей по пространству равно двум, накопление – когерентное, по времени – число накопленных результатов равно числу сеансов, накопление от сеанса к сеансу – некогерентное.

Исходя из этого, для повышения интегральной чувствительности комплекс ТЗИ содержит антенный коммутатор и набор широкодиапазонных антенн, размещенных на объекте. Одна из них используется как «опорная» и размещается на достаточном удалении от объекта. В ходе панорамного анализа

на каждом частотном участке осуществляется внеочередное подключение каждой из антенн к входу комплекса, при этом в полосе одновременного анализа для каждой из антенн снимается спектр с заданной дискретностью, а затем осуществляется сравнение каждой из компонент спектра с пороговым уровнем. Те из компонент, которые превысили порог, сравнивают между собой, а минимальная из них сравнивается с уровнем соответствующей компоненты от «опорной» антенны.

В основу метода положено известное положение электродинамики о дальней и ближней зонах [85]. Компоненты вектора напряженности электрического поля, излучаемого электрическим диполем \vec{P} , в сферических координатах определяются выражением:

$$\begin{cases} E_r = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r^3} - \frac{ik}{r^2} \right) \cos \Theta |\vec{p}| \exp[-i\omega t], \\ E_\Theta = \frac{1}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{r^3} - \frac{ik}{r^2} - \frac{k^2}{r} \right) \sin \Theta |\vec{p}| \exp[-i\omega t], \\ E_\varphi = 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

где r, θ, φ – сферические координаты;

E_r, E_θ, E_φ – компоненты напряженности электрического поля в сферических координатах;

ϵ, μ – электрическая и магнитная проницаемости свободной среды;

ω – круговая частота излучения.

Дипольный момент связан с излучаемой мощностью W соотношением:

$$W = \frac{\omega^4}{12\pi} \mu \sqrt{\epsilon\mu} |\vec{p}|^2. \quad (3.7)$$

На рис. 3.5, 3.6 представлены зависимости максимального значения модуля напряженности электрического поля E_{\max} , порождаемой сравнительно маломощными (100 мкВт и 1 мВт) источником опасного сигнала с частотами 30 и 300 МГц на контролируемом объекте на дальностях R от 1 до 10 м. На тех же рисунках приведены зависимости мощных (100 Вт) ИОС, отстоящих от объекта

на 2 км. Анализ характера изменения кривых показывает, что в ближней (1...8 м) зоне уровень излучения от маломощных источников, как и следовало ожидать, превышает уровень мощных, но удаленных источников.

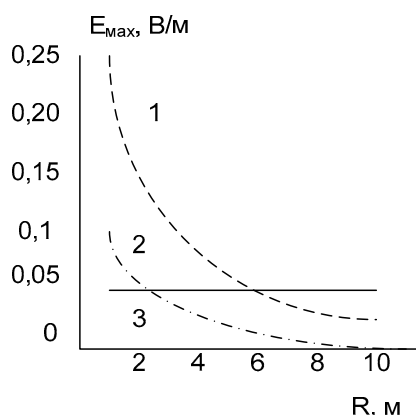


Рис. 3.5. Зависимость E_{\max} от расстояния для ИОС с частотой 300 МГц при значениях мощности 1 мВт (1), 100 мкВт (2), 100 Вт (3) – удаленный на 2 км источник

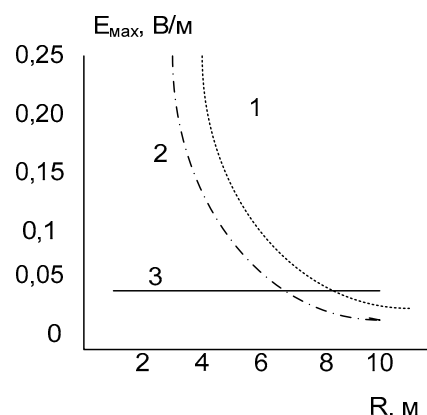


Рис. 3.6. Зависимость E_{\max} от расстояния для ИОС с частотой 30 МГц при значениях мощности 1 мВт (1), 100 мкВт (2), 100 Вт (3) – удаленный на 2 км источник

Для реализации возможности обнаружения маломощных источников в условиях сложной помеховой радиообстановки и повышения интегральной чувствительности комплекса на контролируемом объекте необходимо разместить несколько (от 2-х до 4-х) антенн с квазиизотропными диаграммами направленности. Они устанавливаются с таким расчетом, что при любом размещении источника его расстояние до антенны составит 1...5 м, что соответствует «ближней» зоне приема. Такая обработка обеспечивает реализацию метода «автоматической пространственной селекции», т.е. дает возможность выделить антенну, сигнал с выхода которой имеет наибольший уровень. Этим достигаются возможности, позволяющие:

- отселектировать излучение устройств комплекса ТЗИ на фоне излучений штатных радиосредств;
- скомпенсировать неравномерности диаграммы направленности квазиизотропных антенн в различных пространственных секторах.

Вместе с тем возможность подключения к одному из выходов «опорной» антенны существенно увеличивает вероятность различения внешних и внутренних источников излучений в сложной электромагнитной обстановке, повышает быстрдействие поиска новых сигналов.

3.2. Методы ускоренного анализа опасных сигналов комплексами ТЗИ

Учитывая, что опасные сигналы имеют вероятностную природу, решение задачи повышения эффективности их анализа должно опираться на параллельные методы [67]. При этом, наиболее распространенным методом обработки сложных сигналов является так называемый корреляционный анализ. На основе изменения корреляционной функции $R(\tau)$ можно определить: отрезки статистически независимых функций времени, частотные характеристики случайного сигнала N , решать другие актуальные задачи. Понятно, что при этом вопросам точности и быстродействия корреляционного анализа уделяется основное внимание.

Наиболее полной характеристикой оценки $R_{xy}^*(\tau, T)$, как и любой случайной функции, является ее функция распределения. На практике ограничиваются вычислением простейших числовых характеристик оценки, таких как математическое ожидание, дисперсия, которые зависят не только от $R_{xy}(\tau)$ и длины реализации T_1 , но и от других моментов случайного процесса.

Применение дисперсии в качестве критерия точности оправдано лишь при нормальном или близком к нему распределении оценки, так как только в этом случае по дисперсии можно легко определить точность оценки при заданной надежности. Распределение оценки корреляционной функции $R(\tau)$ случайных процессов $X(t)$ и $Y(t)$ зависит от закона распределения самих процессов, от алгоритма вычисления оценки и меняется с изменением длины реализации T и корреляции сдвига τ . В пределе при $T \rightarrow \infty$ закон распределения оценки $R_{xy}^*(\tau, T)$ вырождается в дельта-функцию. Рассмотрим законы распределения и критерии точности оценки корреляционных функций гауссовских стационарных и стационарно-связанных эргодических случайных процессов, вычисленных по непрерывно-шаговому и выборочному алгоритмам:

$$R_{xy}^*(k\Delta\tau_1 T) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+k\Delta\tau)dt; \quad (3.9)$$

$$R_{xy}^*(k\Delta\tau_1 N) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i\Delta t_B)y(i\Delta t_B+k\Delta\tau);$$

где $\Delta\tau$ – шаг дискретности корреляционного сдвига;

Δt_B – шаг отбора выборочных пар (x_i, y_i) , определенным образом связанный с величинами $\Delta\tau, \Delta t_x, \Delta t_y$; $N = T / \Delta t_B$; $k\Delta\tau = \tau$ [15].

Приближенный закон распределения оценки корреляционной функции можно получить путем построения ряда Эджворта [68]. Если оценка имеет конечные моменты четвертого порядка, то функция распределения оценки и плотность распределения оценки могут быть представлены первыми четырьмя членами расхождения в ряд Эджворта.

Наиболее известный мультипликативный метод определения $R(\tau)$ средствами цифровой техники реализуется путем вычисления ординат в СР по выражению

$$R(\tau) \cong R(k\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \overset{\circ}{x}(i\Delta t) \overset{\circ}{y}(i\Delta t + k\Delta\tau), \quad (3.10)$$

где $\overset{\circ}{x}(i\Delta t), \overset{\circ}{y}(i\Delta t + k\Delta\tau)$ – дискреты анализируемых непрерывных сигналов, $x(t), y(t)$ с нулевыми математическими ожиданиями;

$k = 0, 1, 2, \dots, n-1$; N – количество совпадений дискретов этих сигналов;

$\Delta\tau$ – интервал задержки одного из сигналов относительно другого.

Операция умножения, требуемая при вычислениях по формуле (3.10) наиболее трудоемкая и существенно влияет на быстродействие анализа в целом. Исключить ее можно различными методами. Самый радикальный метод – знаковый (полярный) основан на предварительном имитировании (сильном по амплитуде) анализируемых $x(t)$ и $y(t)$. В результате используют лишь полярности ограниченных сигналов

$$R_{\text{зн}}(\tau) \cong \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{sgn} \overset{\circ}{x}(i\Delta t) \text{sgn} \overset{\circ}{y}(i\Delta t + k\Delta\tau) \quad (3.11)$$

т.е. умножение заменяется подсчетом количества совпадений знаков.

Рассмотрим ускоренный метод определения $R(\tau)$, основанный на использовании адаптивной задержки сигналов, что приводит к замене постоянной величины $\Delta\tau$ переменной. При этом используется известная концепция о высокой информативности экстремумов аналогового процесса [70]. Поскольку амплитудно-временные значения сигналов на участках между экстремумами существенной информации не содержат, при выполнении операций по определению $R(\tau)$ позволительно осуществлять задержку по принципу и значения $\{\tau_i\}$ должны

соответствовать временным значениям $x(t)$ и/или $y(t)$. Корреляционная функция при этом будет представлена неравномерной последовательностью значений ординат $\{R(\tau_i)\}$, вычисленных с той точностью, которую обеспечивает использованный корреляционный метод (если он содержит операцию задержки).

На рис. 3.7 показаны процедуры по реализации метода (на примере вычисления автокорреляционной функции в комплексах ТЗИ). Из сигнала $x(t)$ выделяются экстремумы и фиксируются моменты их появления t_0, t_1, \dots, t_i . Затем полученным величинам $\{t_i\}$ ставится в соответствие $\{\tau_i\}$; $\tau_0 = t_0, \tau_1 = t_1, \dots, \tau_i = t_i$.

и т.д.

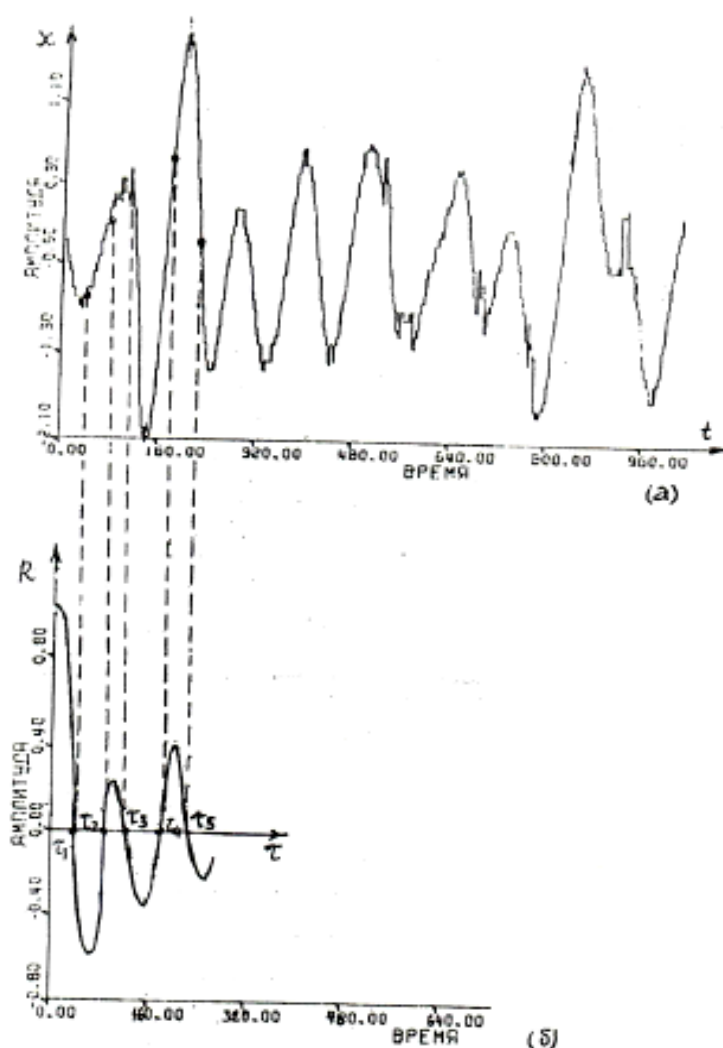


Рис. 3.7. Пример реализации корреляционного метода

Таким образом, значения ординат вычисляются с переменной задержкой определяемой временем появления в $x(t)$ экстремумов. Для получения более точных результатов следует использовать временные значения того сигнала, который содержит более высокие частотные составляющие, либо учитывать

моменты появления экстремумов в обоих сигналах (при определении взаимокорреляционной функции).

Если необходимо иметь непрерывную функцию $R(\tau)$, то над полученными дискретными значениями производится аппроксимация любым из известных способов.

В общем случае целесообразно вслед за вычислениями $R(0)$ определять дополнительно несколько ординат корреляционной функции в окрестности $\tau = 0$. Этим достигается возможность надежного определения $R''(0)$ даже в случае, когда интервалы между начальными экстремумами анализируемого сигнала довольно велики [70].

В случайном (изучаемом) аналоговом сигнале, подвергнутом равномерной дискретизации с шагом

$$\Delta t = \frac{1}{2f_{\max}}, \quad (3.12)$$

где f_{\max} – максимальная частота спектра $x(t)$, а количество экстремумов в несколько раз меньше общего числа дискретов. Следовательно, использование адаптивной задержки при вычислениях $R(\tau)$, например, по выражению (3.10) в несколько раз сокращает время анализа.

Еще большей алгоритмической простотой формирования системы ортогональных функций отличается стохастический базис дискретного аргумента. Этот базис составляет теоретическую основу метода, который по быстрдействию на 2–3 порядка превосходит наиболее быстрые известные спектральные расхождения [37]. Метод обеспечивает анализ $x(t)$, представленного последовательностью его экстремумов и, таким образом, допускает обработку нестационарных процессов, что особенно важно для аффективного функционирования комплексов ТЗИ. Базисная система $\{\varphi_c(t)\}$ функций образуется при выполнении следующих операций:

– из случайного (опасного) сигнала $x(t)$ выделяются экстремумы и, после измерения их амплитудно-временных значений, вычисляются временные интервалы $\{\Delta t_i\}$ и знаки амплитудных превращений $\{\text{sgn } \Delta x_i\}$;

– по значениям $\{\Delta t_i\}$, $\{\text{sgn } \Delta x_i\}$ – формируются последовательности прямоугольных импульсов, каждая из которых и образует $\varphi_c(t)$, при этом длительность каждого i -го импульса определяется значением $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$;

– полярность импульса определяется знаком Δx_i , амплитуда – единичная φ ;

– первая базисная функция $\varphi_1(t)$ формируется из начального массива N экстремумов, последующее – после исключения четких (или нечетких) экстремумов из предыдущего массива и выделения новых экстремумов.

Рис. 3.8 иллюстрирует способ формирования $\{\varphi_c(t)\}$ конкретным примером.

Пусть $x(t)$ показанный на рис. 3.8, б является результатом синтеза 3-х синусных функций (рис. 3.8, а). Получив экстремумы $x(t)$, которые приведены на рис. 3.8, в описанным способом формирования дискретного стохастического базиса, находим $\varphi_1(t)$ (рис. 3.8, г).

На следующем этапе обработки, исключив из начального массива четные экстремумы, получим выборки нового сигнала $x_1(t)$. После нахождения экстремумов $x_1(t)$ формируется $\varphi_2(t)$, затем – повторение аналогичных операций – $\varphi_3(t)$ (рис. 3., д, е).

В общем случае повторение операций продолжается до тех пор, пока исчерпывается массив прореживаемых дискрет.

В комплексах ТЗИ широко используются средства вычислительной техники (СВТ), которые позволяют решать все выше изложенные задачи. Существенное улучшение характеристик СВТ для комплексов ТЗИ позволяет использовать несколько подходов.

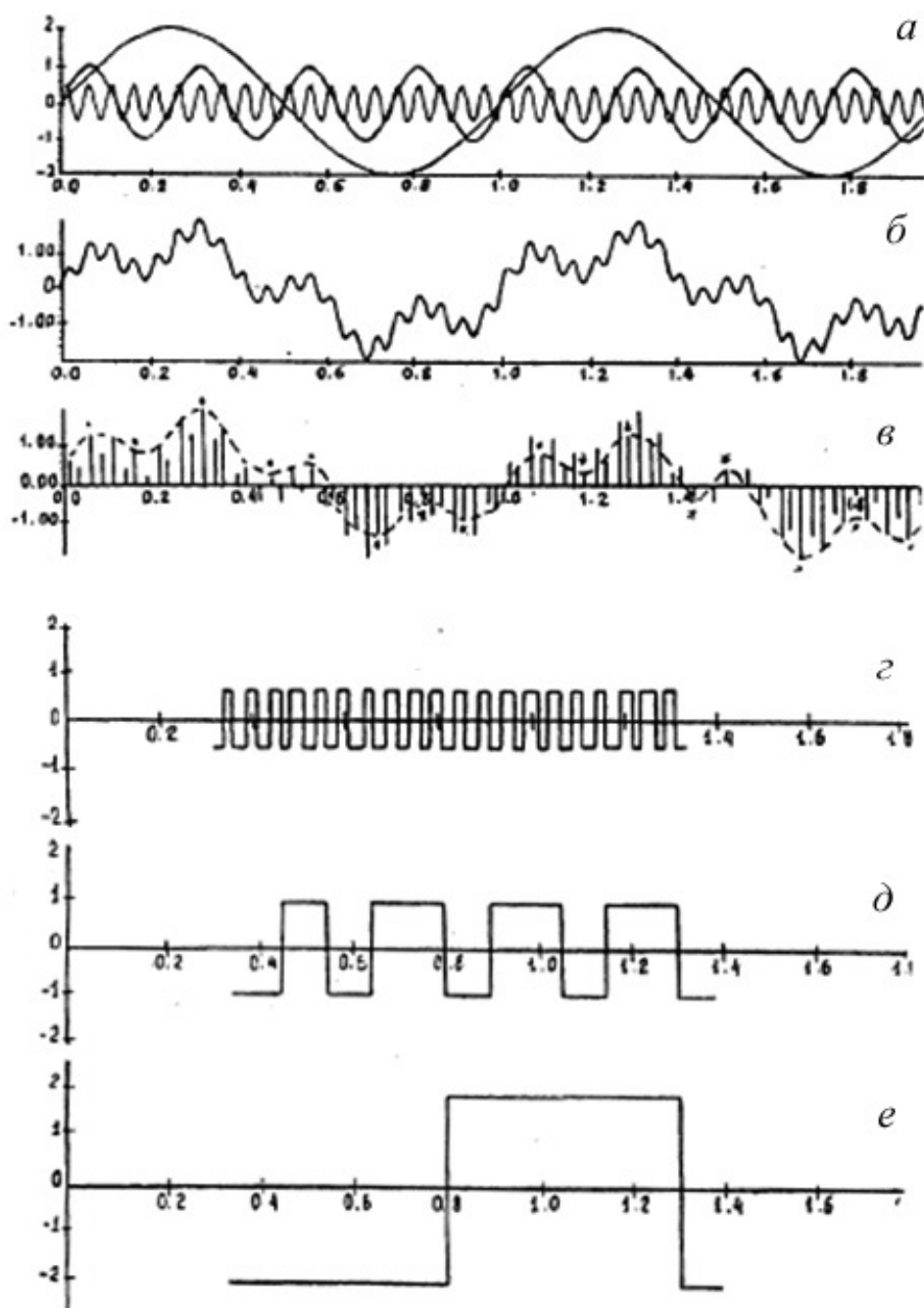


Рис. 3.8. Формирование базисной системы функций $\{\varphi_c(t)\}$

Первый подход заключается в использовании СВТ с последовательной или параллельной организацией. Каждые такие СВТ обладают высокими показателями по быстродействию и являются блоком средств одно или многократной обработки сигналов. *Второй подход* предполагает использование специализированных сигнальных СВТ для узкого класса алгоритмов комплексов ТЗИ. Такие специализированные СВТ характеризуются большой производительностью на конкретном классе задач. *Третий подход* предлагает

применение однокристалльных микро ЭВМ, обеспечивающих программную реализацию комплекса алгоритмов ускоренного анализа сигналов. Этот тип СВТ может осуществлять не только большой объем вычислений при обработке сигналов, что характерно и для первых двух подходов, но и на основе анализа информационного потока данных решать сложные задачи. Эти СВТ предназначены для решения всех выше изложенных задач и в первую очередь ускоренный метод корреляционного анализа сигналов в комплексах ТЗИ.

3.3. Метод выявления каналов утечки информации

С учетом вышесказанного, для выявления каналов несанкционированного получения информации и несанкционированного воздействия предлагается следующий укрупненный алгоритм (рис. 3.9).

Шаг 1. Документируется технология информационного обмена в виде множества отдельных информационных технологий, имеющих общие таксономические признаки.

Шаг 2. Выявляются прямые (функционально значимые) носители информации.

Шаг 3. Исследуется распространение сообщения с сопутствующими напряжениями и затуханиями от вышестоящего уровня информационного взаимодействия к нижестоящему. Определяется уровень информационного взаимодействия, за пределами которого смысл сообщения разобрать невозможно из-за искажений, вносимых синтаксической и семантической ошибками, и определяются границы зоны возможного распространения сообщений при их утечке по множеству каналов, сводя воедино вероятность синтаксической и семантической ошибок, возникающих при распространении сообщений .

Шаг 4. Проводится анализ условий, при которых возможно несанкционированное воздействие на каждый из выявленных носителей.

Шаг 5. На основании исходящей информации, перечисленных на шагах 1–4, проводится построение прогнозной модели поведения системы.

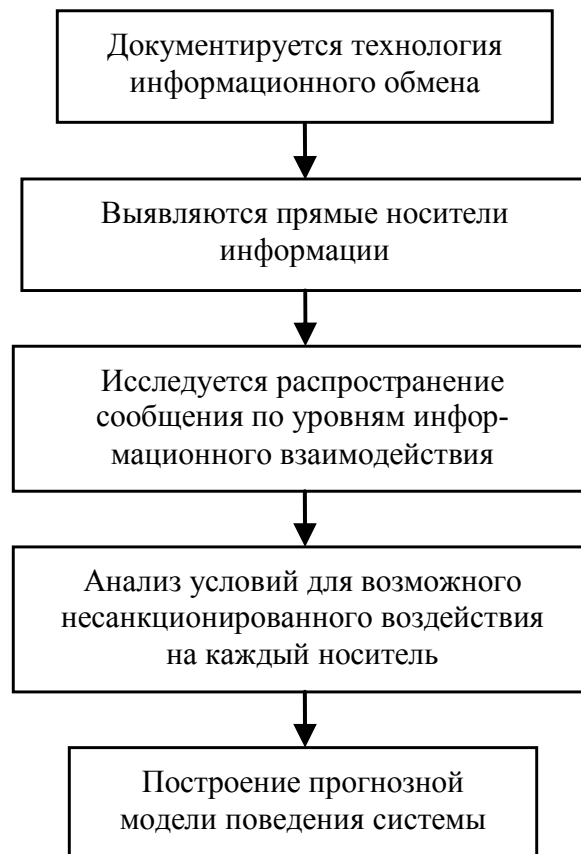


Рис. 3.9. Укрупненный алгоритм выявления каналов утечки информации

В качестве технологии информационного обмена рассмотрим передачу Субъектом 1 Субъекту 2 сообщения по каналу передачи информации (данных). При этом можно выделить составные части этой технологии:

- включение Субъектом 1 компьютера, запуск текстового процессора, набор на клавиатуре текста, подлежащего передаче, с последующим выводом его на дисплей или принтер и сохранение в файле данных;
- установление связи между Субъектами 1 и 2 по выбранному каналу передачи информации;
- передача сообщения Субъекту 2 по выбранному каналу;
- прием Субъектом 2 сообщения, чтение его текстовым редактором с выводом содержимого на дисплей или распечаткой на принтере.

Так как решение задач защиты будет происходить в условиях неопределенности, характеризующейся поступлением в систему принципиально новой для нее информации, то любая система для обеспечения своей безопасности должна уметь моделировать подобные процессы, решая при

этом такие задачи, как создание модели отдельного элемента, определение топологии связей между элементами, правил изменения связей при получении данной системой новой информации, определение правил рождения и гибели элементов [60].

Рассмотрим процесс построения алгоритма более подробно. Алгоритм обнаружения или поиска каналов утечки информации из защищенных объектов – это формализованное представление логики использования информации радиомониторинга эфира и функции оператора при выполнении комплексом ТЗИ поставленной задачи, состоящее из последовательности определенных процедур. *Процедура алгоритма поиска или обнаружения каналов утечки информации (АПОКУИ)* – это процесс выполнения комплексом своей задачи, в результате чего дискретно в произвольные моменты времени изменяются параметры, характеризующие режим использования данного комплекса или процесс проверки результата выполнения задачи.

Время пребывания в каждом из состояний является случайной величиной, поскольку зависит от многих факторов, при этом ни сами факторы, ни значения их параметров заранее не известны. Итак, математическим изображением поведения комплекса с заданными алгоритмом поиска АПОКУИ является дискретно-непрерывный, случайный процесс с ограниченным фазовым пространством.

При формировании списка процедур для комплекса ТЗИ (рис. 1.6) следует учитывать:

- наличие и роль оператора (какие именно процедуры он осуществляет: ввод данных, проверка выполнения задачи комплексом и т.д.);
- порядок обращений к ИУС (очередность привлечения комплекса к работе в качестве источника информации во время выполнения задания);
- перечень параметров и диапазон изменения их значений при отработке СРП своей задачи;
- перечень контролирующих и управляющих функций, которые осуществляет ИУС.

В случае формирования АПОКУИ комплексом ТЗИ с определенным составом и структурой такими фрагментами будут получение информации о возможном канале утечки и уточнение ее в случае получения информации от оператора или по СРП как источников информации (рис. 3.10).

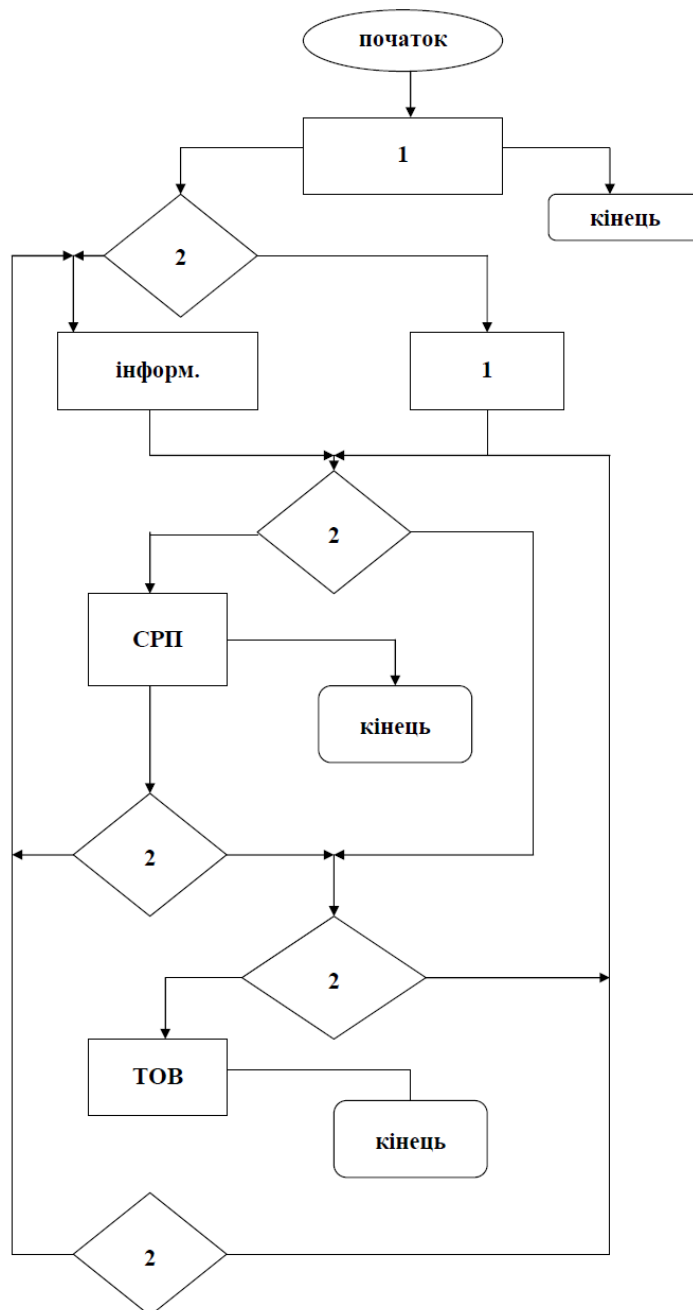


Рис. 3.10. Укрупненный алгоритм обнаружения каналов утечки информации комплексом ТЗИ

1 – операционный блок привлечения СРП для выполнения задач комплекса ТЗИ;
2 – сравнительный блок проверки результатов выполнения операционных блоков и принятия решений ИУС

В каждом фрагменте АПОКУИ необходимо рассматривать действия оператора, учитывая два варианта получения указаний:

- 1) информация воспринимается комплексом без участия оператора;
- 2) информация получается как сообщение оператора и предполагает ее введения оператором в ИУС. Эти варианты следует предусматривать в алгоритме поиска АПОКУИ введением формального параметра управления.

Во время работы комплекса автоматически (по командам ИКС) или действиями оператора осуществляется процедура вовлечения СРП, который выполняет отдельные задания. Такие процедуры в алгоритме поиска АПОКУИ изображаются операционными блоками. ИУС, в зависимости от результатов выполнения предыдущих действий, определяет дальнейшее поведение комплекса ТЗИ. Соответствующие процедуры ИУС определяются таким блоками:

- операционные блоки 1, представляющие привлечения СРП для выполнения отдельных задач комплекса;
- сравнительные блоки 2 выполняют проверку результатов выполнения операционных блоков и принятия определенных решений от ИУС.

При дальнейшей разработке проводится детализация основных частей АПОКУИ до уровня процедур поведения отдельных подсистем комплекса ТЗИ во время выполнения им задачи.

3.4. Структурно-автоматная модель моделирования перспективного комплекса ТЗИ

Алгоритм моделирования структурно-автоматной модели [64] перспективного комплекса ТЗИ в виде графа, имеющего 647 состояний и 1805 переходов, приведен на рис. 3.11.

Модель интерпретируется как марковская, что позволяет непосредственно из полученного графа состояний и переходов сформировать систему дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена [66].

При этом используются два способа представления алгоритма поведения объекта исследования, которые реализуются и виде:

- 1) словесного описания поведения;

2) блок-схемы алгоритма поведения.

Для реализации совершенствования технологии моделирования алгоритма поведения в традиционную технологию включены три новые средства: вербальная модель, структурно-автоматная модель построения состояний и переходов (рис. 3.12).

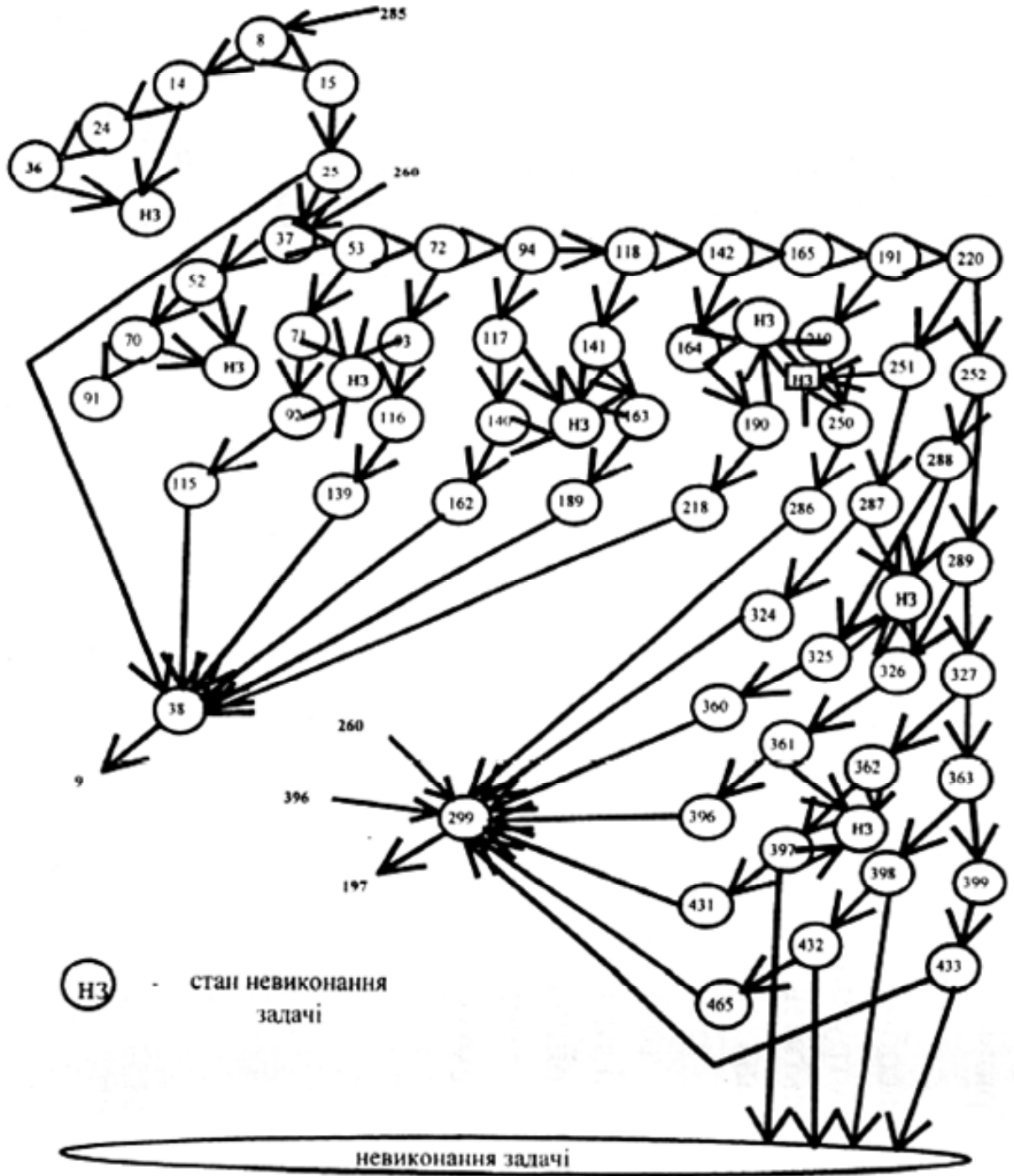


Рис. 3.11. Марковская модель комплекса (детализированный фрагмент полного укрупненного графа состояний и переходов)

Для дискретно-непрерывных стохастических систем такой алгоритм имеет своеобразные (характерные) особенности, а именно:

- 1) каждый операционный блок отражает выполнение функций за определенное время, который имеет случайную продолжительность;
- 2) каждый сравнительный блок отражает выполнение соответствующего условия, причем решение принимается с определенной вероятностью.

В этой ситуации вполне справедливым является такая постановка задачи: как использовать усовершенствованную технологию моделирования в случае, когда алгоритм поведения объекта исследования изображен на блок-схеме. Для этого нужно иметь методику разработки структурно-автоматной модели на основе блок-схемы алгоритма поведения.

Рассмотрим характерные особенности блок-схемы алгоритма поведения дискретно-непрерывной стохастической системы. Каждый операционный блок отражает два события: начало и окончание выполнения своей функции. Событие «окончание выполнения своей функции» предыдущего операционного блока совпадает по времени с событием «начало выполнения своей функции» следующего операционного блока.



Рис. 3.12. Трансформация моделей объекта исследования при построении марковской модели по усовершенствованной технологии

Для построения структурно-автоматной модели блок-схему реального алгоритма поведения следует переформировать в эквивалентный алгоритм. Его суть заключается в следующем:

1) каждую группу последовательно соединенных операционных блоков, представляющих последовательное выполнение функций, следует заменить одним эквивалентным операционным блоком, при этом сравнительные блоки в структуре эквивалентного алгоритма поведения нужно сохранить без изменений;

2) модификацию параметров стохастической системы, которая происходит в блоках, сочетающихся между собой перенести без изменений последовательности в эквивалентный операционный блок;

3) определить среднее значение и дисперсию времени выполнения операции для каждого эквивалентного операционного блока.

Среднее время выполнения операции i -го эквивалентного операционного блока T_i определяется как сумма средних времен выполнения операционных блоков, которые вошли в его состав:

$$T_i = \sum_{j=1}^{n_i} T_j, \quad (3.13)$$

где T_j – среднее время выполнения j -го блока, который входит в состав эквивалентного блока;

n_i – количество операционных блоков алгоритма поведения, которые входят в состав i -го эквивалентного блока.

Дисперсия времени выполнения операции i -го эквивалентного операционного блока алгоритма поведения $D[T_i]$ определяется по формуле:

$$D[T_i] = \sum D[T_j], \quad (3.14)$$

где $D[T_j]$ – дисперсия времени выполнения j -го блока, который входит в состав эквивалентного блока.

В эквивалентный алгоритм поведения следует ввести сравнительные блоки проверки работоспособности соответствующих систем объекта исследования. Результат проверки условия «истинна система?» должен быть

представлен показателем надежности этой системы, а именно вероятностью безотказной работы.

В результате проведенного анализа отметим, что входными данными для построения модели объекта исследования являются:

- 1) состав и структура объекта исследования;
- 2) параметры автономных подсистем, входящих в состав объекта (комплекса) исследования;
- 3) блок-схема алгоритма поведения объекта исследования;
- 4) значение среднего времени выполнения и дисперсии времени выполнения каждого операционного блока алгоритма поведения;
- 5) вероятность принятия решения «ДА» и дополнительные к единице вероятности принятия решения «НЕТ» для каждого сравнительного блока алгоритма поведения;
- 6) вероятность безотказной работы автоматной системы.

При разработке структурно-автоматной модели необходимо решить следующие задачи:

- сформировать вектор состояний;
- определить множество формальных параметров модели, которые определяют структуру и предельные возможности стохастической системы;
- описать алгоритм поведения системы в виде базовых событий, которые отбираются из совокупности всех возможных событий, происходящих в комплексе;
- для каждого базового события из множества базовых событий определить условия и обстоятельства, из которых происходит данное событие (условия и обстоятельства являются логическими функциями, параметрами которых являются элементы вектора состояния и константы из множества формальных параметров) [69];
- для каждого условия и обстоятельства из множества условий и обстоятельств сформировать формулы расчета интенсивностей переходов из состояния в состояние;

- каждой формуле расчета интенсивности перехода следует поставить в соответствие группу альтернативных переходов, которые позволяют сформировать выражения расчета вероятностей альтернативных переходов;
- каждому альтернативному переходу или непосредственно выражению расчета интенсивности перехода (если альтернативные переходы отсутствуют)
- установить правило модификации компонент вектора состояний;
- если в алгоритме поведения существует поглощающее состояние, то необходимо сформировать логическую функцию для попадания в поглощающее состояние.

Формирование вектора состояний

Несмотря на то, что задача определения компонент вектора состояний имеет индивидуальный характер для каждого объекта исследования, все же можно дать некоторые рекомендации для ее решения. Вектор состояний должен состоять из компонент, которые однозначно определяют состояние стохастической системы в каждый момент времени. Количество компонент в описании состояния должно соответствовать количеству параметров, изменение которых представляет поведение системы. В практике системного анализа приходится иметь дело с стохастическими системами, состоящими из нескольких автономных систем. Во время функционирования стохастической системы автономные системы, входящие в ее состав, являются источниками информации. А потому, в таких случаях, в описании состояния должны быть компоненты, которые изображают действующую систему в каждый момент времени. Поскольку состояние стохастической системы определяется значениями параметров комплекса (системы), которая является источником информации в данный момент времени, то в описании состояния должно отражаться соответствующими компонентами значения ее параметров. При этом в описании состояния должны быть отражены те параметры каждой автономной системы, которые существенно влияют на выбранные показатели эффективности стохастической системы (комплекса) в целом. Поскольку логику перехода из состояния в состояние задает алгоритм поведения, то еще

одна компонента в описании состояния стохастической системы должна указывать, какой именно его операционный блок задействован в этом состоянии. Пример изображения вектора состояния иллюстрирует табл. 3.1.

Таблица 3.1

Пример описания вектора состояний стохастической системы

№ компонента	Содержание компонента вектора состояний	Условные обозначения	Тип компонента
1	Номер операционного блока эквивалентного алгоритма поведения	N	Переменная целого типа
2	Система, которая является источником информации в конкретной ситуации	AD	То же самое
3	Количество повторных циклов обращения к внешнему источнику информации	AKP	Матрица-строка из 4-х элементов – переменных целого типа

Формирование множества формальных параметров

Множество формальных параметров состоит из констант, которые определяют: структуру стохастической системы, предельные значения элементов вектора состояний, параметры алгоритма поведения, интенсивности потоков первичных событий, наличие переключателей и т.п.

Формирование множества базовых событий

Изменение состояния объекта моделирования происходит под влиянием потоков событий. Функционирование стохастической системы отражает алгоритм поведения, а, следовательно, события, приводящего к изменению состояния, включенного в его операционные блоки. Поэтому при разработке структурно-автоматной модели стохастической системы используем эту особенность (обстоятельство), которая дает оригинальное и простое решение задачи определения множества событий.

Множество событий содержит только одно базовое событие - «окончание выполнения операционного блока» эквивалентного алгоритма поведения.

Формирование множества условий и обстоятельств

Условия и обстоятельства должны быть представлены логическими функциями, которые состоят из двух частей: обязательной (представляет собственное условие) и дополнительной (представляет обстоятельства). Эти две части соединены операцией логического умножения. Дополнительная часть логической функции является отсутствующей, когда отсутствуют обстоятельства. В состав обязательной части входит номер операционного блока. Дополнительная часть может состоять из одной или нескольких компонент, которые также сочетаются между собой операцией логического умножения. Последствия, к которым приводит событие, зависят от условий и обстоятельств, при которых это событие реализуется. Поэтому событие «окончание выполнения операционного блока» ставится в соответствие условия и обстоятельства из множества условий и обстоятельств.

Для стохастической системы, алгоритм поведения которой подано в блок-схеме (рис. 3.10), в условиях реализации события целесообразно изображать номер операционного блока эквивалентного алгоритма поведения, который выполняется и по необходимости (в зависимости от условий применения комплекса) сопряжен с ним операцией логического умножения значения соответствующей компоненты (или нескольких компонент) вектора состояний, отражающих параметры отдельных систем, которые при выполнении этого блока принимают предельные значения (рис. 3.11).

Формирование формул расчета интенсивностей переходов

Условиям и обстоятельствам, при которых происходит событие, соответствуют интенсивности переходов из состояния в состояние. Поэтому для каждого условия и обстоятельства из множества условий и обстоятельств определяется формула расчета интенсивности перехода (ФРИП), обусловленного определенным событием.

Формулы расчетов интенсивностей переходов для всех условий и обстоятельств одинаковы:

$$\lambda_i = \frac{1}{T_i} I. \quad (3.15)$$

где T_i – среднее время выполнения i -го операционного блока эквивалентного алгоритма поведения.

Формирование формул расчета вероятностей альтернативных переходов.
 При определении направлений переходов из состояния в состояние необходимо учитывать влияние случайных факторов. Каждый фактор порождает группу альтернативных переходов. В таких случаях каждой формуле расчета интенсивности перехода становится в соответствие группа альтернативных переходов и формируются формулы расчета условных вероятностей альтернативных переходов. Для сложившегося множества формул расчета условных вероятностей альтернативных переходов необходимо проверять чтобы при всех возможных условиях сумма вероятностей альтернативных переходов для всех цепей (направлений), которые выходят из одного операционного блока, равна 1. Формулы расчета вероятностей альтернативных переходов (ФРВАП) формируются в следующих случаях:

а) если после операционного блока следующим идет один или несколько сравнительных. В таком случае необходимо задать значение вероятности альтернативного перехода $P_{m,n}$ с m -го операционного блока алгоритма поведения в n -й в результате принятия определенного решения при прохождении одного или нескольких сравнительных блоков алгоритма поведения. Также необходимо задать дополнение к единице вероятности:

$$P_{m,k} = 1 - P_{m,n}$$

Данные вероятности – $P_{m,n}$ входят во множество формальных параметров. ФРВАП целесообразно отобразить в виде табл. 3.2.

б) если во время функционирования стохастической системы в качестве источника информации необходимо выбрать одну из систем (компонентов), то выбирается та, которая лучше всего работает в конкретных условиях. Это означает, что после принятия решения с альтернативной вероятностью $P_{m,d}$ очень часто необходимо еще раз принять решение для другого сравнительного блока. И эти новые решения, в виде вероятностей альтернативных переходов, целесообразно представить в другой табличной форме (табл. 3.3).

Формулы расчета вероятностей альтернативных переходов

Вероятность альтернативного перехода	Начало значения	Комментарий
$P_{2,3}$	0,85	Вероятность перехода из операционного блока 2 в блок 3 после прохождения сравнительных блоков, которые размещены между ними
$P_{2,4}=1-P_{2,3}$	0,15	Дополняющая вероятность
$P_{m,n}$	0,24	Вероятность перехода из блока m в блок n после прохождения сравнительных блоков, которые размещены между ними
$P_{m,k}=1-P_{m,n}$	0,76	Дополняющая вероятность
***	***	***

Таблица 3.3

Вероятности альтернативных переходов

Режим работы	Система 1	Система 2	Система 3
d	A	B	C
***	***	***	***
$P_{m,d}$	0,4	0,3	0,3
***	***	***	***

Это связано с тем, что сравнительные блоки, которых касаются эти вероятности альтернативных переходов, определяют режим работы стохастической системы (работа с источником информации с системой 1, с системой 2 или системой 3). Тогда вероятность $P_{m,d}$ соответствует переходу к другому сравнительному блоку, после чего возможны альтернативные переходы к блокам A , B , C , которые символизируют начало работы с системой 1, системой 2 или системой 3 соответственно. Этому случаю в табл. 3.3 соответствует строка $P_{m,d}$ которая, пересекаясь с соответствующими столбцами, дает необходимые вероятности альтернативных переходов. Если между двумя операционными блоками нет сравнительных, то альтернативный переход отсутствует и расчет соответствующей вероятности не производится.

Формирование правил модификации вектора состояний

Каждому из альтернативных переходов соответствует правило модификации векторов состояний. Правило модификации вектора состояний (ПМВС) отражает:

- номер следующего операционного блока, куда будет осуществляться переход;
- параметры системы, которые изменяются во время выполнения этого операционного блока и правила изменения этих параметров или их новые значения.

Сформированные компоненты структурно-автоматной модели для дальнейшей работы с ней целесообразно подавать в виде табл. 3.4.

Таблица 3.4

Обобщенное изображение структурно-автоматной модели комплекса ТЗИ, сформулированной на основании блок-схемы алгоритма поведения

События	Условия и обстоятельства	ФРИП	ФРИАП	ПМВС
Окончание выполнения операционного блока	$N=1$	$\lambda_1=1/T_1$	–	$N:=2$
	***	***	***	***
	$(N=K) \wedge (AD=0) \wedge \wedge (Cod=1)$	$\lambda_k=1/T_k$	$P_{k,d} = P_{k,T}$	$N:=T; DZ:=1; APW:=APW+1$
	***	***	***	***

Данная технология моделирования дискретно-непрерывных стохастических систем является особо рациональной, когда автономные системы, которые входят в ее состав, такие как отказоустойчивость – устойчивые системы. Это объясняется тем, что в данном способе построения комплексной математической модели объекта исследования найдено декомпозицию задачи и сложная сама по себе задача надежного анализа отказоустойчивости системы решается отдельно.

Выводы к третьему разделу

При практическом использовании комплексов ТЗИ в конкретных ситуациях требуется четкое представление о моделях опасных сигналов,

подлежащих контролю, оценке местоположения их источников, моделях комплексов ТЗИ. Учитывая это, в работе показано, что:

- за несколько последовательных циклов сканирования радиоприемника комплекса ТЗИ вероятность правильного обнаружения сигнала может быть повышена даже при небольшой вероятности правильного обнаружения за один цикл сканирования;

- выгоднее проводить длительный анализ на одном цикле сканирования, чем разбивать это время на несколько периодов для непрерывных сигналов. При ограниченном времени анализа на каждом шаге сканирования, с увеличением числа циклов сканирования вероятность правильного обнаружения опасного сигнала будет возрастать;

- для уточнения стороннего источника необходимо использовать дополнительные методы идентификации – статистику сигналов, время и длительность работы, прослушивание сигнала модуляции.

При этом усовершенствованы:

- метод оценки местоположения источника опасного сигнала;
- ускоренные методы поиска и обнаружения каналов несанкционированного получения информации и несанкционированного воздействия, которые позволяют сократить время и уменьшить затраты на проектирование комплексов ТЗИ за счет уменьшения объемов испытания;

- методика построения структурно-автоматной модели на основе блок-схемы алгоритма;

- структурно-автоматная модель комплекса ТЗИ, позволяющая автоматически формировать комплексную марковскую модель, для чего в традиционную технологию включены три новых средства: вербальная модель, структурно-автоматная модель и марковская модель в виде графа состояний и переходов.

РАЗДЕЛ 4

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСОВ ТЗИ

Комплекс ТЗИ представляет собой сложную радиоэлектронную систему, которая состоит из нескольких различных систем, способных в зависимости от внешних факторов автономно или при их взаимодействии решать поставленную задачу. Порядок использования информации от каждой радиоэлектронной системы на основе оценки их состояния и условий функционирования осуществляет человек-оператор.

4.1 Апробация разработанных методов и моделей

В общем случае под *эффективностью использования* (ЭИ) комплекса ТЗИ понимают целесообразность применения конкретной системы в определенных условиях. В качестве критерия ЭИ используют выражение [67]:

$$\mathcal{E}_и = K_г P(t), \quad (4.1)$$

где $K_г = T_o / (T_o + T_в)$ – стационарное значение коэффициента готовности;

T_o – время отказа;

$T_в$ – среднее время восстановления;

$P(t)$ – вероятность безотказной работы комплекса ТЗИ.

Однако, критерий (4.1) справедлив для частного случая, когда на определение факта появления отказа в работе комплекса ТЗИ не требуются затраты времени, связанные с проверкой на работоспособность.

Отказы в работе комплекса ТЗИ обнаруживаются в процессе *контроля технического состояния* (КТС), т.е. требуются дополнительные затраты на установление факта отказа [72]. Покажем, что ЭИ в определенной мере зависит от стратегии технического обслуживания. ЭИ будем оценивать способностью комплекса ТЗИ находится в постоянной готовности к применению, безотказностью работы в период времени t , а также наличием информации о возникшем отказе.

Тогда количественно ЭИ определяется критерием

$$\mathcal{E}_H = K_H * P(t)D_M, \quad (4.2)$$

где

$$K_u = \frac{tg(\alpha_0 + \beta_0)}{t_k(\alpha_0 + \beta_0) + \alpha_0\tau_k + (1 + \beta_0)t_k + T_0}$$

– коэффициент использования без ухудшения качества функционирования;

$\alpha_0 = \sum_{i=1}^n \alpha_i / n$ – среднее значение α_i ;

$\alpha_i = 0, 1, 2, \dots, R$ – случайная величина, характеризующая целое число периодов контроля за время i -й реализации времени безотказной работы комплекса ТЗИ;

$\beta_0 = \sum_{i=1}^n \beta_i / n$ – среднее значение β_i ;

t_k – период КТС;

$T_{бр} = T_0$ – среднее время безотказной работы.

$$T_{бр} = t_k(\alpha_0 + \beta_0) + \alpha_0 t_k. \quad (4.3)$$

$T_B = \sum_{i=1}^n t_{B_i} / n$ – среднее время восстановления;

$P(t) = 1 - F(t)$ – вероятность безотказной работы;

$D_m = \sum_{i=1}^m D_{mi}$ – методическая достоверность КТС;

m – число параметров контроля;

$F(t)$ – интегральный закон распределения.

Анализ, проведенный в работе [49], позволяет записать зависимость методической достоверности от числа проконтролированных параметров в виде экспоненты:

$$D_m^\infty = 1 - e^{-a \sum_{i=1}^m \tau_{ki}} / \sum_{i=1}^m \tau_{ki} \neq 0; \quad T_{э.нач} \leq T \leq T_{э.кон}, \quad (4.4)$$

где $T_{э.нач}, T_{э.кон}$ – время начала и конца эксплуатации комплекса ТЗИ;

τ_{ki} – время контроля i -го параметра;

a – некоторый постоянный коэффициент, определяющий крутизну экспоненты.

Коэффициент целесообразно подобрать по методу наименьших квадратов:

$$F(t) = \int_0^t A(R, b) t^{R-1} e^{-B(R, b)t^b} dt, \quad (4.5)$$

где R, b – постоянные коэффициенты, численные значения которых выбираются в соответствии с требуемым законом распределения (для экспоненциального распределения $b=R=1$; распределение Релея $R = b = 2$; Эрланга $R = 2, b = 1$ и т.д.);

A, B – коэффициенты, определяемые из условия нормировки

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t) dt = 1, \quad (4.6)$$

где $f(t) = dF/dt$ – функция плотности.

Определим коэффициенты A и B через математическое ожидание случайной величины

$$m = \int_0^{\infty} t f(t) dt = A \int_0^{\infty} t^R e^{-Bt^b} dt. \quad (4.7)$$

Введя новую переменную $U = t^b$, получим

$$m = \frac{A}{B} \int_0^{\infty} U^{\frac{R+1}{b}-1} e^{-BU} dU = A \frac{\Gamma\left(\frac{R+1}{b}\right)}{b \left(B \frac{R+1}{b}\right)}. \quad (4.8)$$

Тогда

$$A = bB^{\frac{R+1}{b}} / \Gamma\left(\frac{R+1}{b}\right), \quad (4.9)$$

где $\Gamma\left(\frac{R+1}{b}\right)$ – гамма функция от параметров R и b .

Выполнение требований нормировки (4.13) дает

$$1 = m \frac{bB^{\frac{R+1}{b}}}{\Gamma\left(\frac{R+1}{b}\right)} \int_0^{\infty} t^{R-1} e^{-Bt^b} dt = m \frac{\Gamma\left(\frac{R}{b}\right)}{\Gamma\left(\frac{R+1}{b}\right)} B^{1/b}. \quad (4.10)$$

Отсюда

$$B = \left[\frac{\Gamma\left(\frac{R+1}{b}\right)}{m \Gamma\left(\frac{R}{b}\right)} \right]^b. \quad (4.11)$$

Подставив значения B в выражение (4.9), получим

$$A = b\Gamma^R \left(\frac{R+1}{b} \right) / m^R \Gamma^{R+1} \left(\frac{R}{b} \right). \quad (4.12)$$

Подставив выражения (4.11) и (4.12) в выражение (4.5), получим вероятность безотказной работы для любого закона распределения случайной величины.

$$P = 1 - \int_0^\infty \frac{b\Gamma^R \left(\frac{R+1}{b} \right)}{m^R \Gamma^{R+1} \left(\frac{R}{b} \right)} t^{R-1} \exp \left\{ - \left[\frac{\Gamma \left(\frac{R+1}{b} \right)}{m\Gamma \left(\frac{R}{b} \right)} \right]^b t^b \right\} dt. \quad (4.13)$$

Для нахождения экстремума ЭИ комплекса ТЗИ от стратегии КТС необходимо решить систему уравнений:

$$\partial \mathcal{E}_u(t_k, \tau_k) / \partial t_k = 0;$$

$$\partial \mathcal{E}_u(t_k, \tau_k) / \partial \tau_k = 0. \quad (4.14)$$

Решение системы (4.14) представляет собой сложную и трудоемкую задачу. Даже для случаев $R = b = 1$ и $P = e^{-\Delta t}$ решить систему уравнений аналитически сложно:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{E}_u(t_k, \tau_k)}{\partial t_k} = & A \frac{t_k (\alpha_0 + \beta_0)}{t_k (1 + \alpha_0) + \alpha_0 \tau_k + T_b} e^{-\Delta t_k} + \\ & + \left\{ \frac{(\alpha_0 + \beta_0) [t_k (1 + \alpha_0) + \alpha_0 \tau_k + T_b]}{[t_k (1 + \alpha_0) + \alpha_0 \tau_k + T_b]^2} - \frac{t_k (\alpha_0 + \beta_0)}{[t_k (1 + \alpha_0)^2 + \alpha_0 \tau_k + T_b]^2} \right\} \\ & \times e^{-\Delta t_k} = 0. \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{E}_u(t_k, \tau_k)}{\partial \tau_k} = & a e^{\alpha \tau_k} \frac{t_k (\alpha_0 + \beta_0)}{t_k (\alpha_0 + 1 + \alpha_0 \tau_k + T_b)} + \\ & + (1 - e^{-\alpha \tau_k}) \times \frac{-t_k \alpha_0 (\alpha_0 + \beta_0)}{[t_k (1 + \alpha_0) + \alpha_0 \tau_k + T_b]^2} = 0. \end{aligned} \quad (4.16)$$

После преобразования системы уравнений (4.15) и (4.16) получаем

$$a e^{-\alpha \tau_k} [t_k (\alpha_0 + 1) + \alpha_0 \tau_k + T_b] - \alpha_0 (1 - e^{-\alpha \tau_k}) = 0; \quad (4.17)$$

$$At_k [t_k(1 - \alpha_0) + \alpha_0 \tau_k + T_b] + [t_k(1 + \alpha_0) + \alpha_0 \tau_k + T_b] - t_k(1 + \alpha_0) = 0. \quad (4.18)$$

Из уравнений (4.17) и (4.18) определим

$$\tau_k = \frac{At_k^0(1 + \alpha_0) + At_k T_b - T_b}{1 - At_k}; \quad (4.19)$$

$$t_k = \frac{\alpha_0(1 - e^{-\alpha t_k}) - a e^{-\alpha t_k}(\alpha t_k + T_b)}{\alpha e^{-\alpha t_k}}. \quad (4.20)$$

Для нахождения t_k необходимо выражение (4.19) подставить в выражение (4.20) и решить уравнение с одним неизвестным. Разложим $e^{-\alpha t_k}$ в ряд Тейлора до определенного члена так, чтобы ошибка не превышала заданной погрешности. Она будет тем меньше, чем больше число членов ряда принимается во внимание и оценивается выражением

$$|R_n| < \frac{e^k}{(n+1)!} (a \tau_k)^{n+1}, \quad 0 < \epsilon < e^{a \tau_k}. \quad (4.21)$$

Опыт показывает, что для современных комплексов ТЗИ коэффициент a лежит в интервале 0,5–12, а τ_k исчисляется от единицы до нескольких десятков часов.

Структурная схема алгоритма решения поставленной задачи представлена на рис. 4.1.

Логика работы алгоритма заключается в том, что при изменении значения t_k при $\tau_{ki} = \text{const}$, вычисляем \mathcal{E}_{ij+1} и производим сравнение $\mathcal{E}_{ij+1} - \mathcal{E}_{ij} < 0$. При выполнении данного условия \mathcal{E}_{ij} является точкой локального экстремума, а τ_{ki} локальным оптимальным периодом заданном объеме контроля τ_{km} . Затем происходит сравнение локальных экстремумов и определяется \mathcal{E}_{um} с оптимальным t_{kopt}, τ_{kopt} . В массив $A_0 = \{\mathcal{E}_{00}, \mathcal{E}_{01}, \mathcal{E}_{02}, \dots, \mathcal{E}_0\}$ заносятся значения эффективности использования при контроле первого параметра с множественной периодичностью, в массив $A_1 = \{\mathcal{E}_{10}, \mathcal{E}_{11}, \mathcal{E}_{12}, \dots, \mathcal{E}_{1q}\}$ – значения

\mathcal{E}_u , при контроле второго параметра с увеличенной периодичностью и т.д. В массив $B = \{t'_0, \tau'_0, \mathcal{E}'_0, t'_1, \tau'_1, \dots, t'_m, \tau'_m, \mathcal{E}'_m\}$ заносятся локальные экстремумы по каждому из контролируемых параметров. По результатам вычислений на компьютере построены графики зависимостей $\mathcal{E}_u = f(\tau_k)$ при $\tau_{ki} = \text{const}$ и локальных экстремумов ЭИ от объема КТС при $a_1 = 0,46$ и $a_2 = 0,64$ (рис. 4.2).

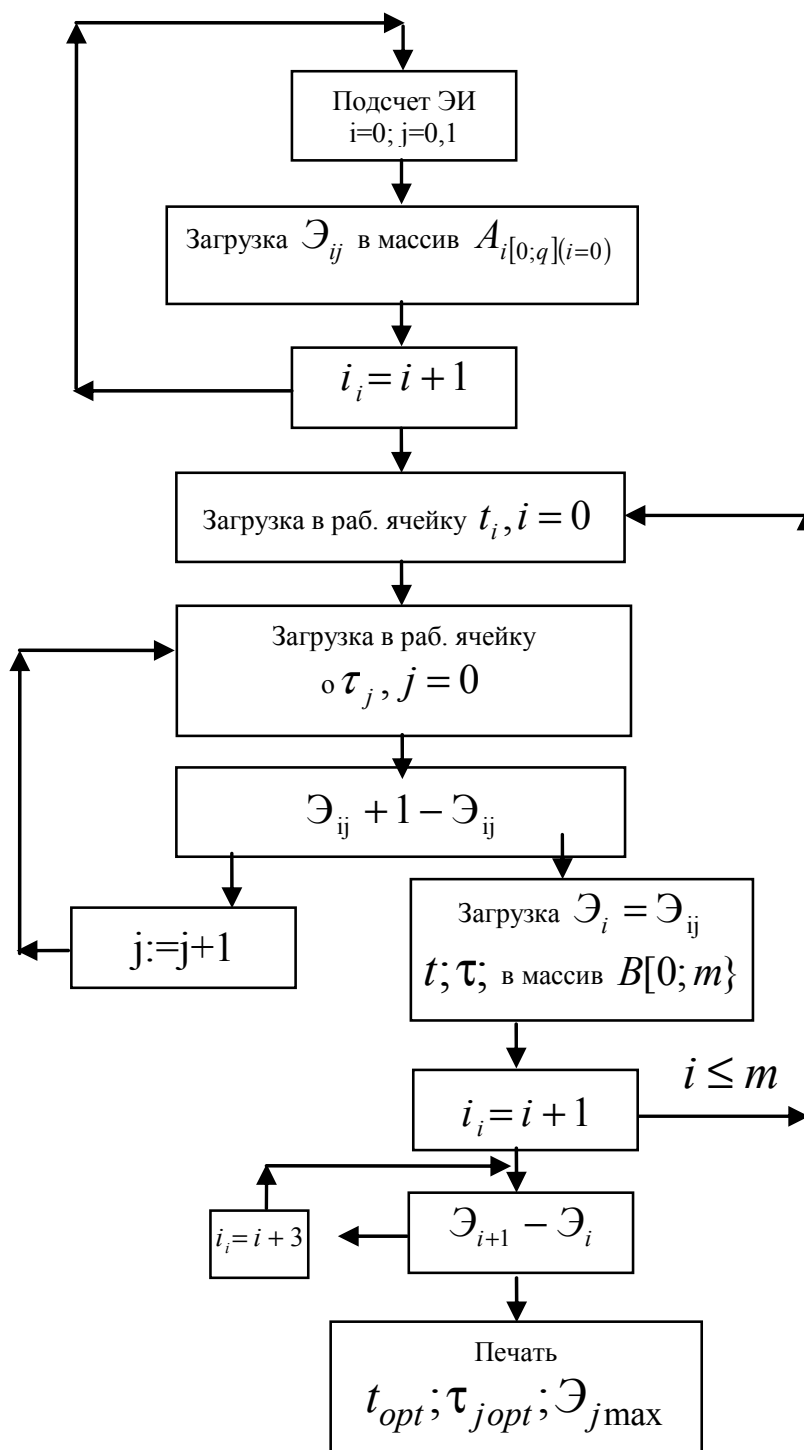


Рис. 4.1. Структурная схема алгоритма определения ЭИ

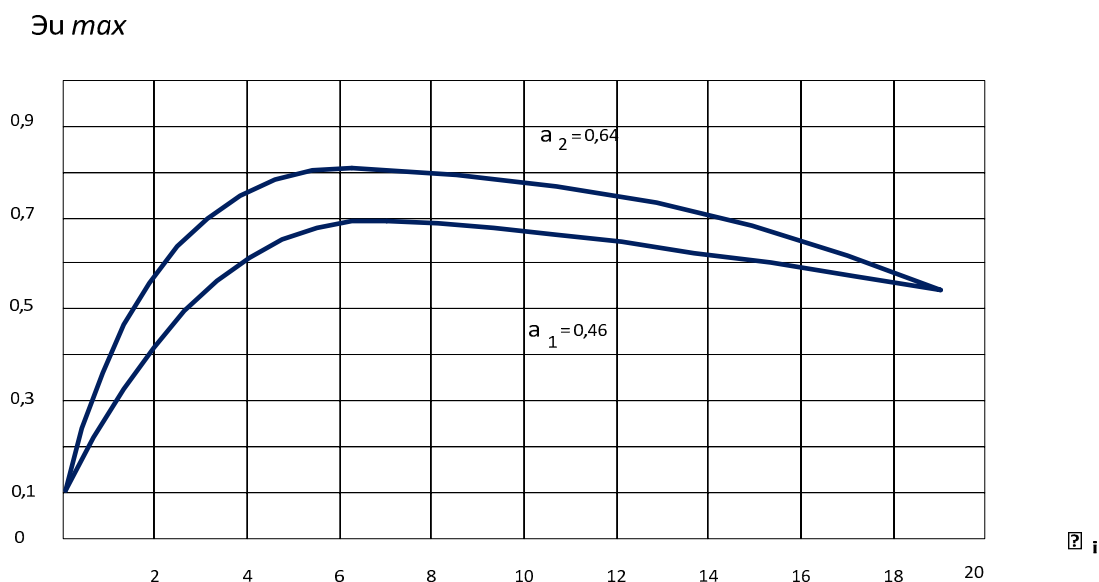


Рис. 4.2. Зависимость максимальной ЭИ от объема контроля

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, как распределение суммарного времени контроля между отдельными контролируемыми параметрами влияет на эффективность использования в наших условиях целесообразности расшифровки параметров, когда и каким объемом следует производить проверки параметров.

С ростом времени контроля τ_k выигрыш увеличивается, а затем уменьшается, и при $V_k = 1$ обращается в ноль. Это говорит о том, что порядок при полном контроле несущественен. В случае восстановления комплекса ТЗИ из состояния контроля в состояние использования при соблюдении очередности контроля параметров будет достигнута большая эффективность использования.

При проектировании комплексов ТЗИ для повышения эффективности функционирования необходимо выбрать обобщенный критерий их качества. Оптимизация технических характеристик комплексов ТЗИ для всех задач из-за большего числа параметров и выполняемых ими функций вряд ли возможна [34]. Вместе с тем, очевидно, что для большинства выполняемых задач можно выделить общий подход, заключающийся в том, что оценка качества проектируемых комплексов осуществляется по критерию «эффективность-стоимость» при выполнении ряда дополнительных условий:

- определяется минимальное число существенных контролируемых параметров для каждой задачи или группы задач;
- фиксируется допустимая (или при отсутствии четких рекомендаций – приемлемая) граница каждого из параметров;
- в качестве показателя эффективности средства выбирается показатель его быстродействия, характеризуемый вероятностью $P(t_{KM} \leq T_C)$ выполнения соответствующей задачи радиомониторинга средствами комплекса ТЗИ за интервал времени t_{KM} , не превышающий заданное значение T_C (длительность сигнала).

Лучшей считается та из моделей комплекса ТЗИ, которая обеспечивает большую вероятность выполнения соответствующей задачи за одинаковое время. Вместе с тем, при выборе конкретного комплекса необходимо иметь возможность выбора более эффективного или (при ограниченных финансовых возможностях) более дешевого средства [36]. Используя приведенные оценки эффективности, можно рассчитать показатели эффективности комплекса ТЗИ для конкретных требований к его качеству.

4.2. Оценка предполагаемой эффективности использования комплексов ТЗИ

Методика периодического радиоконтроля с использованием программно-аппаратных комплексов во многом определяется их программным обеспечением. Рассмотрим такую методику на примере специального программного обеспечения СМО-Д5 комплекса ТЗИ.

Комплекс ТЗИ разворачивается в контролируемом помещении в следующем порядке: подключаются антенны (три устанавливаются в разных концах контролируемого помещения, одна «опорная» – вне его), подключаются и устанавливаются в контролируемом помещении две звуковые колонки. На экране монитора управляющей ПЭВМ изображается схема контролируемого помещения с указанием мест расположения звуковых колонок.

Комплекс включается в режиме работы «Панорама» при подключенной внешней (установленной вне контролируемого помещения) антенне. В данном

режиме осуществляется автоматическое сканирование частотных диапазонов, в которых возможна работа радиозакладок и запись в память компьютера панорамы спектра. Причем в панораму заносятся только те сигналы (спектральные составляющие), которые превысили установленный оператором порог. Если в памяти компьютера уже имеется панорама спектра для данного помещения, полученная ранее (при проведении предыдущего контроля), то производится накопление спектра в режиме добавления и в панораму заносятся только новые сигналы (спектральные составляющие) или те сигналы, уровень которых превысил соответствующие значения, полученные ранее.

Перед началом работы с комплексом ТЗИ для активизации радиозакладок, включаемых на передачу при появлении в контролируемом помещении разговоров или шумов, следует включить в помещении какой-либо источник звукового сигнала. Необходимо выбрать именно тот тип известного звукового источника, который лучше всего соответствует типу обследуемого помещения: радиоприемник, магнитофон, телевизор и т.п. Необходимо предусмотреть достаточный запас времени звучания известного источника, так как проверка может продлиться несколько часов.

Включается режим работы **«Обнаружение»** при подключенных внутренних (установленных внутри контролируемого помещения) антеннах. В данном режиме также осуществляется сканирование частотных диапазонов, в которых возможна работа радиозакладок. По результатам сканирования заполняются и выводятся на экран монитора списки сигналов *Вероятные* и *Обнаруженные*. Сигнал заносится в список *Вероятные*, если его максимальный уровень превышает значение, полученное ранее в режиме **«Панорама»** на определенную величину, и больше уровня во внешней антенне на некоторую другую величину (эти величины устанавливаются оператором). Это позволяет отличать сигналы, источники которых находятся в контролируемом помещении, от сигналов, источники которых находятся вне помещения, и которые ранее не наблюдались.

В списке *Вероятные* для каждого сигнала указываются частоты и относительные уровни первой и второй гармоник, значение аттенюатора, время первого и последнего появления сигнала (если проводилось несколько измерений) и коэффициент временной загрузки (отношение количества обнаружения сигнала к общему количеству измерений). Все сигналы, попавшие в список *Вероятные*, тестируются с использованием активного или пассивного тестов.

Активный тест производится при приеме сигналов с WFM, NFM и AM-модуляцией с использованием специальных акустических сигналов, транслируемых через выносные звуковые колонки. В данном тесте проверяется корреляция излучаемых акустических сигналов с детектированными принимаемыми. В последних разработках программно-аппаратных комплексов используются пассивные («бесшумные») акустические корреляторы, не требующие излучения специального акустического сигнала. В них в качестве эталонных (тестовых) используются акустические сигналы, циркулирующие в контролируемом помещении (естественный звуковой фон помещения). Если вычисленная корреляционная функция превышает некоторое пороговое значение, то обнаруженный сигнал заносится в список *Обнаруженные*.

При **пассивном тесте** проверяется наличие высших гармоник. Пороговые уровни превышения гармоник над шумами устанавливает оператор. Дополнительно используется метод сравнения уровней сигналов от опорной (внешней) антенны и антенн, установленных в контролируемом помещении.

Использование распределенной антенной системы в помещении и внешней опорной антенны позволяет в условиях сложной радиоэлектронной обстановки обнаруживать источники сигналов, расположенные в контролируемом помещении, с уровнем мощности в несколько десятков мкВт на фоне излучений мощных радиоэлектронных средств (телевизионных и радиовещательных станций и т.д.). При положительном завершении теста сигнал заносится в список *Обнаруженные*.

В списке *Обнаруженные* для каждого сигнала указываются частоты и относительные уровни первой, второй и третьей гармоник, значение аттенюатора, время первого и последнего появления сигнала (если проводилось несколько измерений) и коэффициент «временной загрузки» (отношение количества обнаружений сигнала к общему количеству измерений).

Для определения местоположения обнаруженной радиозакладки, использующей WFM, NFM или АМ - модуляцию сигнала, включается режим работы **«Поиск»**. В основе поиска лежит метод определения расстояния от акустических колонок до радиозакладки, рассмотренный выше. Результаты определения расстояния отображаются на экране монитора в виде двух дуг. Точка их пересечения соответствует вероятному местоположению радиозакладки. Для повышения точности производят несколько измерений.

При использовании программноаппаратных комплексов наиболее эффективным способом контроля является постоянный (непрерывный) радиоконтроль. Он имеет ряд преимуществ:

- при непрерывном радиоконтроле накапливается большой объем информации об электромагнитной обстановке в контролируемом помещении, что облегчает и ускоряет процессы обнаружения новых источников излучения (радиозакладок);

- выявляются не только непрерывно излучающие или включаемые по акустическому сигналу закладки, но и дистанционно управляемые радиозакладки и закладки с промежуточным накоплением информации, время работы на излучение которых сравнительно мало;

- одним комплексом можно контролировать несколько помещений (например, комплекс АРК-ДЗ позволяет контролировать до 23 помещений).

Для организации постоянного контроля в служебном помещении устанавливается основное оборудование комплекса:

- сканирующий приемник;
- устройство спектральной обработки сигналов (блок быстрого панорамного анализа на основе процессора БПФ);

- компьютер с установленным специальным программным обеспечением;
- опорная антенна (комнатная или наружная);
- антенный коммутатор;
- микроконтроллер, отвечающий за внутрисистемные коммутации и управляющий периферийными устройствами и др.

В контролируемых помещениях устанавливаются широкополосные антенны, подключаемые к антенному коммутатору проложенными в здании коаксиальными кабелями, и звуковые колонки, подключаемые к контроллеру низкочастотными кабелями. Первичный анализ электромагнитной обстановки осуществляется в режиме работы «**Панорама**» при подключенной опорной антенне. В данном режиме осуществляется автоматическое сканирование частотных диапазонов, в которых возможна работа радиозакладок и запись в память компьютера панорамы спектра. При первичном анализе группового спектра шумов и сигналов оцениваются амплитудно-частотные характеристики (спектры) отдельных сигналов, проводится их классификация и идентификация с сигналами известных источников электромагнитных излучений. Панорамы с сигналами, которые не полностью идентифицируются с известными сигналами, записываются в память для сохранения, анализа и последующего сравнения с текущей панорамой. В основе анализа панорам с неизвестными сигналами, которые могут быть излучениями радиозакладок, лежат рассмотренные выше методы.

В последующем анализ электромагнитной обстановки в режиме «**Панорама**» проводится через определенные интервалы времени, устанавливаемые оператором. Накопление спектра осуществляется следующим образом. В панораму заносятся только новые сигналы (спектральные составляющие) или те сигналы, уровень которых превысил соответствующие значения, полученные ранее. При достаточном времени контроля в панораме будут зарегистрированы и сигналы, появляющиеся периодически, например, сигналы от мобильных сотовых систем.

Поиск излучений закладных устройств в контролируемых помещениях осуществляется в режиме «Обнаружение». При этом оператор по заданной программе подключает к комплексу ТЗИ антенны и звуковые колонки, установленные в соответствующих помещениях. Методы поиска радиозакладок такие же, как при периодическом контроле, рассмотренном выше.

Специальное программное обеспечение комплексов ТЗИ позволяет проводить поиск закладных устройств не только в автоматическом, но и ручном режимах, что дает возможность оператору самому детально исследовать параметры сигналов, отнесенных программой к разряду вероятных сигналов закладных устройств. Тщательный анализ этих сигналов позволяет подготовленному оператору выявить акустически некоррелируемые сигналы закладных устройств с программной перестройкой частоты или сложным скремблированием, сверхширокополосные, с дельта-модуляцией и др.

Программно-аппаратные комплексы ТЗИ с устройствами спектральной обработки сигналов на основе процессора БПФ обеспечивают дискретность отсчета 1...3 КГц, что позволяет обнаруживать излучения радиозакладок, рабочие частоты которых (в целях маскировки сигнала) выбираются в непосредственной близости от рабочих частот постоянно работающих мощных источников радиоизлучения.

Обладая структурной, временной, информационной избыточностью на уровне отдельных подсистем и функциональной избыточностью на уровне комплекса в целом, комплекс ТЗИ при отказе отдельных устройств или подсистем, входящих в его состав, не теряет работоспособности, а только задерживает эффективность своего функционирования.[48].

Эффективность функционирования современных комплексов ТЗИ в значительной степени определяет человек-оператор, что следует всегда учитывать при их проектировании и эксплуатации. Вместе с этим комплекс может предоставлять оператору такой объем информации, что он не в состоянии его проанализировать и принять решение за время, отведенное комплексу для выполнения задания. Поэтому важной задачей при создании

комплексов ТЗИ с автоматизацией исключения определенных функций оператора является автоматический выбор основного источника информации комплекса при изменении условий функционирования, внедрение подсистем поддержки принятия решений и т.д. Эти функции реализованы в алгоритме поведения комплекса, который в этом случае является алгоритмом поиска и обнаружения каналов утечки информации методом многовариантного анализа. Для этого необходима разработка комплексной модели комплекса ТЗИ.

Входными данными для построения комплексной модели являются:

- 1) состав и структурная схема комплекса;
- 2) параметры подсистем, входящих в состав комплекса;
- 3) блок-схема алгоритма поведения комплекса;
- 4) среднее значение и дисперсия времени выполнения каждого операционного блока алгоритма поведения;
- 5) приемлемые вероятности принятия решения «ДА» и дополнение к единице вероятности принятия решения «НЕТ» для каждого блока сравнения алгоритма поведения;
- 6) допустимая вероятность безотказной работы комплекса.[62].

4.3. Расчет количественной оценки показателей эффективности комплексов ТЗИ

Задача выбора показателей эффективности комплексов ТЗИ содержится во многих публикациях. Согласно подходу, который предложен в данной работе, любая функциональная задача решается комплексом с определенным заданным качеством, причем качество характеризуется совокупностью показателей. По одному из них задается критерий оптимальности. Он должен характеризовать комплекс по его целевому назначению и в отношении него находится оптимальное решение. Остальные показатели служат ограничительными условиями при определении оптимальных решений.

В качестве целевого показателя эффективности комплекса ТЗИ предлагается использовать вероятность выполнения поставленной задачи, что

определяется практической целесообразностью. Показатель удобен универсальностью относительно вида комплекса, его назначения, учитывает стохастическую природу проявления дестабилизирующих факторов при функционировании комплекса ТЗИ и удобен нормированностью их числовых значений.

В качестве ограничительного условия предлагается использовать время выполнения задания.

Для принятия проектных решений необходимо дать количественную оценку влияния на показатель эффективности комплекса следующих факторов:

- разный уровень квалификации оператора при вводе данных и выполнения выявленных каналов утечки;
- одновременное обнаружение нескольких каналов;
- отказ аппаратуры комплекса;
- неточность задания данных.

Исходными данными для проведения расчетов являются: состав разработанного комплекса ТЗИ, его параметры (табл. 4.1), блок-схема эквивалентного АВКВИ; средние значения и дисперсия времени выполнения операционными блоками (ПЭВМ) эквивалентного алгоритма ПВКВ; вероятность принятия решения «ДА» для ИКС; интенсивности отказов для каждого комплекса.

Таблица 4.1

Параметры комплекса ТЗИ

Комплекс	Количество порогов определения	Количество выявленных каналов	Количество каналов повторного обращения к ИКС	Количество зон определения
СРП	7	6	2	2
ТОВ	7	6	1	1
СНИ	5	6	1	1

В процессе исследования сформулированы и решены основные задачи.

Задача № 1. Определить вероятности выполнения задачи и среднее время выполнения задачи комплексом ТЗИ в зависимости от квалификации

оператора, которая характеризуется его умением работать с несколькими каналами утечки одновременно. Исследованию подлежат 6 вариантов, в которых предусмотрено одновременную работу оператора с низкой и высокой квалификацией с тремя, четырьмя и пятью каналами.

Варианты исследований приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Варианты исследований эффективности комплекса ТЗИ с учетом квалификации оператора

№ варианта	Количество каналов утечки для СРП, ТОВ, ИКС	Время выявления оператором каналов для СРП, ТОВ, ИКС в секундах	Обозначения характеристики на рис. 4.8 и 4.9.
1	3;3;3	4;4;4 (квалификация высокая)	P_1, P_1
2	3;3;3	8;8;8 (квалификация низкая)	P_2, P_2
3	4;4;4	4;4;4 (квалификация высокая)	P_3, P_3
4	4;4;4	8;8;8 (квалификация низкая)	P_4, P_4
5	5;5;5	4;4;4 (квалификация высокая)	P_5, P_5
6	5;5;5	8;8;8 (квалификация низкая)	P_6, P_6

Результаты исследований представлены дифференциальной и интегральной характеристиками закона распределения для времени выполнения задачи комплексом ТЗИ на рис. 4.3 и 4.4.

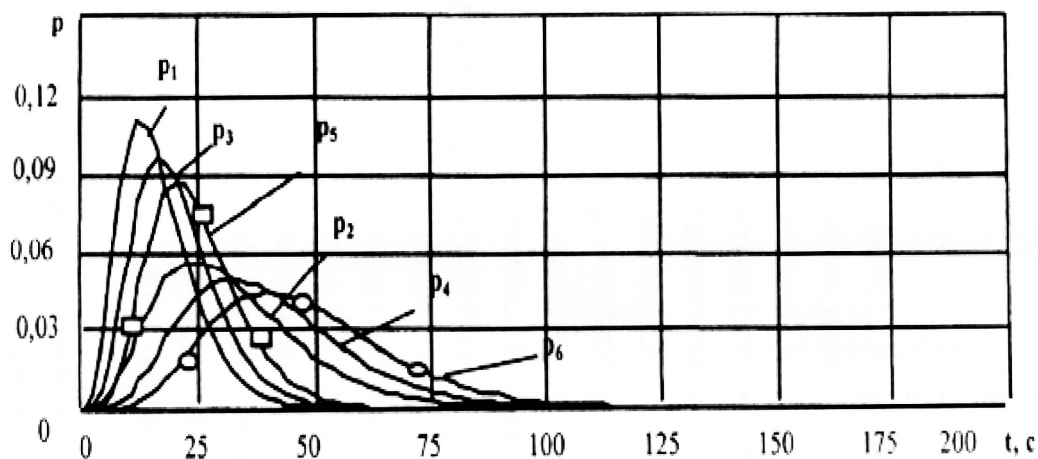


Рис. 4.3 Дифференциальные (P_i) характеристики закона распределения для времени выполнения задачи комплексом ТЗИ

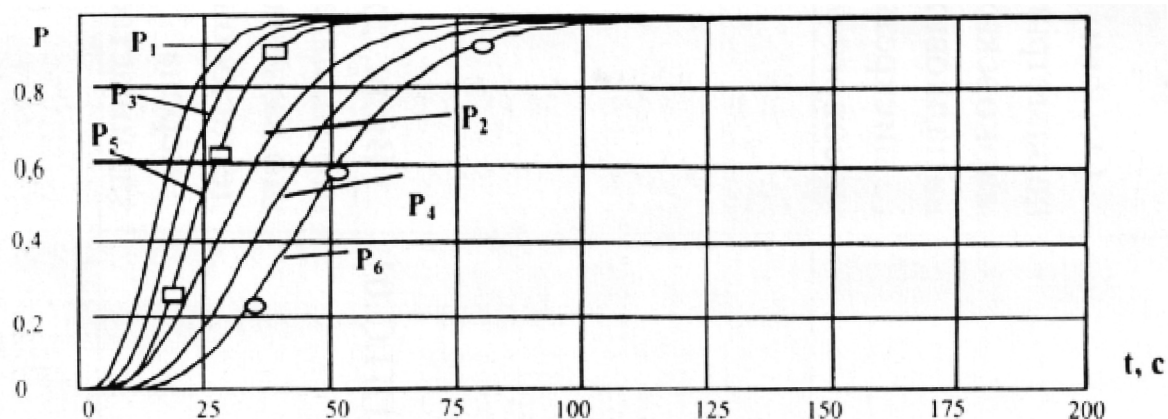


Рис. 4.4. Интегральные (P_i) характеристики закона распределения для времени выполнения задачи комплексом ТЗИ

По этим характеристикам определены вероятности выполнения задачи комплексом и среднее значение времени выполнения задания для каждого исследуемого варианта, которые приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Средние значения времен и вероятностей выполнения задания

№ варианта	1	2	3	4	5	6
$P_{вз}$	0,994014	0,994014	0,99302	0,99302	0,992025	0,992027
t, c	18,39720 7	34,397196	22,397204	42,397151	26,397204	50,39639

Решение этой задачи позволяет оптимизировать процесс выявления и обработки опасных сигналов, определить роль человека в процессах поиска и обнаружения каналов утечки информации, сократить время, необходимое для проведения радиомониторинга радиэфира.

Задача №2. Определить возможности комплекса выполнения задания, с учетом того, что представление данных оператору осуществляется с определенной погрешностью.

Для решения такой задачи комплексная модель позволяет получить зависимости вероятности выполнения задачи и среднего времени выполнения задачи от вероятности того, что погрешность предоставления информации ξ в виде сообщения оператору превышает заданную величину. Результат исследования для случая, что погрешность представления информации превышает 1,5 %, представлены на рис. 4.5 и рис. 4.6.

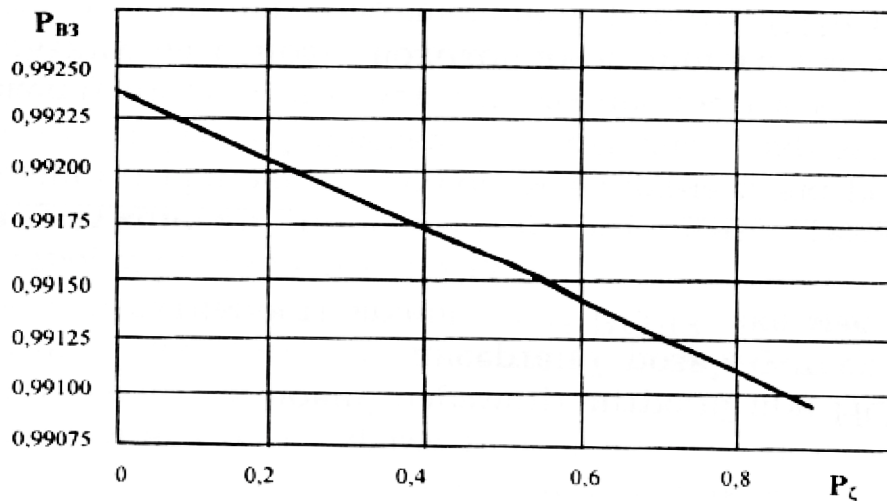


Рис. 4.5. Зависимость вероятностей выполнения задания от вероятности того, что погрешность представления информации $P_{\xi} > 1,5\%$.

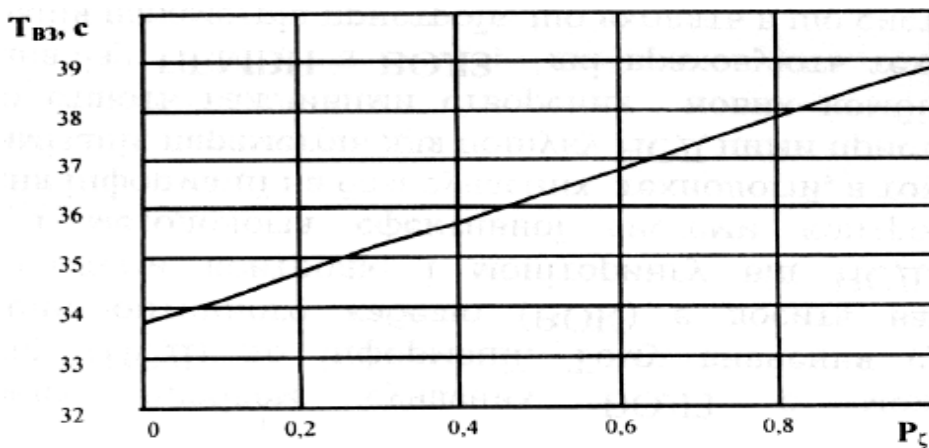


Рис. 4.6. Зависимость времени выполнения задачи комплекса ТЗИ от вероятности того, что погрешность представления информации $P_{\xi} > 1,5\%$.

Решение задачи позволяет получить зависимости вероятности выполнения и среднего времени выполнения задачи от вероятности того, что погрешность предоставления информации превышает заданную величину, чтобы принять соответствующие решения относительно выбора средств комплекса ТЗИ для анализа опасных сигналов в пределах допустимых погрешностей за заданное время.

Задача №3. Определить зависимость вероятности выполнения задачи комплексом ТЗИ за определенное время при различных уровнях надежности.

Реализация алгоритма поиска и обнаружения каналов утечки информации характеризуется временем выполнения задачи, которое является случайной

величиной. Комплексная модель позволяет получить плотность распределения вероятностей для времени выполнения задания при различных значениях уровня надежности комплекса в целом, а также его подсистем, входящих в состав комплекса, и соответственно определить вероятность выполнения задачи за определенное время. Уровень надежности комплекса характеризуется значением интенсивности отказов.

Для 6 вариантов значений интенсивности отказов каждой подсистемы комплекса ТЗИ ($\lambda_1=10^{-1}$, $\lambda_2=10^{-2}$, $\lambda_3=10^{-3}$, $\lambda_4=10^{-4}$, $\lambda_5=10^{-5}$, $\lambda_6=10^{-6}$), зависимости вероятности выполнения задания за определенное время приведены на рис. 4.7.

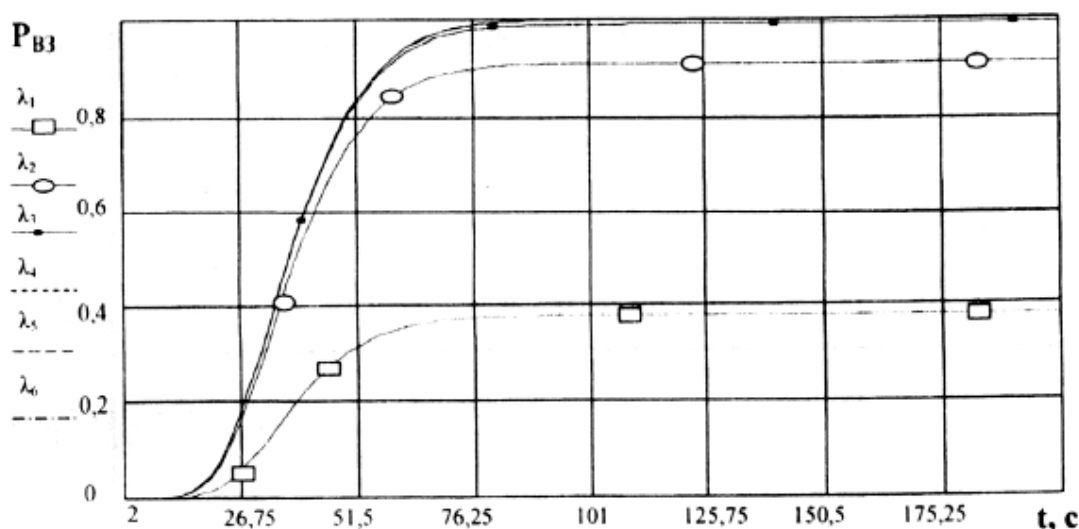


Рис. 4.7. Зависимость вероятности выполнения задачи комплексом ТЗИ за время t при различных уровнях надежности

Решение этой задачи позволяет обосновать состав перспективного комплекса ТЗИ с учетом различных значений уровня надежности комплекса в целом, а также его подсистем, для выполнения задания комплексом за определенное время или изменить сформированные тактико-технические требования к существующему комплексу и его состав.

Задача № 4. Определить зависимость вероятности выполнения задачи от выбора основного источника информации комплекса ТЗИ.

Реализация алгоритма поиска или обнаружения канала утечки информации (АПОКУИ) предполагает выбор определенной подсистемы комплекса как основного источника для определенного состава комплекса ТЗИ.

Поэтому нужно оценить, как влияет на вероятность выполнения задачи выбор из 5 источников информации одного в качестве основного: **1** – СРП (сканирующий радио-приемник), **2** – ТОВ (телевизионно-оптический визир), **3** – ИУС (информационно-управляющая система), **4** – случайный выбор комплекса с равномерными подсистемами, **5** – случайный выбор комплекса с предоставлением преимущества СРП. Результаты такого исследования представлены на рис. 4.8.

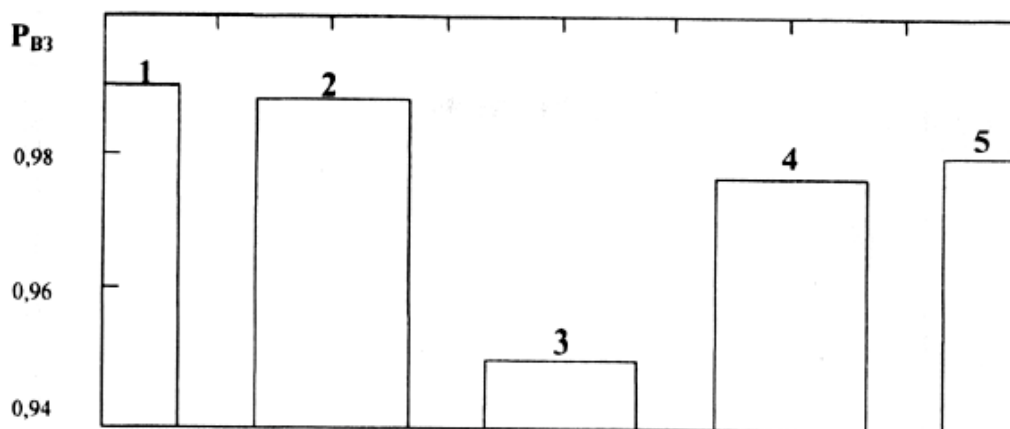


Рис. 4.8 Зависимость вероятности выполнения задачи от выбора основного источника информации комплекса ТЗИ

Решение этой задачи с использованием АПОКУИ позволяет выбрать для любого состава комплекса ТЗИ определенную подсистему комплекса в качестве основного источника информации с учетом допустимой вероятности выполнения задания.

Задача №5. Необходимо выбрать СРП, который может быть включен в состав комплекса ТЗИ с учетом вероятности обнаружения им канала утечки информации.

Например, для выбора есть пять СРП, имеющие одинаковый уровень надежности, но отличающиеся по значению параметра вероятности обнаружения канала утечки информации ($P_{оку} = 0,65$; $P_{оку} = 0,7$; $P_{оку} = 0,8$; $P_{оку} = 0,9$; $P_{оку} = 1,0$). Результаты этого исследования, приведенные на рис. 4.9, показывают, что время выполнения задачи комплексом ТЗИ практически не зависит от того, какой тип СРП применяется с определенными значениями вероятности обнаружения каналов утечки будет включен в его состав.

Представленные результаты иллюстрируют возможности использования комплексной стохастической модели комплекса ТЗИ на этапе системотехнического продвижения этого комплекса. Комплексная модель комплекса ТЗИ позволяет:

- 1) осуществлять выбор отдельных подсистем комплекса;
- 2) сравнивать варианты реализации алгоритма поведения на основе количественных значений показателей эффективности.

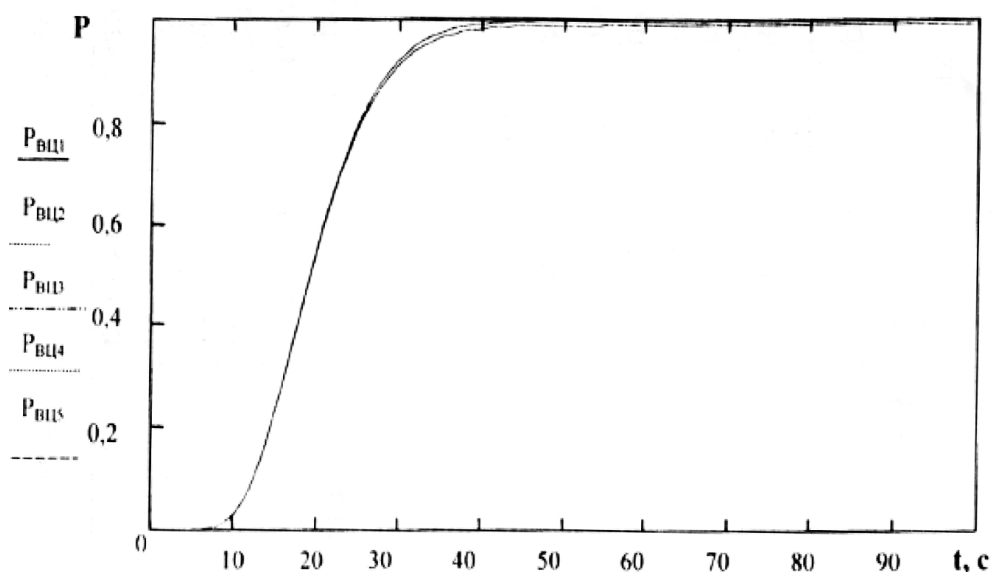


Рис. 4.9. Интегральные характеристики закона распределения для времени выполнения задачи при различных типах СРП

Решение этой задачи показало, что время выполнения задачи комплексом ТЗИ практически не зависит от того, какой тип СРП применяется с определенными значениями вероятности обнаружения каналов утечки, поэтому включение СРП в состав комплекса зависит от его надежности. Получение таких результатов позволяет не только сократить время, но и уменьшить затраты на проектирование комплексов ТЗИ за счет уменьшения объектов испытаний.

4.4. Сравнительный анализ эффективности смоделированного и существующих комплексов ТЗИ

Для проведения сравнительного анализа качества поисковых средств существующих комплексов ТЗИ с разработанным комплексом были отобраны 5

наиболее часто используемых на практике комплексов: Астра В (Украина), АКОР (Украина), Дельта (Россия), RS-1000/8 (Германия-Япония), Крона 6Н (Россия).

Для большинства выполняемых задач выявления и анализа опасных сигналов оценка качества подсистем комплексов ТЗИ осуществляется по критерию «эффективность – стоимость» при выполнении ряда дополнительных условий:

- определяется минимальное число существенных параметров для каждой задачи или группы задач из общей совокупности параметров, влияющих на эффективность использования комплексов ТЗИ (не менее 20);

- фиксируется допустимая (или при отсутствии четких интервалов времени, не превышающих значение T_c (длительность сигнала), при рекомендации – приемлемая граница каждого из параметров;

- в качестве показателя эффективности комплекса ТЗИ выбирается вероятность $P(t_{KM} \leq T_c)$ выполнения соответствующей задачи радиомониторинга средствами комплекса за интервал времени t_{KM} , не превышающий заданное значение T_c .

Лучшей считается модель комплекса ТЗИ, которая обеспечивает большую вероятность выполнения соответствующей задачи комплекса за заданное требуемое время. Вместе с тем, при выборе конкретного комплекса ТЗИ необходимо иметь возможность выбора более эффективного или (при ограниченных финансовых возможностях) более дешевого поискового средства [36]. Используя приведенные оценки эффективности, были рассчитаны (см. 4.3 раздел диссертации) показатели эффективности комплекса ТЗИ для конкретных требований к его качеству.

Результаты исследований, проведенных для вероятности обнаружения сигнала $P(t_{обн} \leq T_c)$ моночастотного радиоэлектронного средства (РЭС) приведены на рис. 3.1 и 3.2, а для случая обнаружения РЭС с перестройкой частоты – на рис. 3.3 и 3.4 в разделе 3.1 диссертации. Анализ полученных зависимостей (на рис. 3.1 и 3.2) показывает, что при заданной величине

рабочего диапазона 2 ГГц непрерывный радиосигнал длительностью 3 с достоверно обнаруживается, начиная со скорости панорамного анализа (ПА) 600 МГц/с и выше, сигнал с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) обнаруживается с вероятностью 0,99 при скорости ПА от 1400 МГц/с.

На рис. 3.3 и 3.4 представлены зависимости вероятности обнаружения сигнала $P(t_{обн} \leq T_c)$ от T_c для различных значений (300, 900, 1800 и 3000 МГц) полного диапазона поиска нового сигнала для скорости панорамного анализа 1500 МГц/с. При заданной скорости моночастотный радиосигнал при максимальном диапазоне поиска 3000 МГц достоверно обнаруживается уже за 2с, сигнал с ППРЧ с вероятностью 0,95 – за 3с. Снижение диапазона поиска до 2000 МГц повышает достоверность обнаружения до 0,99.

При скорости панорамного анализа более 1500 МГц/с задача обнаружения достаточно широкого класса радиосигналов может быть решена в течение первых 3с после появления сигнала в эфире.

Когда необходимо обнаруживать в сверхшироком диапазоне рабочих частот кратковременные и импульсные радиосигналы, а также сигналы источников радиоизлучения (ИРИ), и решение о наличии или отсутствии в контролируемом помещении утечки информации должно быть принято за возможно более короткий интервал времени, способ одноканального обнаружения имеет ограниченные возможности. Предложенный в работе подход к выявлению опасных излучений обеспечивает решение поставленных задач. Отличительной особенностью обнаружения радиоисточников в контролируемой зоне от общей постановки обнаружения сигналов является необходимость разделения источников контролируемой зоны на ИРИ, находящиеся внутри контролируемых объектов, и на ИРИ, находящиеся вне контролируемой зоны. Кроме того, для систем, использующих только одну антенную систему (АС), возможно только обнаружение факта появления нового сигнала. Для решения задачи разделения источников на внутренние и внешние, а также для определения места ИРИ, введен режим съема сигналов с двух АС – внутренней, находящейся в контролируемом помещении, и

наружной «опорной» антенной системы, находящейся вне контролируемого объекта. При использовании одноканального радиоприемного устройства (РПУ) измерения мощности сигналов с двух антенн можно провести только последовательно во времени. Это сказывается на качестве оценки мощности сигнала. Кроме того, при одноканальном РПУ затруднено выявление сигналов с динамическим частотно-временным распределением излучения.

При использовании двухканального цифрового радиоприемного устройства (ЦРПУ), каналы которого настроены на одну и ту же частоту, достигается сокращение длительности измерения и повышается точность оценки мощности сигналов за счет того, что снятие временной выборки происходит синхронно по двум каналам и оценка мощности сигнала осуществляется в равных условиях. Так как сравниваются относительные величины, ошибки, связанные с погрешностями разработанного алгоритма оценки мощности, не влияют на результат.

Этот способ обнаружения источников электромагнитного излучения в пределах контролируемой зоны с использованием двухканального приемного устройства с когерентно связанными гетеродинами и двухканальным процессором быстрого преобразования Фурье (БПФ) обеспечивает повышение надежности обнаружения «внешних» и «внутренних» излучений и обнаружения излучений с динамической частотно-временной структурой в условиях сложной помеховой радиообстановки.

При двухканальной обработке наблюдаемая интенсивность сигналов, регистрируемых по каждому из каналов, будет различной. Эта разница будет определяться не только реальным отличием напряженности поля в точке размещения приемных антенн, но и отличием поправочных коэффициентов, которое вызывается различием в калибровке и режимом работы АРУ разных каналов.

В зависимости от характеристик используемого комплекса ТЗИ возможны разные варианты учета отличий в свойствах каналов приема. Предлагаемая процедура оценки местоположения источника опасного сигнала

и принятия решения по результатам обработки сигналов описана в разделе 3.1 диссертации. Она предполагает выполнение четырех взаимосвязанных этапов. Практическое использование данного алгоритма показало высокую вероятность принятия правильных решений в диапазоне частот от 25 МГц до 6 ГГц.

При проведении специальных исследований был измерен уровень ПЭМИ и рассчитывался радиус зоны, характеризующий минимальное расстояние от технических средств, на границе и за пределами которых отношение сигнал/шум не превышает допустимого значения. В общем случае это расстояние может находиться в ближней, промежуточной или дальней (волновой) зоне.

В ходе панорамного мониторинга на каждом частотном участке осуществляется внеочередное подключение каждой из антенн ко входу комплекса ТЗИ, при этом в полосе одновременного анализа для каждой из антенн снимается спектр с заданной дискретностью, а затем осуществляется сравнение каждой из компонент спектра с пороговым уровнем. Те из компонент спектра, которые превысили порог, сравнивают между собой, а минимальная из них сравнивается с уровнем соответствующей компоненты спектра от «опорной» антенны.

Способ основан на известном положении электродинамики о дальней и ближней зонах [85]. Компоненты вектора напряженности электрического поля выражаются в сферических координатах. В пределах каждой из зон затухание электромагнитной волны описывается различными аналитическими зависимостями. Во втором разделе диссертации проведено моделирование физических процессов и полей при выявлении и анализе опасных сигналов, учитывающее их особенности на границах зоны, которые могут носить нелинейный характер.

Известно [87], что ядром любого комплекса ТЗИ является радиоприемное устройство, обеспечивающее выполнение функций панорамного анализа и автонастройки на несущую частоту при поиске. Определенный раньше показатель эффективности дополняется рядом параметров, достижение которых является необходимым и может быть использовано в качестве

дополнительных условий (начальных или граничных). Основными из них являются: скорость панорамного анализа, рабочий диапазон частот, динамический диапазон в широкополосном тракте по взаимной интермодуляции 3 и 2 порядка, стабильность частоты и уровень подавления приема по паразитным каналам. Показателем эффективности средств, обеспечивающих панорамный анализ, является скорость обработки сигналов. Наиболее перспективными в настоящее время являются цифровые РПУ, сочетающие аналоговый тюнер с широкой полосой ПЧ (2-10 МГц) и блок аналого-цифровой обработки, обеспечивающий параллельную обработку всех сигналов в полосе одновременного анализа с необходимым частотным разрешением. Такое решение дает максимальное быстродействие.

Проведенная в работе оценка предполагаемой эффективности использования комплексов ТЗИ, внедрение разработанных методов и моделей, использованных для повышения эффективности их функционирования, позволили из всего множества параметров, характеризующих функциональные особенности комплексов ТЗИ, выбрать и представить в таблице 4.4 20 параметров, в наибольшей степени влияющих на эффективность комплексов. Для сравнительного анализа в таблице 4.4 приведены основные характеристики наиболее часто используемых на практике комплексов ТЗИ: Астра В, АКОР, RS-1000/8, Дельта, Крона 6Н.

Исследования, проведенные в диссертации, и анализ построенной табл. 4.4 позволили выделить параметры для сравнительной оценки смоделированного комплекса ТЗИ с часто используемыми комплексами.

Таблица 4.4

Сравнительная таблица показателей эффективности разработанного и существующих комплексов ТЗИ

Показатели эффективности	Разраб. компл. *	Астра В	АКОР	RS-1000/8	Дельта	Крона 6Н
1. Время обнаружения опасного сигнала, сек.	до 7	до 10	до 30	до 30	до 40	до 20
2. Точность измерения временных характеристик ОС, мк/сек	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,03	± 0,04
3. Время выявления ОС без адаптации комплекса к радио эфиру, Мсек	10	15	20	25	30	30
4. Время выявления ОС после адаптации комплекса к радио эфиру, Мсек	0,7	1	1	2	3,5	3
5. Радиус контролируемой зоны обнаружения ОС, м	250	200	50	150	50	100

Окончание таблицы 4.4

6. Точность определения местоположения ОС, м	± 0,1	± 0,1	± 0,2	± 0,5	± 0,5	± 0,7
7.**Точность обнаружения ОС от скорости обработки	92%	92%	80%	80%	75%	75%
8. Пакет программного обеспечения	собст. разр.	собст. разр.	собст. разр.	использ. стандарт	использ. стандарт	использ. стандарт
9. Приемное устройство	любое	Анализатор спектра HP-18	AR-5000	IC-8500	AR-3000A	AR-3000A
10. Количество объемов контроля	до 24	до 28	до 16	до 16	до 12	до 16
11.**Скорость сканирования частотных каналов, МГц/сек	50	50	50	50	75	75
12. Шаг перестройки, КГц	7,5	10	15	10	15	15
13. Точность определения ОС КГц	± 5	± 7	± 7	± 7	± 10	± 10
14. Точность измерения спектральных характеристик ОС, КГц	± 10	± 15	± 20	± 15	± 25	± 25
15. Удобство применения	+	+	+	+	+	+
16. Среда функционирования (Windows)	+	+	+	+	+	+
17. Комплекс измерительных антенн	+	+	+	+	+	+
18. Вид модуляции (АМ, ФМ, ЧМ,ОФМ, ДЧМ, ДОФМ, КАФМ,АФМ)	+	+	+	+	+	+
19. Вид импульсной модуляции (АИМ, ФИМ, ШИМ,КИМ)	+	+	+	+	-	-
20. Наличие средств ВТ	+	+	+	+	+	+

* Стендовые (идеальные) условия;** В зависимости от типа ЭВМ.

В результате были построены сравнительные таблицы 4.5 и 4.6 по каждому из параметров. В частности, по 7 параметрам (1, 3, 4, 5, 12, 13, 14) смоделированный комплекс имеет превосходство (табл.4.5).

Таблица 4.5

Таблица лучших показателей эффективности смоделированного комплекса ТЗИ

Показатели эффективности	Разраб. комплекс	Существующие комплексы
1. Время обнаружения опасного сигнала, сек.	до 7	10–40
3. Время выявления ОС без адаптации комплекса к радио эфиру, Мсек	10	15–30
4. Время выявления ОС после адаптации комплекса к радио эфиру, Мсек	0,7	1–3,5
5. Радиус контролируемой зоны обнаружения ОС, м	250	50–200
12. Шаг перестройки, КГц	7,5	10–15
13. Точность определения ОС, КГц	± 5	±7–±10
14. Точность измерения спектральных характеристик ОС, КГц	± 10	±15–±25

Из таблицы следует, что все временные характеристики смоделированного комплекса ТЗИ превосходят аналогичные показатели рассматриваемых комплексов, а именно:

1. Время обнаружения опасного сигнала смоделированным комплексом ТЗИ минимум в 1,3 меньше аналогичного показателя выбранных комплексов;

3. Время выявления ОС без адаптации смоделированного комплекса ТЗИ к радиоэффиру минимум в 1,4–2 раз меньше аналогичного показателя выбранных комплексов;

4. Время выявления ОС после адаптации комплекса к радиоэффиру минимум в 1,3 раз меньше аналогичного показателя выбранных комплексов.

5. Радиус контролируемой зоны обнаружения ОС разработанным комплексом ТЗИ минимум в 1,25–2,5 больше аналогичного показателя выбранных комплексов.

12. Шаг перестройки смоделированного комплекса минимум в 1,3–2 раза меньше аналогичного показателя выбранных комплексов ТЗИ.

Точность определения ОС и измерения его спектральных характеристик смоделированным комплексом ТЗИ превосходит точность рассматриваемых комплексов минимум в 1,4–2 раза (13, 14 показатели).

По четырем параметрам (2, 6, 7, 11) и всем качественным параметрам (15–20) табл. 4.4 смоделированный комплекс ТЗИ совпадает с наиболее используемыми образцами данных комплексов (табл. 4.6).

Таблица 4.6

Сравнительная таблица разработанного и существующих комплексов ТЗИ по совпадающим показателям эффективности

Показатели эффективности	Смоделир. комплекс	Существующие комплексы
2. Точность измерения временных характеристик ОС, мксек	$\pm 0,01$	Астра В, АКОР, RS-1000/8
6. Точность определения местоположения ОС, м	$\pm 0,1$	Астра В
7.*Точность обнаружения ОС от скорости обработки	92 %	Астра В
11.*Скорость сканирования частотных каналов, МГц/сек	50	Астра В, АКОР, RS-1000/8

*В зависимости от типа ЭВМ

Таким образом, комплекс ТЗИ, смоделированный на основе исследований в диссертации и предложенных решений, по параметрам эффективности превосходит распространенные в настоящее время комплексы, а ближе всех по отдельным характеристикам (2, 6, 7, 11) к нему находится комплекс Астра В. Однако стоит заметить, что при внедрении данных разработок при проектировании на практике перспективных комплексов ТЗИ показатели их эффективности могут быть несколько ниже смоделированного комплекса ввиду возникновения форс-мажорных обстоятельств.

Выводы к четвертому разделу

Важной задачей при создании комплексов ТЗИ с автоматизацией включения / исключения определенных функций человека-оператора является автоматический выбор состава комплекса, выбор основного источника информации при изменении условий функционирования, внедрение подсистем поддержки принятия решений и т.д.

Для решения поставленной задачи:

- проведена оценка эффективности методики периодического радиоконтроля смоделированного комплекса ТЗИ в автоматическом и ручном режимах на примере специального программного обеспечения СМО-Д5;

- доказано, что комплекс ТЗИ не теряет работоспособности при отказе отдельных устройств или подсистем, входящих в его состав, обладая структурной, временной, информационной избыточностью на уровне отдельных подсистем и функциональной избыточностью на уровне комплекса ТЗИ в целом;

- усовершенствован метод оценки предполагаемой эффективности использования комплексов ТЗИ;

- проведен расчет количественной оценки влияния факторов, характеризующих комплекс ТЗИ, на показатель эффективности комплекса (вероятность выполнения поставленной задачи), что позволяет осуществлять выбор отдельных подсистем комплекса ТЗИ, сравнивать варианты реализации алгоритма поведения при ограниченном времени выполнения задания;

- определен эффективный состав комплекса ТЗИ и комплексов, наиболее соответствующих требованиям к современным средствам защиты информации;
- проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, как на эффективность использования комплексов ТЗИ влияет распределение суммарного времени контроля между отдельными контролируемыми параметрами;
- методика выбора показателей эффективности комплексов ТЗИ позволяет сократить время и уменьшить затраты на проектирование комплексов за счет уменьшения объемов испытаний;
- для проведения анализа обоснованно сформирована совокупность параметров функционирования смоделированного комплекса ТЗИ, в наибольшей степени влияющих на эффективность его использования (20 параметров);
- для сравнения смоделированного комплекса ТЗИ с другими выбраны часто используемые в настоящее время комплексы: Астра В (Украина), АКОР (Украина), Дельта (Россия), RS-1000/8 (Германия–Япония), Крона 6Н (Россия);
- построенная таблица показателей эффективности смоделированного и существующих комплексов ТЗИ позволила провести их детальный сравнительный анализ;
- из анализа таблицы следует, что 7 показателей эффективности смоделированного комплекса ТЗИ (в частности, все временные характеристики) существенно превосходят аналогичные показатели рассматриваемых комплексов, остальные 13 показателей совпадают с часто используемыми образцами существующих комплексов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ, проведенный в диссертационной работе, показал, что часто используемые методы моделирования физических процессов и полей не всегда обеспечивают нужную информативность при рассмотрении процессов, протекающих при выявлении и обработке опасных сигналов. Гарантированное обнаружение и идентификация опасных сигналов возможны при условии выполнения определенных требований к комплексам ТЗИ. Причем при практическом использовании комплексов ТЗИ в конкретных ситуациях требуется четкое представление о моделях опасных сигналов, подлежащих контролю, поэтому в работе показана эффективность впервые использованных в выявлении, обработке и анализе опасных сигналов некоторых существующих физико-математических методов дифференциальных преобразований, в результате внедрения которых удалось улучшить качественные и количественные характеристики смоделированного комплекса ТЗИ, тем самым повысив эффективность его функционирования. Кроме того, для достижения поставленной цели были усовершенствованы ускоренные методы обработки опасных сигналов.

Вместе с тем, важным решением задачи улучшения эффективности функционирования комплексов ТЗИ с включением / исключением функций человека-оператора является автоматический выбор состава комплекса, выбор основного источника информации при изменении условий функционирования, внедрение подсистем поддержки принятия решений.

В целом, исследования, проведенные в работе, позволили предложить решения задач для достижения поставленной цели:

– поскольку прямые носители информации порождают множество косвенных носителей, в результате чего возникает возможность внедрения нелегитимных получателей информации (злоумышленников) в систему информационного обмена, определен полный перечень необходимых действий для выявления побочных электромагнитных излучений и наводок, проведен

анализ возможностей комплексов ТЗИ и их составляющих, что позволило создать модель цифровой системы мониторинга эфира;

– для решения задач повышения эффективности функционирования комплексов ТЗИ предложены адаптированные существующие методы моделирования физических процессов на основе одномерных дифференциальных преобразований нелинейных краевых задач с линейными и нелинейными граничными условиями, а также метод баланса дифференциальных спектров;

– выполнено моделирование процесса поиска и обнаружения сигнала, приема, распознавания, установления его адекватности определенному классу сигналов для определения степени опасности для объекта и его информационной системы, усовершенствован ускоренный метод анализа опасных сигналов комплексами ТЗИ;

– усовершенствован метод оценки местоположения источника опасного сигнала и укрупненный пошаговый алгоритм поиска и обнаружения каналов несанкционированного воздействия и получения информации, реализованный в построенной марковской структурно-автоматной модели комплекса ТЗИ;

– показано, что комплекс ТЗИ не теряет работоспособности при отказе отдельных устройств или подсистем, входящих в его состав, обладая структурной, временной, информационной избыточностью на уровне отдельных подсистем и функциональной избыточностью на уровне комплекса в целом;

– с использованием усовершенствованного метода оценки предполагаемой эффективности комплексов ТЗИ проведен расчет количественной оценки влияния факторов, их характеризующих, на показатель эффективности комплекса (вероятность выполнения поставленной задачи), что позволяет осуществлять выбор отдельных подсистем комплекса ТЗИ, сравнивать варианты реализации алгоритма поведения при ограниченном времени выполнения задания;

– для проведения анализа эффективности обоснованно сформирована совокупность параметров функционирования разработанного комплекса ТЗИ, в наибольшей степени влияющих на эффективность его использования (20 параметров) и для сравнения выбраны наиболее часто используемые в настоящее время комплексы: Астра В (Украина), АКОР (Украина), Дельта (Россия), RS-1000/8 (Германия-Япония), Крона 6Н (Россия);

– детальный сравнительный анализ таблицы показателей эффективности показал, что разработанный комплекс ТЗИ превосходит часто используемые в настоящее время комплексы ТЗИ.

Результаты исследований реализованы при обосновании принципов и путей создания, характеристик и параметров систем защиты в научно-исследовательской работе «Безпека – 07П» в Учебно-научном институте защиты информации Государственного университета телекоммуникаций [Акт реалізації № 77/391 від 26.06.2012 р.] и в Институте Управления государственной охраны Украины Киевского национального университета имени Тараса Шевченко в рамках постановки лабораторной базы по дисциплине “Технические средства охраны” [Акт реализации № 3 / 11 / 3 – 210 від 18.10.2014 р.].

Таким образом, полученные результаты исследований позволяют сократить время и уменьшить затраты на проектирование комплексов ТЗИ, а так же повысить эффективность их функционирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Закон України «Про захист інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах»: Закон України від 05.10.94 № 80/94-ВР // Відомості Верховної Ради України. – 1994. – № 31. – Ст. 286.
2. Закон України «Про Концепцію національної програми інформатизації» від 04.02.1998 №75/98-ВР.
3. Закон України «Про державну таємницю»: Закон України від 21.09.99 № 1079-XIV // Відомості Верховної Ради України. – 1999. – № 49. – Ст. 428.
4. Закон України «Про інформацію»: Закон України від 02.10.92 № 2657-XII // Відомості Верховної Ради України. – 2002. – № 29. – Ст. 194.
5. Закон України «Про основи національної безпеки України» від 19.06.2003 р.
6. Закон України «Про електронний цифровий підпис» від 22.05.03 № 852-IV.
7. Закон України «Про телекомунікації» від 18.11.2003 р. № 1280-IV.
8. Закон України «Про електронні документи і електронний документообіг» від 22.05.03 № 851- IV.
9. ISO/IEC 27001 – «Информационные технологии. Методы обеспечения безопасности. Системы управления информационной безопасностью. Требования» (опубликован в 2005).
10. ISO/IEC 27002 – «Информационные технологии. Методы обеспечения безопасности. Практические правила управления информационной безопасностью». Переименованный стандарт ISO/IEC 17799.
11. ISO/IEC 27003 — «Информационные технологии. Методы обеспечения безопасности». Руководство по внедрению.
12. ISO/IEC 27004 — «Информационные технологии. Методы обеспечения безопасности. Измерение эффективности системы управления информационной безопасностью».

13. ISO/IEC 27005 — «Информационные технологии. Методы обеспечения безопасности. Управление рисками информационной безопасности». На основе BS7799-3; (опубликовано в 2008).

14. ISO/IEC 27006 — «Информационные технологии. Методы обеспечения безопасности. Требования к органам аудита и сертификации систем управления информационной безопасностью».

15. ДСТУ 3396.0-96 «Захист інформації. Технічний захист інформації. Основні положення».

16. ДСТУ 3396.1-96 «Захист інформації. Технічний захист інформації. Порядок проведення робіт».

17. ДСТУ ISO/IES TR 13335-1:2003 «Інформаційні технології. Настанови з керування безпекою інформаційних технологій. Ч. 1. Концепції та моделі безпеки інформаційних технологій».

18. ДСТУ ISO/IES TR 13335-2:2003 «Інформаційні технології. Настанови з керування безпекою інформаційних технологій. Ч. 2. Керування та планування безпеки інформаційних технологій».

19. ДСТУ ISO/IES TR 13335-3:2003 «Інформаційні технології. Настанови з керування безпекою інформаційних технологій. Ч. 3. Методи керування захистом інформаційних технологій».

20. ДСТУ ISO/IES TR 13335-4:2003 «Інформаційні технології. Настанови з керування безпекою інформаційних технологій. Ч. 4. «Вибір засобів захисту».

21. ДСТУ ISO/IES TR 13335-5:2003 «Інформаційні технології. Настанови з керування безпекою інформаційних технологій. Ч. 5. Настанови з керування мережею безпеки».

22. НД ТЗІ 3.7-001-99 Методичні вказівки щодо розробки технічного завдання на створення комплексної системи захисту інформації в автоматизованій системі. – Чинний від 1999-07-01.

23. НД ТЗІ 1.1.-002-99 Загальні положення щодо захисту інформації в комп'ютерних системах від несанкціонованого доступу. – Чинний від 1999-07-01.

24. НД ТЗІ 1.1.-003-99 Термінологія в галузі захисту інформації в комп'ютерних системах від несанкціонованого доступу. – Чинний від 1999-07-01.

25. НД ТЗІ 2.5-004-99 Критерії оцінки захищеності інформації в комп'ютерних системах від несанкціонованого доступу. – Чинний від 1999-07-01.

26. НД ТЗІ 3.6-001-2000 Технічний захист інформації. Комп'ютерні системи. Порядок створення, впровадження, супроводження та модернізації засобів технічного захисту інформації від несанкціонованого доступу. – Чинний від 2000-12-25.

27. Головань С. М. та ін. Нормативне забезпечення інформаційної безпеки / С. М. Головань, О. С. Петров, В. О. Хорошко, Д. В. Чирков, Л. М. Щербак // За ред. професора В. О. Хорошко. ДУІКТ 2008. – 533 с.

28. Термінологічний довідник з технічного захисту інформації на об'єктах інформаційної діяльності / С. Р. Коженевський, Г. В. Кузнецов, В. О. Хорошко, Д. В. Чирков / За ред. проф. В.О. Хорошка. – К. : ДУІКТ. – 365 с.

29. Одіяненко О. В. та ін. Виявлення небезпечних сигналів при радіомоніторингу / О. В. Одіяненко, В. О. Хорошко, Д. В. Чирков, Я. Л. Шатило // Сучасна спеціальна техніка № 2(29), 2012. – С. 19–26.

30. Шатило Я. Л. Цифровые методы обработки информационных сигналов при радиомониторинге / Я. Л. Шатило // Сучасний захист інформації № 1, 2012/ – С. 44–48.

31. Мазуренко Л. Н. Модель анализа структурной живучести сложной технической системы / Л. Н. Мазуренко, В. А. Хорошко, Я. Л. Шатило // Сучасна спеціальна техніка № 4, 2011. – С. 68–74.

32. Мороз Є. С. Методи програмування для систем захисту інформації / Є. С. Мороз, А. М. Чернишев, Я. Л. Шатило // Матеріали І-ої МНТК “Захист інформації і безпека інформаційних систем” Львів, 2012. – С. 178.

33. Згуровський М. З. Основи системного аналізу / М. З. Згуровський, Н. Д. Панкратов. – К. : Вид. група ВНУ, 2007. – 544 с.

34. Макклеллан Дж. Х. Применение теории чисел в цифровой обработке сигналов / Дж. Х. Макклеллан, Ч. М. Рейдер. – М. : Радио и связь, 1983. – 264 с.
35. Баранов В.Л. Моделирование физических процессов в информационной безопасности / В. Л. Баранов, М. В. Капустян, Р. М. Костюченко, В. О. Хорошко. – К. : Вид. ДУИКТ, 2009. – 175 с.
36. Арфкен Г. Математические методы в физике / Г. Арфкен. – М. : Атомиздат, 1970. – 712 с.
37. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб. : Изд. Питер, 2002. – 608 с.
38. Скорик В. Н. Мультимикроспроцессорные системы / В. Н.Скорик, А. Е. Степанов, В. А. Хорошко. – К. : Техніка, 1989. – 192 с.
39. Бегма Т. В. Математичні моделі функціонування складних систем / Т. В. Бегма, М. В. Капустян, В. О. Хорошко // Вісник СНУ ім. В. Даля, № 7(161), 2.1, 2011. – С. 252–263.
40. Рембовский А. М. Построение многофункциональных систем радиоприемных устройств и модулей / А. М. Рембовский, А. В. Ашихмин, А. Р. Сергиенко // Специальная техника, № 4, 2005. – С. 32–41.
41. Егоров Ф. И. Вычислительные модули для системы защиты информации / Ф. И. Егоров, В. С. Орленко, В. А. Хорошко // Зб. наук. праць ВІКНУ ім. Т. Шевченка, вип. № 11, 2008. – С. 117–124.
42. Анин Б. Радиошпионаж. / Б. Анин, А. Петрович – М. : Международные отношения, 1996. – 448 с.
43. Максименко Г.А. Методы выявления, обработки и идентификации сигналов радиозакладных устройств / Максименко В.А., Хорошко А.В. - ООО “Полиграфконсалтинг”, Киев, 2004.- 317 с.
44. Ван Трис Т. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. 1 / Ван Трис Т. – М. : Сов. радио, 1972. – 754 с.
45. Титчмарш Е. Введение в теорию интегралов Фурье / Е. Титчмарш. – М. : – Л. ГИТТЛ, 1968. – 497 с. 2 р.

46. Омельченко В. А. Распознавание сигналов по спектру в условиях априорной неопределенности / В. А. Омельченко. – Харьков : Изд. ХНРЭ, 1989. – 100 с.

47. Гуткин Л. С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества / Л. С. Гуткин. – М. : Сов. радио, 1975. – 367 с.

48. Рембовский А. М. Радиомониторинг – задачи, методы, средства / А. М. Рембовский, А. В. Ашихмин, В. А. Козьмин // Под ред. А. М. Рембовского. 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Горячая линия – Телеком, 2010. – 624 с.

49. Хорошко В. А. Выявление информационных сигналов / В. А. Хорошко, Я. Л. Шатило // Інформаційна безпека № 1(7), 2012. – С. 43–47.

50. Бриль В. М. Обеспечение сохранности информации в системах обработки данных / В. М. Бриль // Защита информации, 1966. – С. 50–55.

51. Хорошко В. А. Определение свойств опасных сигналов / В. А. Хорошко, Я. Л. Шатило // Захист інформації, № 2, 2012. – С. 5–9.

52. Ван Трис Т. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. 1 / Ван Трис Т. – М. : Сов. радио, 1972. – 754 с.

53. Шатило Я. Л. Підвищення ефективності функціонування комплексів технічного захисту інформації / Я. Л. Шатило // Матеріали Міжвідомчої науково-практичної конференції «Інформаційна безпека у війсьній сфері. Сучасний стан та перспективи розвитку» Київ, 2015. – С. 197–201.

54. Гуткин Л. С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества / Л. С. Гуткин. – М. : Сов. радио, 1975. – 367 с.

55. Долуханов М. П. Распространение радиоволн / М. П. Долуханов. – М. : Связь, 1972. – 336 с.

56. Специальная техника и информационная безопасность / Под ред. В. И. Кирина. – М. : 2000. – 485 с.

57. Рабинер Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гоулд. – М. : Мир, 1978. – 848 с.

58. Ярочкин В. И. Безопасность информационных систем / В. И. Ярочкин – М. : «Ось-86», 1996. – 320 с.

59. Омельченко В. А. Основы спектральной теории распознавания сигналов / В. А. Омельченко. – Х. : Вища школа, 1983. – 156 с.

60. Омельченко В. А. Распознавание сигналов по спектру в условиях априорной неопределенности / В. А. Омельченко. – Х. : Изд. Харьковского университета, 1979. – 100 с.

61. Хорошко В. А., Чекатов А. А. Методы и средства защиты информации / Под ред. Ю. С. Ковтонюка. – К. : Юниор, 2003. – 504 с.

62. Хорев А.А. Способы и средства защиты информации: учеб. пособие. – М.: МО РФ, 1998. – 316 с.

63. Самохвалов Ю. Я., Темніков В. О., Хорошко В. А. Організаційно-технічне забезпечення захисту інформації / За ред. проф. В. О.Хорошка. – К. : Вид-во НАУ, 2002. – 20 с.

64. Свами М. Графы, сети и алгоритмы / М. Свами, К. Тхуласираман. – М. : Мир, 1984. – 456 с.

65. Кобозева А. А. Анализ информационной безопасности / А. А. Кобозева, В. А. Хорошко. – К. : Изд. ГУИКТ, 2009. – 251 с.

66. Вентцель А. Д. Курс теории случайных процессов. / А.Д. Вентцель. – М. : Наука, 1996. – 400 с.

67. Шатило Я. Л. Оцінка ефективності експлуатації систем радіомоніторингу / Я.Л. Шатило // Сучасний захист інформації № 2, 2012 – С. 53-57.

68. Виноградов И. М. Ряд Эджворта / И. М. Виноградов. – М. : Советская энциклопедия, 1977–1985.

69. Чернышев А. Н. Создание банка данных для систем мониторинга / А. Н Чернышев, Я. Л. Шатило // Тези доповідей III МНПК «Інформаційні технології та захист інформації». – Х. : 2012. – С. 213.

70. Хорошко В. А. Ускоренный метод анализа опасных сигналов в радиомониторинге / В. А. Хорошко, Я. Л. Шатило // Інформаційна безпека, № 2, 2013. – С. 170–177.

71. Шатило Я. Л. Організація технічного обслуговування мережі передачі інформації / Я. Л. Шатило // Збірник матеріалів МНПК «Інформаційні

технології та безпека інформаційно-комунікаційних систем», Вінниця, 2012. – С. 290–291.

72. Одияненко Е. В. Анализ надежности и живучести технических систем защиты информации / Е. В.Одияненко, Я. Л. Шатило // Матеріали МНТК «Інформаційні управляючі системи та технології», ІУСТ-Одеса, 2013. – С. 245–247.

73. Бендат Д. Прикладной анализ случайных данных / Д. Бендат, А Пирсол. – М. : Мир, 1989. – 540 с.

74. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. Т. 1 / Ж. Макс. – М. : Мир, 1983. – 312 с.

75. Серженко А. В. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Серженко. – СПб. : Изд. Питер, 2002. – 608 с.

76. Понамарева И. Д. Сверхбыстрый спектральный анализ / И. Д. Понамарева, Г. В. Цепков // Проблемы управления и информатики. № 1, 1998. – С. 107–114.

77. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее применение. В 2-х томах / В. Феллер. – М. : Мир, 1967.

78. Єгоров Ф. І. Визначення оптимальної періодичності форм обслуговування в складній системі / Ф. І. Єгоров, О. О. Тіскіна, В. О. Хорошко // Інформатика та математичні методи в моделюванні, № 2, 2011. – С. 148–156.

79. Баранов П. Є. Розрахунки динамічних процесів, що відбуваються в системах інформації / П. Є.Баранов, О. О. Тіскіна, В. О. Хорошко // Інформаційна безпека. № 2, 2011. – С. 130–137.

80. Кобозева А. А. Использование графов для анализа структуры террористических сетей / А. А. Кобозева, В. А. Хорошко // Захист інформації, № 1, 2008. – С. 22–31.

81. Работа комплекса АРК-ПК-12-3К в пакете СМО-Д5. Руководство пользователя. – М. : ЗАО «ИРКОС», 1997. – 34 с.

82. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления / Г. М. Фихтенгольц. – М. : Наука, 1969. – 608 с.

83. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М. : Наука, 1972.

84. Михайлов В. П. Дифференциальные уравнения в частных производных / М. : Наука, 1976.
85. Стрэттон Дж. А. Теория электромагнетизма: Пер. М. С. Рабиновича, В. М. Харитоновой // Под ред. Проф. С. М. Рытова. – М. : Огиз. Гос. Изд-во технико-теоретической литературы, 1948, Ленинград. – 539 с.
86. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. / И. Шахнович. – М. : Техносфера, 2004.
87. Бриль В. М. Модель системы защиты информации / В. М. Бриль // Защита информации, 1988. – С. 49–51.
88. Бриль В. М. К построению рациональной системы управления защитой информации в системах обработки данных / В. М. Бриль // Захист інформації, № 2(3), 2000. – С. 9–13.
89. Бриль В. М. Модель типовых угроз в інформаційних системах обробки даних / В. М. Бриль // Захист інформації, № 3, 2001. – С. 31–33.
90. Бриль В. М. Оцінка ефективності застосування технічних засобів захисту інформації / В. М. Бриль // Захист інформації, № 2(9), 2002. – С. 30–34.
91. Бриль В. М. Требования к автоматизированным средствам контроля технического состояния систем защиты информации / В. М. Бриль, Е. В. Иванченко, В. А. Хорошко // Інформаційна безпека, № 2(10), 2013. – С. 19-25.
92. Бриль В. М. Основы национальной безопасности. Пособие / В. М. Бриль. – К. : ПВП «Задруга», 2014. – 186 с.
93. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника / В. И. Тихонов. – М. : Сов. Радио, 1966. – 678 с.
94. Котельников В. А. Теория потенциальной помехоустойчивости / В. А. Котельников. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1956. – 152 с.
95. Бриль В. М. Программно-аппаратный комплекс мониторинга опасных сигналов / В. М. Бриль, Я. Л. Шатило // Захист інформації 2014 (спеціальний випуск)
96. Пухов Г.Е. Дифференциальные преобразования и математическое моделирование физических процессов / Г.Е. Пухов. – К.: Наукова думка, 1986. – 160 с.

97. <<http://www.bnti.ru>
98. <http://www.dstzi.gov.ua>
99. <http://www.cctvfocus.ru>
100. <http://www.install.in.ua/goods/video> - Відеоспостереження і охоронні системи
101. http://kaschtan.com.ua/shop/category_23_Videonablyudenie.html – Відеоспостереження, спеціалізована відео техніка.
102. <http://www.bastion.kiev.ua/Main/Videonablyudenie> – Системи відео-спостереження.
103. www.nsgic.org
104. www.fgdc.gov
105. <http://www.dstzi.gov.ua>

Формирование вербальной модели объекта исследования

Формирование вербальной модели не предусматривает составления перечня событий, которые могут происходить в этой системе (комплексе), определения для структурно-автоматной модели базовых событий, а также установления соответствующих для каждой базовой события условиях обстоятельств.

События отражают начало и конец временного интервала, который соответствует определенному состоянию системы и является фрагментом дискретно-непрерывного случайного процесса. Поэтому при формировании их перечня следует изображать события парами. Итак, «пара событий» – это два события, которые изображают начало и окончание неразрывного (непрерывного) временного интервала, который соответствует пребыванию объекта исследования в одном состоянии. Функционирование этой «системы временного обслуживания (СВО)» можно рассматривать, начиная с события «Начало ожидания каналом новоприбывших задач». Все пары события приведены в табл. А.1.

Особенность дискретно-непрерывных стохастических систем в том, что в момент перехода из одного состояния в другое по оси времени может быть изображено одно событие. Но в действительности в объекте исследования в момент перехода существует два события. Первое – фиксирует окончания пребывания в одном состоянии, второе – начало пребывания в другом состоянии. Поэтому в этих двух событиях следует различать «базовое событие» и «сопутствующее событие». Несмотря на то, «базовое» и «сопутствующее» события происходят в один момент времени, «сопутствующее событие» всегда появляется после «базового события». Все это сказанное иллюстрирует рис. А.1.

Теперь проведем анализ представленных в таблице А.1 событий с целью определения «базовых» и «сопутствующих» событий. Анализ сложившегося перечня событий с целью установления базовых для структурно-автоматной модели событий проводится по следующему плану:

1. Определяются независимые события во время функционирования объекта исследования. На независимые события не влияет появление других событий в объекте исследования. В СВО такими событиями является «приход заявки на обслуживание» и «Потеря работоспособности канала обслуживания». Эти события вносятся в перечень базовых событий. Все остальные события являются зависимыми и среди них можно различить базовые и сопутствующие события. Зависимое событие сопутствующее, если оно происходит в тот же момент времени, что и событие-предшественник.

2. Проводится анализ соотношения между длительностями временных интервалов всех пар событий. Если интервал времени между определенной парой событий по сравнению с интервалами между другими парами событий очень малы и приемлемым является допущение, что эта продолжительность равна нулю, то в дальнейшем рассмотрении эта пара событий будет предоставляться в один момент времени.

Таблица А.1.

№ пары событий	Событие, которое фиксирует начало	Событие, которое фиксирует окончание	Средняя продолжительность временного интервала между событиями
1	Начало ожидания каналом новоприбывшей заявки (заявки в очереди отсутствуют)	Окончание ожидания каналом новоприбывшей заявки	t_1
2	Начало ожидания каналом новоприбывшей заявки (заявки в очереди отсутствуют)	Потеря работоспособности канала обслуживания	t_2
3	Приход заявки на обслуживание	Передача заявки на обслуживание (если очереди нет, а канал работоспособен и свободен)	t_3
4	Приход заявки на обслуживание	Постановка заявки в очередь (если канал занят или в ремонте и в очереди есть свободное место)	t_4

5	Приход заявки на обслуживание	Потеря заявки (если канал занят или в ремонте и в очереди нет свободного места)	t_5
6	Начало пребывания заявки в очереди	Окончание пребывания заявки в очереди	t_6
7	Начало обслуживания заявки	Окончание обслуживания заявки	t_7
8	Начало обслуживания заявки	Прерывание обслуживания заявки из-за потери работоспособности канала и передача ее в очередь	t_8
9	Начало обслуживания	Потеря заявки (из-за потери работоспособности канала и отсутствие мест в очереди)	t_9
10	Начало ремонта канала обслуживания	Окончание ремонта канала обслуживания	t_{10}

В результате событие, фиксирующее окончание временного интервала нахождения объекта исследования в определенном состоянии, получает статус сопутствующего события, фиксирующего начало временного интервала нахождения объекта исследования в этом же состоянии. Такая ситуация изображена на рис. А2.

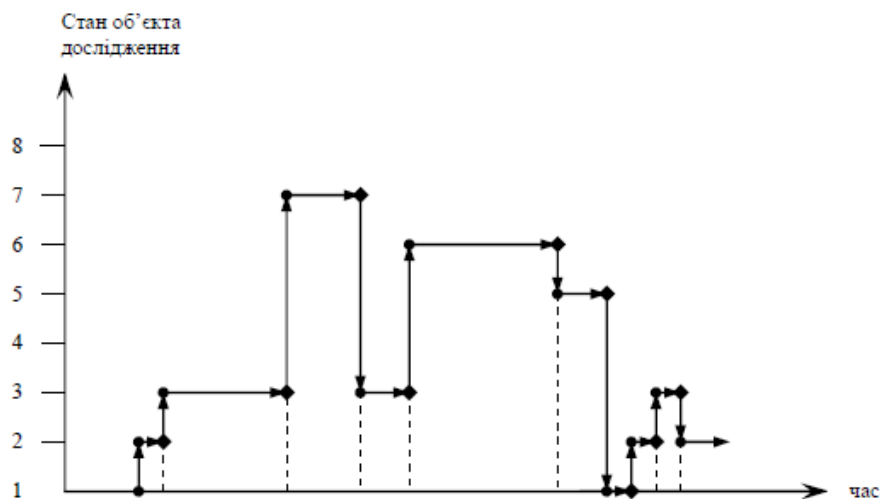


Рис. А1. Фрагмент дискретно-непрерывного случайного процесса, на котором показано «базовые» и «сопутствующие» события:

● ■ базовые события, сопутствующие события

В СВО так же рассматриваются такие события: «Приход заявки на обслуживание» – «Передача заявки на обслуживание» (если очередь заявок отсутствует, а канал является работоспособным и свободным), «Приход заявки на обслуживание» – «Постановка заявки в очередь» (если канал занят или в ремонте и в очереди есть свободное место), «Приход заявки на обслуживание» – «Потеря заявки» (если канал занят или в ремонте и в очереди нет свободного места), такое условие является приемлемым и поэтому каждая из этих трех пар событий в последующем рассмотрении фиксируется в один момент времени. При этом все другие события, а именно «Передача заявки на обслуживание», «Постановка заявки в очередь», «Потеря заявки» получают статус сопутствующих с событием «Переход заявки на обслуживание». Так что эти события в модели будут представлены как сопутствующие.

Определяются базовые события. Базовыми событиями являются события, которые определяют окончания пребывания системы в определенном состоянии, то есть событием – предыдущим для сопутствующего события, фиксирует начало пребывания системы в следующем состоянии. В СВО, рассматривается эта задача, имеет такое решение:

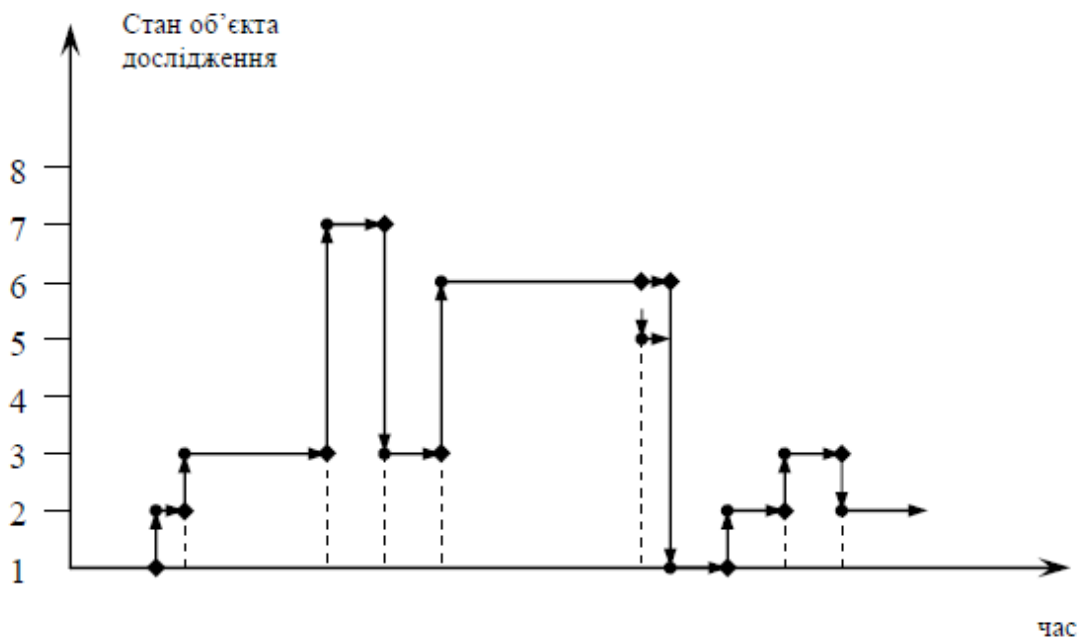


Рис. А3. Фрагмент дискретно-непрерывного случайного процесса, иллюстрирующий реализацию допущения о пренебрежении времени пребывания в состоянии % и соответствует преобразованию базового события в сопутствующее

Определяются базовые события. Базовыми событиями являются события, которые определяют окончания пребывания системы в определенном состоянии, то есть событием - предыдущем для сопутствующего события, фиксирует начало пребывания системы в следующем состоянии. В СВО рассматриваемая задача имеет такое решение:

а) для события «Приход заявки на обслуживание» сопутствующим событием будет «Окончание ожидания каналом новоприбывшей заявки»;

б) для события «Потеря работоспособности канала обслуживания» сопутствующими событиями будут: «Прерывание обслуживания заявки из-за потери работоспособности канала и передача ее в очередь», «Потеря заявки» (в ситуации, когда в момент потери работоспособности заявка находилась на обслуживании и в очереди не было свободного места) и «Начало ремонта канала обслуживания»;

в) для события «Постановка заявки в очередь» сопутствующим событием будет «Начало пребывания заявки в очереди»;

г) для события «Окончание ожидания каналом новоприбывшей заявки» и «Окончание пребывания заявки в очереди» сопутствующим событием будет «Начало обслуживания заявки»;

д) для события «Окончание обслуживания заявки» и «Окончание ремонта канала обслуживания» сопутствующими событиями будут «Начало ожидания каналом новоприбывшей заявки» (когда в очереди отсутствуют заявки), «Окончание пребывания заявки в очереди» (если в очереди есть хотя бы одна заявка) и «Начало обслуживания заявки».

Представлены результаты анализа в виде перечня базовых событий и к каждому базовому событию поданы соответствующие сопутствующие события. Условное обозначение каждого события состоит из двух цифр: первая цифра означает порядковый номер базового события, вторая цифра 0 указывает на то, что это событие является именно базовым, а цифры 1, 2, 3 ... определяют номер сопутствующего события для данного базового.

Событие 1.0 – «Приход заявки на обслуживание»; Событие 1.1 – «Окончание ожидания каналом новоприбывшей заявки»; Событие 1.2 – «Передача заявки на обслуживание»; Событие 1.3 – «Постановка заявки в очередь»; Событие 1.4 – «Потеря заявки».

Событие 2.0 – «Окончание обслуживания заявки»; Событие 2.1 – «Начало ожидания каналом новоприбывшей заявки» (когда в очереди отсутствуют заявки); Событие 2.2 – «Окончание пребывания заявки в очереди» (если в очереди есть хотя бы одна заявка); Событие 2.3 – «Начало обслуживания заявки».

Событие 3.0 – «Потеря работоспособности канала обслуживания»; Событие 3.1 – «Прерывание обслуживания заявки из-за потери работоспособности канала и передача ее в очередь»; Событие 3.2 (1.4) – «Потеря заявки» (в ситуации, когда в момент потери трудоспособности заявка находилась на обслуживании и в очереди отсутствовало свободное место); Событие 3.3 – «Начало ремонта канала обслуживания».

Событие 4.0 – «Окончание ремонта канала обслуживания»; Событие 4.1 (2.1) – «Начало ожидания каналом новоприбывшей заявки» (когда в очереди отсутствуют заявки); Событие 4.2 (2.2) – «Окончание пребывания заявки в очереди» (если в очереди хотя бы одна заявка); Событие 4.3 (2.3) – «Начало обслуживания заявки».

Итак, для построения модели базовыми событиями являются определенные 4 события. Теперь для каждого базового события нужно определить все условия и обстоятельства, при которых эти события могут происходить, и проверить наличие всех сопутствующих событий в уже определенных базовых событиях.

Событие 1.0 «Приход заявки на обслуживание» может происходить в следующих случаях:

1) Очередь заявок отсутствует и канал обслуживания является работоспособным и свободным, в этом случае заявка поступает непосредственно в канал обслуживания. В этих обстоятельствах одновременно

с событием «Приход заявки на обслуживание» происходит событие «Окончание ожидания каналом новоприбывшей заявки» и событие «Передача заявки на обслуживание».

2) Очередь заявок отсутствует или в очереди есть заявки и есть место для вновь прибывшей заявки, при этом канал обслуживания занят обслуживанием заявки, в этом случае заявка поступает в очередь. При данных обстоятельствах одновременно с событием «Приход заявки на обслуживание» происходит событие «Постановка заявки в очередь».

3) Очередь заявок отсутствует или в очереди есть заявки и есть место для вновь прибывшей заявки, при этом канал обслуживания нетрудоспособен (находится в ремонте)- в этом случае заявка поступает в очередь. При данных обстоятельствах одновременно с событием «Приход заявки на обслуживание» происходит событие «Постановка заявок в очередь».

4) В очереди нет свободного места для вновь прибывшей заявки. Канал обслуживания является или занятым или нетрудоспособным и находится в ремонте. При данных обстоятельствах одновременно с событием «Приход заявки на обслуживание» происходит событие «Потеря заявки».

Факт (момент) окончания обслуживания заявки в канале фиксирует событие 2.0 «Окончание обслуживания заявки». Это событие может происходить при условии, что канал обслуживания работоспособный и занят обслуживанием заявки и при таких обстоятельствах:

1) Очередь заявок отсутствует. По этим обстоятельством с событием «Окончание обслуживания заявки» фиксируется (происходит) событие «Начало ожидания каналом новоприбывшей заявки».

2) В очереди есть заявки и есть место для вновь прибывшей заявки ($3 + j$). В очереди нет свободных мест и потеряно заявок ($i = 0, \dots, k$), которые пришли во время обслуживания текущей заявки.

При обстоятельствах от 2-й до ($3 + j$)-й одновременно с событием «Окончание обслуживания заявки» происходят события «Окончание пребывания заявки в очереди» и «Начало обслуживания заявки».

Во время функционирования СВО может произойти *событие 3.0* «Потеря работоспособности канала обслуживания» в следующих случаях:

1) Канал обслуживания не занят обслуживанием заявок, ибо очередь заявок отсутствует. При этих обстоятельствах одновременно с событием «Потеря работоспособности канала обслуживания» происходит событие «Начало ремонта канала обслуживания».

2) Канал обслуживания занят обслуживанием заявок и в очереди есть свободное место для заявки, которая возвращается в очередь во время прерывания ее обслуживания. При таких обстоятельствах одновременно с событием «Потеря работоспособности канала обслуживания» происходит событие «Прерывание обслуживания заявки из-за потери работоспособности канала и передача ее в очередь» и событие «Начало ремонта канала обслуживания».

3) Канал обслуживания занят обслуживанием заявки, а в очереди свободных мест нет. При таких обстоятельствах одновременно с событием «Потеря работоспособности канала обслуживания» происходит событие «Потеря заявки» и событие «Начало ремонта канала обслуживания». Обратим внимание на то, что за этим обстоятельством к количеству потерянных заявок, которые могут поступить за время ремонта канала обслуживания, будет добавляться еще одна заявка. Эта заявка была на обслуживании и не закончилось из-за потери работоспособности канала обслуживания.

Событие 4.0 «Окончание ремонта канала обслуживания» происходит при условии, что канал обслуживания был нетрудоспособен и находился в ремонте в следующих случаях:

1) Очередь заявок отсутствует. При этих обстоятельствах одновременно с событием «Окончание ремонта канала обслуживания» происходит событие «Начало ожидания каналом новоприбывшей заявки».

2) В очереди есть хотя бы одна заявка на обслуживании. $(3 + j)$ Все места в очереди заполнены заявками и потеряно j заявок ($j = 0, \dots, h$), которые пришли во время текущего ремонта канала обслуживания.

При таких обстоятельствах от 2-й до $(3 + j)$ -й одновременно с событием «Окончание ремонта канала обслуживания» происходят события «Окончание пребывания заявки в очереди» и «Начало обслуживания заявки взятой из очереди».

В результате можно сделать вывод о том, что в рассматриваемой СВО базовыми событиями для модели является 4 события, а именно «Приход заявки на обслуживание», «Окончание обслуживания заявки», «Потеря работоспособности канала обслуживания» и «Окончание ремонта канала обслуживания». Все остальные события являются сопутствующими.

Формирование структурно-автоматной модели объекта исследования на основе базовых событий

Формирование структурно-автоматной модели начинается с определения компонент вектора состояний системы, которыми можно отобразить состояние системы в любой момент времени.

Б1. Структура вектора состояний комплекса

Задача определения структуры вектора состояний комплекса является важной составляющей в технологии разработки марковских моделей. Она предусматривает: выявление минимального набора определяющих компонент, чтобы характеризовать объект исследования в каждый момент времени, определение диапазона изменения значений для каждой компоненты, а также их начальные значения.

Результат такого подхода иллюстрирует структура вектора состояний СВО, представленная тремя компонентами:

V_1 – отображает текущее количество заявок в очереди (значение компоненты V_1 находится в пределах $0 \leftarrow V_1 \leftarrow m$, где m - количество мест в очереди). Начальное значение компоненты $V_1 = 0$;

V_2 – указывает, в каком состоянии находится канал обслуживания ($V_2 = 0$, если канал и оборудование неисправны; $V_2 = 1$, если канал работоспособен и свободен; $V_2 = 2$, если канал работоспособен и занят обслуживанием заявок; начальное значение компоненты $V_2 = 1$);

V_3 – отображает текущее количество потерянных заявок, поступающих в СВО, когда отсутствуют места в очереди:

а) за время обслуживания одной заявки (значение компоненты V_3 изменяется в пределах от 0 до k , где k – количество заявок, которые могут прийти в СМО за время обслуживания одной заявки);

б) за время ремонта канала обслуживания (значение компоненты V_3 изменяется в пределах от 0 до h , где h – количество заявок, которые могут

прийти в СМО за время ремонта канала обслуживания). Начальное значение компоненты $V_3 = 0$.

Б2. Формирование компонент структурно-автоматной модели

1. Формирование множества формальных параметров.

Множество формальных параметров модели составляют константы, определяемые для конкретного объекта исследования. В исследуемом объекте, т.е. в СВО этими компонентами являются:

m – количество мест в очереди на обслуживание;

ν – интенсивность входного потока заявок;

T_{03} – среднее значение времени обслуживания одной заявки;

$\gamma = 1/T_{03}$ – интенсивность потока событий «окончания обслуживания заявок»;

ТПС – среднее значение времени пребывания канала обслуживания в работоспособном состоянии;

$\lambda = 1/\text{ТПС}$ – интенсивность потока событий «потеря работоспособности канала обслуживания»;

ТРК – среднее значение времени ремонта канала обслуживания;

$\mu = 1/\text{ТРК}$ – интенсивность потока событий «окончания ремонта канала обслуживания»;

k – количество заявок, которые могут прийти в СМО за время обслуживания одной заявки;

P_{oo} – вероятность того, что за время обслуживания одной заявки не подойдет ни одной новой заявки;

P_{oo}, \dots, P_{ok} – вероятность того, что за время обслуживания одной заявки в СВО поступит 1, 2, ..., k заявок соответственно;

h – количество заявок, которые могут прийти в СВО за время ремонта канала обслуживания;

P_{PO} – вероятность того, что за время ремонта канала обслуживания не поступит ни одной новой заявки P_{P1}, \dots, P_{Ph} – вероятность того, что за время ремонта канала обслуживания поступит 1, 2, ..., h заявок соответственно.

2. Формирование множества базовых событий

Перечень базовых событий для исследуемого объекта задает его вербальная модель, в которой отражена структура и алгоритм поведения. Для СВО, рассматривается как пример, определенный в приложении А, перечень базовых событий выглядит так:

Событие 1.0 – «Приход заявки на обслуживание».

Событие 2.0 – «Окончание обслуживания заявки».

Событие 3.0 – «Потеря работоспособности канала обслуживания».

Событие 4.0 – «Окончание ремонта канала обслуживания».

Б3. Формализованное изображение условий и обстоятельств

Входную информацию дает вербальная модель объекта исследования, где сделано описание обнаруженных для каждого события условий и обстоятельств. Формализованное изображение условий и обстоятельств реализуется в виде логических выражений с помощью компонент вектора состояний и необходимых формальных параметров. При формировании логических выражений необходимо придерживаться следующих правил:

1) если при формализованном подходе условия или обстоятельства указываются значением компонент, которые являются больше (или меньше) некоторой величины и в дальнейшем в правиле модификации компонент вектора состояний (ВС) эта компонента должна расти (или уменьшаться), то в логическом виде надо указывать верхнюю (нижнюю) границу этой компоненты;

2) если значение компоненты ВС в записываемом выражении условия и обстоятельства соответствует начальному значению, то она может быть опущена.

Методика формирования логических выражений представлена в нижеследующих решениях для СВО.

Для события 1.0 – «Приход заявки на обслуживание» в этом изображении не существует условия для ее реализации. Кроме этого, это событие является независимым. Но существуют обстоятельства, при которых это событие может

происходить. При формировании вербальной модели выявлено 4 обстоятельства:

Обстоятельство 1 – в очереди отсутствуют заявки на канал обслуживания; канал работоспособен и свободен; логическое выражение для этого обстоятельства имеет следующий вид $(V1 = 00) \wedge (V2 = 1)$;

Обстоятельства 2 и 3 нужно объединить в таком виде: очередь заявок отсутствует или в очереди есть заявки и есть место \wedge для вновь прибывшей заявки, при этом канал обслуживания работоспособен и занят обслуживанием заявки или нетрудоспособен и находится в ремонте. Такое объединение позволяет подать обстоятельства 2 и 3 одним логическим выражением: $(V1 < m) (V2 = 2) \vee (V2 = 0)$.

Формализованное изображение обстоятельства 4 будет иметь два выражения, в зависимости от того, что потеря заявок происходит, когда канал обслуживания является занятым, или он является нетрудоспособным и находится в ремонте. Это обусловлено тем, что количество потерянных заявок за время обслуживания одной заявки и за время ремонта канала обслуживания различна;

Обстоятельство 4.1 – в очереди нет свободного места для вновь прибывшей заявки, количество потерянных заявок лежит в пределах от 0 до $k-1$, при этом канал обслуживания является занятым; логическое выражение для этого обстоятельства имеет следующий вид $(V1 = m) \wedge (V2 = 2) \vee (V3 = <k-1)$;

Обстоятельство 4.2 – в очереди нет свободного места для вновь прибывшей заявки, количество потерянных заявок лежит в пределах от 0 до h , при этом канал обслуживания является нетрудоспособным и находится в ремонте; логическое выражение для этого обстоятельства имеет следующий вид $(V1 = m) \wedge (V2 = 0) \wedge (V3 = < h)$.

Событие 2.0 – «Окончание обслуживания заявки» может происходить при условии, что канал обслуживания работоспособный и занят обслуживанием заявки, т.е. $V2 = 2$, и в следующих случаях:

Обстоятельство 1 – очередь заявок отсутствует, т.е. $V1 = 0$;

Обстоятельство 2 – очередь заявок существует, но всегда есть место для вновь прибывшей заявки, то есть $(V1 > 0)$ and $(V1 < m)$;

Обстоятельство 3 – места в очереди заполнены заявкам, т.е. $V1 = m$;

Обстоятельство 4 – места в очереди заполнены заявкам и потеряна одна заявка, пришедшая во время обслуживания текущей заявки, то есть $(V1 = m)$ and $(V3 = 1)$;

Обстоятельство $\{4 + (i-1)\}$ - все места в очереди заполнены заявкам и потеряно i заявок ($i = 2, \dots, k$), которые пришли во время обслуживания текущей заявки, то есть $(V1 = m)$ and $(V3 = i)$.

Событие 3.0 – «Потеря работоспособности канала обслуживания» может происходить по следующим трем обстоятельствам:

Обстоятельство 1 – очередь заявок отсутствует, а канал обслуживания работоспособен и свободен, то есть $(V1 = 0)$ and $(V2 = 1)$;

Обстоятельство 2 – канал обслуживания работоспособен и занят обслуживанием заявки, существует очередь заявок и есть место в очереди для заявки, обслуживание которой будет прервано, то есть $(V1 > m)$ and $(V2 = 2)$;

Обстоятельство 3 – канал обслуживания работоспособен и занят обслуживанием заявки, места в очереди заполнены заявкам и есть потерянные заявки, пришедшие во время обслуживания текущей заявки, то есть $(V1 = m)$ and $(V2 = 2)$ and $(V3 = < k)$.

Событие 4.0 «Окончание ремонта канала обслуживания» может происходить при условии, что канал обслуживания был нетрудоспособен и находился в ремонте, т.е. $V2 = 0$, и при таких обстоятельствах:

Обстоятельство 1 – очередь заявок отсутствует, т.е. $V1 = 0$;

Обстоятельства 2 и 3 нужно объединить в таком виде: в очереди есть заявки и при этом не всегда есть место для вновь прибывшей заявки, то есть $(V1 > 0)$ and $(V1 = < m)$;

Обстоятельство 4 – места в очереди заполнены заявкам и потеряна одна заявка, пришедшая во время текущего ремонта канала обслуживания или

находилась на обслуживании, когда канал обслуживания потерял трудоспособность, то есть ($V1 = m$) and ($V3 = 1$);

Обстоятельство $\{4 + j\}$ – места в очереди заполнены заявкам и потеряно j заявок ($j = 1, 2, \dots, \dots, h$), которые пришли во время текущего ремонта канала обслуживания, т.е. ($V1 = m$) and ($V3 = j + 1$);

При формировании логического выражения учтено, количества потерянных заявок, которые могут поступить за время ремонта канала обслуживания, будет добавляться еще одна заявка. Эта заявка была на обслуживании, не закончилось из-за потери работоспособности канала обслуживания.

Б4. Формирование формул для расчета интенсивности переходов

Интенсивность события 1.0 для текущих состояний при всех обстоятельствах определяет интенсивность входного потока заявок v .

Интенсивность события 2.0 при 1-м и 2-м обстоятельствах определяет интенсивность потока обслуживания γ , при 3-м и 4-м обстоятельствах нужно учитывать, что обслуживание заявки может сопровождаться потерей новоприбывших заявок. Поэтому обслуживание текущей заявки при этих обстоятельствах в модели отображается $k + 1$ состояниями и соответственно интенсивности переходов из этих состояний определяются интенсивностью обслуживания и вероятностями того, что за время обслуживания текущей заявки в систему не придет ни одной заявки P_{oo} или придет i заявок P_{oi} ($i = 1 \dots k$). Следовательно, при 3-м обстоятельстве интенсивность перехода определяется γP_{oo} , а при 4-м обстоятельстве и всех следующих обстоятельствах – γP_{oi} .

Интенсивность события 3.0 при всех обстоятельствах определяет интенсивность потока нарушений работоспособности канала обслуживания – λ .

Интенсивность события 4.0 при 1-м, 2-м и 3-м обстоятельствах определяет интенсивность потока обновлений канала обслуживания μ , при 4-м обстоятельстве надо учесть, что ремонт канала обслуживания может сопровождаться потерей новоприбывших заявок. Поэтому в модели ремонт

канала в этих обстоятельствах подан последовательностью с $h + 1$ состояний. Согласно интенсивности переходов из этих состояний определяются интенсивностью потока обновлений канала обслуживания и вероятностями того, что за время текущего ремонта канала обслуживания в систему не придется ни одной заявки PPO , или придет i заявок PP ($i = 1 \dots h$). Следовательно, при 3-м обстоятельстве интенсивность перехода определяется μPPO , а при 4-м обстоятельстве и всех следующих обстоятельствах – μPP .

Б5. Формирование формул для расчета вероятностей альтернативных переходов

В рассматриваемой системе для всех событий не существует альтернативных переходов.

Б6. Формирование правил модификаций вектора состояний

Обстоятельство 1 события 1.0 приводит к тому, что заявка поступает непосредственно в канал на обслуживание правила модификации компонентом вектора состояния (ПМВС) для этой ситуации имеет вид: $V2: = 2$;

Обстоятельство 2 события 1.0 приводит к тому, что заявка поступает в очередь. ПМВС для этой ситуации выглядит $V1: = V1 + 1$.

Обстоятельство 1 события 2.0 приводит к тому, что канал обслуживания становится свободным. ПМВС для этой ситуации выглядит $V1: = 1$. После того, как произошло событие 2.0 при 2-м и 3-м обстоятельствах, на обслуживание поступает следующая заявка, взятая из очереди, и канал осуществляет ее обслуживание. Соответственно уменьшается количество заявок в очереди. ПМВС для этой ситуации имеет вид: $V1: = V1 - 1$.

Обстоятельство 4 события 2.0 приводит к тому, что количество заявок в очереди будет равно $m - 1$. Согласно ПМВС: $V1: = m - 1$

Обстоятельство 1 события 3.0 приводит к тому, что начинается ремонт канала обслуживания. ПМВС для этой ситуации имеет вид: $V2: = 0$.

Обстоятельство 2 события 3.0 приводит к тому, что заявка, которая была на обслуживании, возвращается в очередь и начинается ремонт канала обслуживания. ПМВС для этой ситуации имеет вид: $V1: = V1 + 1; V2: = 0$.

Обстоятельство 3 события 3.0 приводит к тому, что заявка, которая была на обслуживании, теряется и начинается ремонт канала обслуживания. ПМВС для этой ситуации имеет вид: $V2: = 0; V3: = 1$.

Обстоятельство 1 события 4.0 приводит к тому, что канал обслуживания становится работоспособным и свободным. ПМВС для этой ситуации имеет вид: $V2: = 1$.

Обстоятельства 2 и 3 события 4.0 дают возможность сразу начать обслуживание заявки и поэтому соответственно уменьшится длина очереди заявок. ПМВС для этой ситуации имеет вид: $V1: = V1 - 1; V2: = 2$.

Обстоятельство 4 события 4.0 дает возможность сразу начать обслуживание заявки, а количество заявок в очереди будет равна $m - 1$. Согласно ПМВС: $V1: = m - 1; V2: = 2$.

Б7. Формирование критерия для попадания в поглощающее состояние комплекса.

В этой СВО поглощающее состояние отсутствует. Алгоритм процедуры формализованного построения модели-посредника в виде графа состояний и переходов для структуры и поведения информационных систем и комплексов, как пример построения графа состояний и переходов на основе сформированной структурно-автоматной модели приведен в табл. Б1.

Конечно, граф состояний и переходов можно сформировать логическими рассуждениями. Однако для сложных систем и комплексов, в которых количество состояний определяется сотнями и даже больше, правильное построение графа состояний и переходов логическими рассуждениями становится проблематичным. Предложенная технология позволяет осуществить такое построение безошибочно.

Структурно-автоматная модель одноканальной системы массового обслуживания с ограниченной очередью (за время обслуживания одной заявки и за время ремонта канала обслуживания может прийти ограниченное количество заявок)

Таблица Б1

Базовые события	Условия и обстоятельства	ФРИП	ИИМВС
Приход заявки на обслуживание	1. $(V1=0) \text{ and } (V2=1) \text{ and } (V3=0)$	ν	$V2: =2$
	2. $(V1 < m) \text{ and } (V2=2) \text{ or } (V2=0) \text{ and } (V3=0)$	ν	$V1: =V1+1$
	3. $(V1=m) \text{ and } (V2=2) \text{ and } (V3 \leq k-1) \Leftarrow$	ν	$V3: =V3+1$
	4. $(V1=m) \text{ and } (V2=0) \text{ and } (V3 \leq h) \Leftarrow$	ν	$V3: =V3+1$
2.0 Окончание обслуживания заявки	1. $(V1=0) \text{ and } (V2=2) \text{ and } (V3=0)$	γ	$V2: =1$
	2. $[(V1 > 0) \text{ and } (V1 < m)] \text{ and } (V2=2) \text{ and } (V3=0)$	γ	$V1: =V1-1$
	3. $(V1=m) \text{ and } (V2=2) \text{ and } (V3=0)$	γP_{00}	$V1: =V1-1$
	4. $(V1=m) \text{ and } (V2=2) \text{ and } (V3=1)$	γP_{01}	$V1: m-1$
	***	***	$V3: =0$
	$V+(k-1). (V1=m) \text{ and } (V2=2) \text{ and } (V3=k)$	γP_{0k}	
3.0 Потеря трудоспособности канала обслуживания	1. $(V1=0) \text{ and } (V2=1) \text{ and } (V3=0)$	λ	$V2: =0$
	2. $(V1 < m) \text{ and } (V2=2) \text{ and } (V3=0)$	λ	$V1: =V1+1$ $V2: =0$
	3. $(V1=m) \text{ and } (V2=2) \text{ and } (V3 \leq k) \Leftarrow$	λ	$V2: =0$ $V3: =1$
4.0 Окончание ремонта канала обслуживания	1. $(V1=0) \text{ and } (V2=0) \text{ and } (V3=0)$	μ	$V2: =1$
	2. $[(V1 > 0) \text{ and } (V1 \leq m)] \text{ and } (V2=0) \text{ and } (V3=0) \Leftarrow$	μ	$V1: = V1-1$ $V2: =2$
	3. $(V1=m) \text{ and } (V2=0) \text{ and } (V3=1)$	μP_{p0}	$V1: =m-1$
	***	***	$V2: =2$
	3+h. $(V1=m) \text{ and } (V2=0) \text{ and } (V3=h+1)$	μP_{ph}	$V3: =0$

Формула расчета
интенсивности перехода

Излучатели электромагнитных колебаний

Любое электромагнитное устройство является источником электромагнитных полей, характер которых определяется назначением и схемными решениями, мощностью устройства, его конструкцией и т.д. Излучатели электромагнитных сигналов принято подразделять на электрические и магнитные, каждый из которых может быть представлен в виде элементарного электрического или магнитного излучателя. Под элементарным электрическим или магнитным излучателем подразумевается излучатель с очень малыми размерами по сравнению с длиной волны и расстоянием до точки наблюдения, ток в котором имеет одинаковую амплитуду и фазу во всех точках излучателя, т.е. является квазистационарным. Отдельно выступают оптические излучатели из-за двойственной природы света.

В некотором приближении любое ТС можно рассматривать как элементарный излучатель. ТС либо его составные части, для которых характерны относительно большая амплитуда тока и малая амплитуда напряжения информативного сигнала, можно отнести к элементарным магнитным излучателям. ТС с относительно большой амплитудой напряжения - к элементарным электрическим излучателям. В известной степени это деление условно, так как одно и то же ТС можно рассматривать одновременно в качестве электрического и магнитного излучателя.

Элементарный электрический излучатель

Элементарный электрический излучатель представляет собой два разноименных одинаковой величины заряда q , расположенных на расстоянии l , или прямоугольную нить тока, длина l которой очень мала по сравнению с длиной волны и расстоянием до точки наблюдения, с неизменной по длине амплитудой I и фазой переменного тока. Такие качества присущи «динамо Герца», в котором сосредоточенная емкость, образованная двумя шарами, периодически заряжается и разряжается через соединяющий шары проводник, обладающий лишь индуктивностью.

Элементарный вибратор в теории антенн рассматривается как элемент проволочной антенны, ток вдоль которой распределен по произвольному закону. Изменение во времени дипольного момента $S=ql$, образованного двумя заряженными шарами, определяется равенством $\rho = \rho_0 \cos \omega t$ или в комплексной форме $\rho(t) = \rho_0 e^{j\omega t}$.

В качестве некоторых общих свойств поля элементарного вибратора можно отметить следующее: вектор E лежит в плоскости, проходящей через ось вибратора и точку наблюдения; вектор H перпендикулярен плоскости, проходящей через ось вибратора и точку наблюдения; векторы E и H перпендикулярны друг другу.

Элементарный магнитный излучатель

Другим элементарным источником электромагнитных волн является элементарный магнитный излучатель (элементарная рамка).

Элементарный магнитный излучатель представляет собой плоскую одновитковую рамку, размеры (периметр) которой малы по сравнению с длиной волны, а ток, протекающий по рамке, имеет одинаковую амплитуду I_m и фазу во всех точках рамки. Чтобы найти поле рамки вводят магнитный вектор Герца $\Pi = \Pi_0 e^{j\omega t}$, амплитуда которого $\Pi_0 = (1/4) m_0 e^{-jkr/r}$, где $m_0 = I_0 s$ – амплитуда магнитного момента рамки;

$$k = \omega/c = 2\pi/\lambda.$$

К полям элементарной рамки и элементарного вибратора применяется принцип перестановочной двойственности (перестановочной инвариантности), получаемый путем замены E на H , H на E , динамической относительности проницаемости на магнитную и наоборот. Этот принцип позволяет рассчитать поля сложных излучателей, сведя их к известным полям элементарных вибраторов.

В качестве некоторых общих свойств поля элементарной рамки можно отметить следующие: вектор H лежит в плоскости, проходящей через ось рамки и точку наблюдения; вектор E перпендикулярен к этой плоскости; взаимное положение векторов K , H и r_0 такое же, как и у элементарного вибратора, т.е. E

и H лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны (r_0); излучаемая элементарной рамкой волна в дальней зоне является сферической поперечной волной.

Электромагнитное поле источника излучения

В зависимости от соотношения между расстоянием от излучателя до точки излучения r и длиной волны излучаемого сигнала λ пространство вокруг излучателя может быть разделено на три зоны излучения:

- ближнюю ($r < \lambda/2 \pi$);
- переходную или промежуточную ($r \approx \lambda/2 \pi$);
- дальнюю ($r > \lambda/2 \pi$).

Ближняя зона излучения характеризуется тем, что плотности энергии электрического и магнитного полей не равны друг другу. В зависимости от типа источника излучения в ближней зоне преобладает либо электрическое, либо магнитное поле. Структура электромагнитного поля не является строго поперечной. Значения составляющих напряженностей электрического и магнитного полей в ближней зоне изменяются с расстоянием обратно пропорционально r^3 и r^2 . Ближнюю зону иногда называют полем индукции, причем следует отметить следующее:

– в случае элементарного электрического излучателя электрическое поле в ближней зоне меняется обратно пропорционально r^3 , а магнитное – обратно пропорционально r^2 . В этой зоне электрическое и магнитное поля сдвинуты по фазе на 90° и, таким образом, носят квазистационарный характер;

– в случае элементарного магнитного излучателя магнитное поле в ближней зоне меняется обратно пропорционально r^3 , а электрическое – обратно пропорционально r^2 . Электрическая и магнитная составляющие также сдвинуты по фазе на 90° и тоже носят квазистационарный характер.

Следовательно, если источником электромагнитного поля служит элементарный электрический излучатель, то в ближней зоне преобладает электрическое поле, а если источником электромагнитного поля служит элементарный магнитный излучатель, то в ближней зоне преобладает магнитное поле. Напряженности электрического E и магнитного H полей в

ближней зоне связаны между собой через волновое сопротивление Z соотношением $Z=E/H$ причем значение Z может быть любым.

Переходная (промежуточная) зона характеризуется тем, что для нее выполняется равенство $r=\lambda/2\pi$, соответствующее границе между ближним и дальним полями. Электромагнитное поле в этой зоне представляет собой электромагнитные волны, имеющие поперечную структуру электрического и магнитного полей, результирующее поле в точке приема является суперпозицией волн. В отличие от случая дальней зоны, фазовые соотношения для этих интерферирующих волн представляются как угловыми координатами, так и расстоянием r , причем напряженность электрического и магнитного полей имеет обычно немонотонную зависимость от расстояния r .

Дальняя зона характеризуется тем, что в ней энергия передается электромагнитными волнами, свободно распространяющимися в окружающем пространстве. Для них свойственны поперечная структура и равенство плотностей энергии электрического и магнитного полей, зависимость изменения обоих составляющих поля обратно пропорциональная r и постоянство углового распределения интенсивности электромагнитных полей при изменении расстояния r . Поле в дальней зоне носит волновой характер, изменение электрической и магнитной составляющих совпадает по фазе и обратно пропорционально r как в случае элементарного электрического, так и магнитного излучателя.

Паразитные наводки

Паразитная наводка – это не предусмотренная электрической схемой и конструкцией передача напряжения, тока или мощности от одного устройства к другому. Наводки возникают вследствие паразитных связей между устройствами и их частями и образуют множество косвенных носителей информации. При анализе наводки всегда можно выделить источник наводимого напряжения, применение этого напряжения и паразитную связь между ними. Источник наводки может быть связан с приемником наводки через электрическое и магнитное поле излучения и соединительные провода.

Очевидно, что при малых расстояниях наводка может поступать по всем четырем путям. Основными видами паразитных связей в схемах электронных устройств являются :

- непосредственная паразитная емкостная связь;
- непосредственная паразитная индуктивная связь;
- емкостная и индуктивная паразитные связи по посторонним проводам;
- паразитная связь через электромагнитное поле излучения;
- паразитная связь через общее полное сопротивление.

Непосредственная паразитная емкостная связь осуществляется через ближнее электрическое поле. Коэффициент паразитной емкостной связи можно определить из выражения

$$\beta_c = \omega C_{\text{пар}} Z_{\text{пн}},$$

где ω – рабочая частота устройства;

$C_{\text{пар}}$ – паразитная емкость между источником и приемником наводки;

$Z_{\text{пн}}$ – входное сопротивление приемника наводки.

Влияние емкостной паразитной связи тем больше, чем выше рабочая частота, если $Z_{\text{пн}}$ не падает с повышением частоты. Если приемник наводки имеет чисто емкостное входное сопротивление, то коэффициент паразитной связи не зависит от частоты и определяется отношением $C_{\text{пар}}$ и емкости приемника наводки $Z_{\text{пн}}$.

Непосредственная паразитная индуктивная связь осуществляется через ближнее магнитное поле. Коэффициент паразитной индуктивной связи определяется при помощи выражения:

$$\beta_c = \frac{\omega M_{\text{пар}} Z_{\text{пн}}}{Z_A Z_B},$$

где ω – рабочая частота устройства;

$M_{\text{пар}}$ – паразитная взаимоиנדукция;

$Z_{\text{пн}}$ – входное сопротивление приемника наводки;

Z_A и Z_B – полное сопротивление цепи источника и приемника наводки, соответственно.

Индуктивная паразитная связь проявляется тем сильнее, чем выше частота, чем больше паразитная взаимоиндуктивность и входное сопротивление приемника наводки и чем меньше полное сопротивление связывающих цепей.

Емкостная и индуктивная паразитные связи по посторонним проводам могут возникать и при отсутствии непосредственной связи между источником и приемником наводки. Это может быть в случае, если провод, проходящий вблизи источника и приемника наводки, расположенных друг от друга на значительном расстоянии, имеет с каждым из них емкостную или индуктивную связь. Тогда из-за наличия этого провода, источник и приемник наводки могут иметь емкостную, индуктивную или индуктивно-емкостную паразитную связь. Коэффициент паразитной связи рассматривается из выражения :

$$\beta = \frac{U_{\text{пн}}}{E_{\text{пн}}},$$

где $E_{\text{пн}}$ и $U_{\text{пн}}$ – напряжение источника и приемника наводки, соответственно.

В каждом конкретном случае необходимо составлять эквивалентную схему паразитной связи.

Паразитная связь через электромагнитное поле излучения наблюдается при значительных расстояниях между источником и приемником излучения, на которых емкостная и индуктивная связь практически отсутствует. Такими считаются расстояния, превышающие пять длин волн, из-за чего эта паразитная связь, прежде всего, может проявиться не в пределах одного устройства, а между устройствами, разнесенными в пространстве. К нежелательным наводкам может приводить электромагнитное поле излучения соседних радиостанций, грозových разрядов, компьютеров и различных промышленных помех. Приемниками наводок могут являться различные вспомогательные ТС и системы, находящиеся поблизости. Если сеть питания имеет паразитную связь с антенным вводом или с входными каскадами радиоприемника, то помехи могут наблюдаться и при отключенной антенне.

Паразитная связь через общее полное сопротивление осуществляется через провода, входящие в состав, как источника, так и приемника наводки.

Коэффициент паразитной связи через общее полное сопротивление рассчитывается на основании выражения

$$\beta_{\text{общ}} = \frac{Z_{\text{общ.}}}{Z_n},$$

где

$Z_{\text{общ}}$ – общее полное сопротивление;

Z_n – сопротивление проводов.

Величина $Z_{\text{общ}}$ зависит от частоты. Для постоянного тока и очень низких частот это в основном сопротивление дросселей и резисторов фильтра и диодов выпрямителя или внутреннее сопротивление источников питания, для звуковых частот – активное сопротивление соединительных проводов и емкостное сопротивление входного конденсатора фильтра питания. На высоких частотах $Z_{\text{общ}}$ зависит в основном от индуктивного сопротивления соединительных проводов и конденсаторов фильтра питания. Для цепей управления – это выходное сопротивление источника управляющего напряжения.

Вследствие наличия перечисленных паразитных связей, при работе ТС возникают наводки информационных сигналов на провода и кабели, как отходящие от этих ТС, так и проходящий вблизи, а также на расположенные рядом другие устройства, что создает косвенные носители информации различных уровней.