

**ХАРЬКОВСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

На правах рукописи

кандидат технических наук

**БАБАЕВ Михаил Михайлович**

УДК 656.224/225.071

**МЕТОДОЛОГИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ГРУЗОВЫХ И ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК НА ОСНОВЕ  
АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ РАСПОЗНАВАНИЯ  
ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО  
ТРАНСПОРТА**

**05.22.08 - Эксплуатация железнодорожного транспорта**

Диссертация на соискание ученой степени

доктора технических наук

Научный консультант

д.т.н., проф. Ю.В. Соболев

Харьков 1999

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| Введение  | 5  |
| Раздел 1. Состояние и перспективы развития современных методов информационного обеспечения процессов управления перевозками на железнодорожном транспорте | 20 |
| 1.1. Характеристика существующих методов и средств управления подвижным составом магистрального транспорта  | 20 |
| 1.2. Особенности построения автоматизированных систем управления перевозочным процессом метрополитенов  | 29 |
| 1.3. Классификация методов распознавания и идентификации железнодорожных транспортных средств   | 43 |
| 1.4. Постановка задачи, цель и методика исследований  | 49 |
| 1.5. Выводы по разделу 1  | 59 |
| Раздел 2. Теоретические основы построения автоматизированных систем распознавания подвижных объектов железнодорожного транспорта                          | 52 |
| 2.1. Моделирование технологических процессов магнитной обработки колесных пар подвижного состава  | 52 |
| 2.2. Расчет и синтез электрической сетки для моделирования электромагнитного поля в отдельных   |    |

|  |     |
|--|-----|
| зонах первичных путевых элементов  |     |
| функционального намагничивателя  | 65  |
| 2.3. Разработка алгоритма работы и структуры устройств автоматической магнитной маркировки контролируемых объектов                           | 82  |
| 2.4. Исследование адаптивных ферромодуляционных устройств считывания информационных сигналов   | 112 |
| 2.5. Выводы по разделу 2   | 124 |
| Раздел 3. Методика определения и оценки характеристик качества обнаружения информационных сигналов, передаваемых контролируруемыми объектами |     |
|  | 128 |
| 3.1. Математическая модель процесса обнаружения в зоне контроля колесных пар подвижного состава  | 128 |
| 3.2. Синтез устройства идентификации, реализующего функцию правдоподобия алгоритма обнаружения колесных пар                                  | 139 |
| 3.3. Методика расчета вероятности ошибки обнаружения колесных пар  | 153 |
| 3.4. Эталонные характеристики качества обнаружения   | 173 |
| 3.5. Выводы по разделу 3   | 180 |
| Раздел 4. Анализ и синтез устройств распознавания образов подвижных объектов железнодорожного транспорта                                     |     |
|  | 182 |
| 4.1. Математическое моделирование процесса обнаружения идентифицируемого объекта   | 182 |
| 4.2. Синтез субоптимального алгоритма работы многоканального устройства распознавания  |     |

|   |  |     |
|---|--|-----|
| транспортных средств  |  | 187 |
| 4.3. Теоретические основы построения одноканальных распознающих систем  |  | 198 |
| 4.4. Сравнительные характеристики функционирования синтезированных устройств обнаружения и распознавания идентифицируемых объектов          |  | 237 |
| 4.5. Выводы по разделу 4  |  | 242 |
| Раздел 5. Методология применения автоматизированных систем информационного обеспечения перевозочного процесса на железнодорожном транспорте |  | 244 |
| 5.1. Решение технологических задач идентификации поездов для регионов и направлений дороги  |  | 244 |
| 5.2. Информационное обеспечение технологических моделей комплексной переработки вагонов на сортировочных станциях                           |  | 250 |
| 5.3. Методология информационного обеспечения пассажирских перевозок метрополитенов  |  | 254 |
| 5.4. Технико-экономическое обоснование эффективности внедрения новых информационных технологий на железнодорожном транспорте                |  | 259 |
| 5.5. Выводы по разделу 5  |  | 266 |
| Выводы  |  | 267 |
| Список использованных источников  |  | 272 |
| Приложения  |  | 293 |

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** В условиях рыночной экономики важнейшей задачей сохранения и усиления позиций железнодорожного транспорта Украины на внутреннем и международном транспортных рынках является внедрение в отрасли современных технических средств автоматизации технологических процессов и новых информационных технологий, обеспечивающих создание ориентированных на потребителя гибких и экономически обоснованных методов управления поездной работой [1].

Для организации перспективных форм фирменного транспортного обслуживания процесса перевозок в настоящее время уже недостаточно сведений, получаемых от традиционных информационных систем, функционирующих на базе моделирования перемещений подвижного состава, поскольку существующие методы регистрации данных допускают значительное отставание от реального процесса и не исключают ошибок. Несвоевременная и искаженная информация, поступающая в пункты диспетчерского управления, приводит к недостоверному анализу производственной деятельности и принятию ошибочных решений.

Основным критерием оценки эффективности использования информационных технологий является соблюдение технологического процесса функционирования отдельных подразделений и дороги в целом. Фактические же модели поездной и грузовой работы в дорожных центрах оперативного управления перевозками не в полной мере отражают текущее состояние станций, узлов, участков по причинам несвоевременного поступления, ошибочности или отсутствия данных. Поэтому-

му действующие системы не оказывают должного влияния на подбор и информационно-технологические взаимодействия с автоматизированными рабочими местами возможных клиентов дорог, выполнение договорных перевозок, улучшение использования подвижного состава национального парка и парка других государств - стран СНГ, особенно по его дислокации, анализу структуры, технического и коммерческого состояния. Не решены многие задачи для пассажирского, локомотивного и моторвагонного парка, специального подвижного состава в целях экономически выгодного обеспечения перевозочного процесса.

Повысить качество поступающих сообщений можно путем развертывания локальных устройств автоматической регистрации подвижных составов всех типов и концентрации обработанных данных в центрах комплексного транспортного обслуживания и управления перевозками. Поэтому основным принципом построения новых информационных технологий становится автоматизация процесса сбора сообщений о каждой единице подвижного состава.

Одним из условий надежной работы АСУ является получение достоверных данных от напольных объектов о параметрах движения поездов, номерах составов, количестве и типе вагонов, наличии перегретых букс и др. В современных системах управления такая информация формируется с помощью подсистем нижнего уровня, включающих в себя устройства идентификации составов и вагонов, счетчики осей, дискретные и непрерывные путевые преобразователи. Имеется довольно много сообщений о результатах опытной эксплуатации различных по структуре построения и функциональным возможностям устройств идентификации подвижных объектов железнодорожного транспорта, которые в той или иной степени решают стоящие перед ними задачи [2,3,4].

Теория и разработка путевых преобразователей для магистрального транспорта рассматривается в работах А.М.Брылеева, Н.Ф.Котляренко, И.Е.Дмитренко, Ю.А.Кравцова, Н.Ф.Пенкина, А.П.Шишлякова, Г.А.Красовского, В.С.Аркатова, В.С.Дмитриева, В.А.Минина., В.П. Бухгольца, А.Э.Штанке, В. Феннера, К. Фишера, О.Поупе и др. Методология построения микропроцессорных устройств распознавания железнодорожных объектов на магистральном и промышленном транспорте изложена в трудах Ю.В.Соболева, Г.И.Загария, В.М. Лисенкова, К.А.Чанцева и др. Структурам построения автоматизированных систем управления движением поездов метрополитенов посвящены работы Л.А. Баранова, Е.В.Ерофеева и др.

Тем не менее, определённая часть персонала в системе перевозок грузов еще занята ручным сбором и ручной обработкой данных, так как автоматизированные устройства распознавания и передачи сообщений в центры диспетчерского управления о контролируемых объектах на магистральном транспорте Украины отсутствуют.

Важнейшей задачей дальнейшего развития железнодорожного транспорта является внедрение эффективных методов организации и планирования поездной работы, создание современных систем диспетчерской централизации, автоматизации горочных работ, разработка экспертных и информационно-измерительных комплексов, совершенствование методов и средств интервального регулирования и телеуправления стрелками и сигналами.

В настоящее время во многих странах мира проводятся интенсивные работы по замене устаревших устройств диспетчерской централизации на перспективные микропроцессорные системы автоматического регулирования (АСУ транспортными потоками). Особенно широкое

распространение данной тенденция получила в Западной Европе. Предполагаемое в ближайшее время создание сети скоростных международных европейских пассажирских перевозок привело к разработке Европейским институтом железнодорожного транспорта единой системы управления движением поездов ETCS, в которой объединены функции диспетчерского контроля, автоблокировки, локомотивной сигнализации, радиосвязи, измерения скорости движения, идентификации подвижного состава. Аналогичные системы внедрены или находятся на стадии внедрения на железных дорогах США, Канады, Японии, Австралии [5,6].

На железных дорогах России ведется разработка прикладных задач комплексной автоматизации технологических процессов управления грузовыми и пассажирскими перевозками. В их числе одной из важнейших является система контроля дислокации вагонного парка на базе вагонной динамической модели. Она предусматривает пономерной учет вагонов для ведения работы с национальным парком подвижного состава, что позволяет автоматизировать систему расчетов с железными дорогами других стран СНГ. Имеются сообщения о высокой эффективности работы данной системы, но информационной поддержки на нижнем уровне она не имеет [7].

Новейшие автоматизированные системы идентификации (такие как ATIS фирмы Timtec GmbH - Германия) [9] обеспечивают получение исчерпывающей информации о местоположении, состоянии и технической исправности вагонов, однако они требуют установки на вагонах активных или пассивных ко доносителей. Это накладывает серьезные ограничения на использование локальных подсистем данного типа и, в особенности, на магистральном транспорте Украины, охваченном сетью пересекающихся европейских транспортных коридоров. И если такой

подход теоретически обеспечивает получение положительных результатов, то организационно реализовать его проблематично. В то же время являясь основными информационными элементами АСУ железнодорожным транспортом, локальные подсистемы данного типа довольно часто обходятся дороже основных систем диспетчерской централизации. Так, например, в Монреале с 1991 года действует производственно-управляющий комплекс стоимостью 6,1 млн. долларов США, осуществляющий планирование и регулирование поездной работы, а система идентификации вагонов, обслуживающая данный комплекс, оценивается в 14 млн. долларов [10]. На наш взгляд более перспективным является создание региональных, объединенных в единую сеть, подсистем АСУ транспортом, обслуживающих весь подвижной состав, находящийся в регионе, без его дополнительного переоборудования. В этом случае обеспечивать получение полной и достоверной информации о параметрах движения составов должны локальные устройства адаптивного типа, работающие в автономном режиме.

Новое информационное обеспечение, построенное на этой основе, позволит реально координировать эксплуатационную работу со смежниками, прослеживать продвижение грузов, достигнуть взаимовыгодной технологико-экономической основы в деятельности взаимодействующих транспортных объектов, ускорить доставку грузов, улучшить использование подвижного состава, значительно сократить затраты труда на подготовку информационных сообщений о вагонах, операциях с поездами, работе локомотивного парка. Объединение информационных потоков создаст условия для повышения эффективности функционирования систем управления перевозочным процессом на базе электронной безбумажной технологии на всех основных направлениях сети железных до-

рог, обеспечит информатизацию перевозочного процесса по международным стандартам, значительно улучшит контроль за производственно-финансовыми результатами работы железных дорог и их подразделений.

Поэтому в диссертации предлагается методология информационного обеспечения перевозочного процесса, основанная на технологиях, ориентируемых на незамкнутые транспортные потоки и не требующих при внедрении переоборудования контролируемых объектов.

Внедрение в практику новых информационных технологий передачи данных подвижными объектами железных дорог, принятие научно обоснованных технических решений, которые созданы на основе теоретических разработок данной диссертационной работы, позволяет квалифицировать ее как актуальную, направленную на решение важной научно-технической проблемы.

#### **Связь работы с научными программами, планами, темами.**

Диссертационная работа выполнена на кафедре электротехники Харьковской государственной академии железнодорожного транспорта в период с 1986 по 1999гг. в соответствии с планами научно-исследовательских работ академии, проводимых в рамках отраслевых программ Министерства путей сообщения бывшего СССР, ЦУВТ МПС СССР, КБ ЦШ МПС СССР по темам: «Разработка и исследование устройств записи, считывания, стирания и обработки информации с подвижного состава» (№ГР01860026073, 1986. - 163 с.); «Автоматизированная система считывания инвентарных номеров вагонов с использованием ферромагнитных свойств бандажей колесных пар» (№ГР01870024031, 1987. - 166 с.); «Автоматизированная система считывания номеров подвижного состава с использованием ферромагнит-

ных свойств бандажей колесных пар» (№ГР01880008653; 1988. - 92 с.); с планом научно-исследовательских работ Центрального научно-исследовательского института комплексной автоматизации (ЦНИИКА г.Москва): «Разработка и исследование аппаратуры записи и считывания номеров вагонов» (№ГР01860026072; 1986-1987. - 37 с.); с планом научно-исследовательских работ Харьковского метрополитена: «Разработка устройства идентификации подвижного состава метрополитена» (№ГР01900040275; 1990. - 49 с.); с планом проведения научно-исследовательских работ Министерства транспорта Украины «Розробка системи автоматизованої ідентифікації вагонів стосовно до вагонного господарства України» (приказ № 369 от 23.10.95; №ФР0196U010126; 1996-1998.-37 с.).

**Целью работы** является совершенствование методологии информационного обеспечения процесса грузовых и пассажирских перевозок на основе комплексной автоматизации методов и средств распознавания подвижных объектов железнодорожного транспорта.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи научных исследований (рис.1):

1. Разработать основы построения теории повышения эффективности эксплуатации транспортных средств на основании автоматизации процесса распознавания образов идентифицируемых объектов.
2. Разработать математические модели информационных задач комплексной автоматизации процессов идентификации транспортных средств.
3. Разработать методы построения информационных систем на основе новых технологий передачи данных подвижными составами железнодорожного транспорта.



Рис. 1. Структура диссертационной работы

4. Разработать математические модели приема и обработки информационных сигналов, поступающих от контролируемых объектов.
5. Реализовать предложенную методологию построения систем информационного обеспечения перевозочного процесса в виде эффективных аппаратных решений.

**Научная новизна** полученных результатов работы заключается в дальнейшем развитии теоретических основ усовершенствования эксплуатации железнодорожного транспорта на основании распознавания подвижных объектов, основанных на новых технологиях передачи данных подвижными составами, а именно:

- впервые разработана общая методология построения систем распознавания и магнитной маркировки железнодорожных транспортных средств, ориентируемая на незамкнутые транспортные потоки;

- впервые поставлена задача, предложены алгоритмы работы и синтезированы устройства, формирующие образ контролируемого подвижного состава, что позволяет отслеживать его вдоль всего транспортного коридора;

- впервые для систем управления подвижными составами железнодорожного транспорта синтезированы алгоритмы работы и реализованы адаптивные путевые устройства считывания информационных сигналов;

- впервые разработаны помехозащищенные алгоритмы обработки выходных сигналов точечных путевых датчиков и синтезировано оптимальное по критерию максимума апостериорной вероятности устройство определения количества колесных пар в процессе распознавания образа контролируемого объекта;

- с целью повышения достоверности определения дислокации подвижных составов впервые поставлена задача и произведена оценка эффективности работы помехозащищенных приемников информационных сигналов путевых датчиков по критерию средней вероятности ошибки вычислений, для чего выведены соответствующие расчетные соотношения;

- впервые для систем идентификации подвижных объектов железнодорожного транспорта синтезированы субоптимальные алгоритмы распознавания контролируемых объектов и реализованы субоптимальные обнаружители, осуществляющие комплексирование как по входам так и по выходам;

- впервые для всех синтезированных субоптимальных устройств распознавания контролируемых объектов получены математические выражения, определяющие показатели качества обнаружения. При этом выполнено сравнение этих показателей с аналогичными показателями для оптимального обнаружителя сигнала с полностью известными параметрами.

### **Практическое значение полученных результатов:**

1. Разработанные в диссертации научные положения и результаты использованы при создании подсистем определения дислокации подвижных единиц на основании адаптивных измерительных преобразователей, которые считывают информационные сигналы с колесных пар подвижного состава. Конструкция и характеристики преобразователей позволяют устанавливать их в местах, недоступных для механического повреждения.

2. Результаты математического анализа и физического моделирования характера распределения остаточных магнитных полей колесных пар тележек использованы при изготовлении функциональных намагнитчиков колесных пар вагонов.

3. Синтезированные помехозащищенные алгоритмы обработки информационных сигналов использованы в процессе разработки измерительных приемников системы распознавания образов контролируемых объектов.

4. Испытания системы распознавания железнодорожных составов на Харьковском метрополитене показали принципиальную возможность применения ее для диагностики надежности функционирования тяговых двигателей электропоездов.

5. Научные результаты диссертационной работы использованы при внедрении автоматизированной системы идентификации вагонов на Салтовской линии Харьковского метрополитена (акт о внедрении от 09.10.97 г.). Расчетный экономический эффект от внедрения системы в период с 1997 по 2010 гг. составляет 4769 тыс. грн. в ценах 1997 г. Долевое участие автора во внедрении составляет 30% - 1430 тыс. грн.

**Личный вклад соискателя.** Все положения и результаты, которые выносятся на защиту, получены автором самостоятельно. В работах, опубликованных в соавторстве, диссертанту принадлежит: в работе [101] - разработка методики проведения экспериментов; в работе [102] - методология построения системы распознавания подвижного состава; в работе [106] - принципы построения магнитомодуляционных датчиков системы считывания информации; в работе [108] - исследование влияния дестабилизирующих факторов, создаваемых окру-

жающей средой, на магнитное состояние носителя информации; в работе [109] - теоретические основы определения ошибки вычисления двухдатчиковым устройством; в работе [110] - разработка алгоритмов идентификации подвижных составов; в работе [112] - теоретическое обоснование влияния ориентации и направления движения вагона на достоверность передачи информации; в работе [113] - анализ информационных признаков статистической модели процесса распознавания вагонов; в работе [116] - постановка и теоретическое обоснование решения задачи исследований; в работе [118] - разработка алгоритма работы устройства распознавания железнодорожных транспортных объектов; в работе [119] - разработка алгоритма работы устройства записи информации на подвижной состав; в работе [120] - теоретическое обоснование принципа работы устройства бесконтактного считывания информации с магнитных носителей.

**Апробация результатов диссертации.** Основные материалы и результаты диссертационной работы докладывались и получили одобрение:

- на всесоюзной научно-практической конференции «Проблемы повышения надежности и безопасности технических средств железнодорожного транспорта» (г. Москва, 1988 г.);
- на республиканской научно-технической конференции «Перспективы развития электромашиностроения на Украине» (г. Харьков, 1988 г.);
- на республиканской конференции «Микропроцессорные системы связи и управления на железнодорожном транспорте» (г. Алушта, 1991г.);
- на республиканской школе-семинаре «Микропроцессорные системы связи и управления на железнодорожном транспорте» (г. Алушта, 1992г.);

- на научно-практической конференции «Пути совершенствования технических средств метрополитенов» (г. Харьков, 1995 г.);
- на 9-й международной школе-семинаре «Перспективные системы управления на железнодорожном, промышленном и городском транспорте» (г. Алушта, 1996 г.);
- на 10-й международной школе-семинаре «Перспективні системи управління на залізничному, промисловому та міському транспорті» (г. Алушта, 1997 г.);
- на 12-й международной школе-семинаре «Перспективні системи управління на залізничному, промисловому та міському транспорті» (г. Алушта, 1999 г.);
- на ежегодных научно-технических конференциях Харьковской государственной академии железнодорожного транспорта и специалистов Южной железной дороги (г. Харьков, 1986-1998 гг.).

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 20 печатных работах. Из них: 17 статей, одно авторское свидетельство на изобретение и два патента Украины. Дополнительно материалы диссертации отражены в 7 статьях, 26 авторских свидетельствах на изобретения, патенте Украины и двух патентах Российской Федерации.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, показана ее связь с научными программами и планами проведения научно-исследовательских работ Харьковской государственной академии железнодорожного транспорта. Формулируются цель, задачи исследований, научная новизна и практическое значение полученных результатов. Выделяются основные научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту. Приводятся сведения о структуре диссертации,

публикациях, апробации работ и личном вкладе соискателя в научных трудах, опубликованных в соавторстве.

В первом разделе рассматриваются общие тенденции развития существующих методов и средств информационного обеспечения грузовых и пассажирских перевозок на Украине, в странах ближнего зарубежья, Западной Европе, США, Японии, Канаде и др. Отмечается, что в связи с переходом экономики Украины к рыночным отношениям особенно остро встает проблема повышения качества и доступности предоставляемых железными дорогами транспортных услуг. Показано, что повысить эффективность обслуживания пассажиров, грузовладельцев, грузоотправителей и грузополучателей при одновременном снижении транспортных расходов можно путем внедрения новых информационных технологий в процесс диспетчерского управления грузовыми и пассажирскими перевозками.

Во втором разделе рассматриваются теоретические основы построения автоматизированных систем распознавания подвижных объектов железнодорожного транспорта, в которых идентификация транспортных средств проводится без нарушения технологического процесса движения.

В третьем разделе рассматривается методика распознавания колесных пар подвижных составов в зоне действия путевых датчиков. Выполнена оценка характеристик качества обнаружения объекта субоптимальным обнаружителем. Получены соотношения для расчета условной вероятности правильной идентификации объекта и условной вероятности ложной тревоги. Приводятся сравнительные характеристики результатов расчета качества обнаружения синтезированных устройств.

В четвертом разделе рассматривается методология построения устройств распознавания образов железнодорожных транспортных средств. Получены соотношения, позволяющие рассчитать важный для практики показатель - вероятность ошибки идентификации контролируемых объектов.

В пятом разделе рассматривается методология применения автоматизированных устройств информационного обеспечения перевозочного процесса для отдельных регионов и направлений дороги, технологических моделей комплексной переработки вагонов на сортировочных станциях, пригородного сообщения и систем управления электропоездами метрополитенов.

В приложении приведены акты внедрения предложенных разработок на Харьковском метрополитене, а также результаты теоретических расчётов и экспериментальных исследований.

## РАЗДЕЛ 1

### СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕВОЗКАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

#### **1.1. Характеристика существующих методов и средств управления подвижным составом магистрального транспорта**

Повышение эффективности эксплуатации железнодорожного транспорта, соблюдение безопасности и надежности управления перевозками возможны лишь при широком использовании средств автоматизации и внедрении новых информационных технологий. Решение указанных проблем может быть осуществлено за счет дальнейшего совершенствования процесса информационного обеспечения центров диспетчерского (ДЦ) управления грузовыми и пассажирскими перевозками. Рассмотрим обобщённую структуру современных ДЦ, которая строится по иерархическому принципу с выделением следующих основных уровней [11]:

- центра управления;
- станций.

На уровне центра управления размещается пункт управления, на уровне станций размещаются контролируемые пункты.

Объектами управления и контроля на полигоне железной дороги (участке, направлении, станции, в узле) являются:

- системы железнодорожной автоматики и телемеханики и их элементы, а именно: стрелки, светофоры, рельсовые цепи, шлагбаумы, устройства специальных видов сигнализации (тоннельной, обвальной, сейсмической) и т.п.;
- поезда, вагоны, локомотивы.

В ДЦ можно различать шесть основных функциональных подсистем:

- диалоговую;
- управления и контроля состояния объектов систем железнодорожной автоматики и телемеханики (система телемеханики в узком смысле слова по ГОСТ Р МЭК 810-1-1-93);
- моделирования, прогноза и отображения хода технологического процесса (включает график движения, поездную, вагонную и локомотивную модели);
- нормативно-справочной информации;
- самоконтроля и диагностики системы и напольного оборудования;
- протоколирования работы системы.

Диалоговая подсистема должна обеспечивать отображение информации и взаимодействие оперативного персонала с ДЦ данного участка, с ДЦ соседних полигонов управления (диспетчерских участков, узлов и крупных сортировочных, участковых и пассажирских станций), с другими инерционно-управляющими системами (системой выдачи предупреждений об ограничениях скорости, системами телемеханики, электроснабжения и др.), а также связь с вышестоящими системами ИВЦ дороги.

Подсистема моделирования, прогноза и отображения хода технологического процесса на полигоне должна обеспечивать перемещение номера поезда на экране монитора, предоставлять информацию о подходах и вступлении поездов в зону полигона управления, о дислокациях поездов, локомотивов и вагонов на полигоне, готовности и резерве времени локомотивных бригад, исполненном графике движения поездов. Динамические модели (вагонная, локомотивная и поездная) должны вестись на основе объективных данных, полученных техническими средствами в режиме реального времени. Информация о состоянии стационарных путевых объектов обновляется в ритме реального перевозочного процесса. Результаты моделирования являются основой для отображения прогнозного графика и своевременного информирования оперативного персонала о предстоящих технологических операциях.

Подсистема нормативно-справочной информации должна содержать данные двух видов: постоянные и условно-постоянные. К первым относятся характеристики полигона: профиль участка, пути пропуска и остановки поездов с опасными грузами класса 1 и негабаритными на станциях, длина приемо-отправочных путей в условных вагонах и т.п. Условно-постоянной является информация, которая остается постоянной в течение продолжительного времени, например, ограничения скорости на участке, «окна» для выполнения профилактических и ремонтных работ, натурный лист состава, места выхода ремонтных бригад.

Подсистема диагностики должна обеспечивать поддержание параметров надежности и достоверности ДЦ на заданном уровне и телеконтроль состояния устройств СЦБ.

Подсистема протоколирования работы системы должна обеспечивать фиксацию управляющих воздействий обслуживающего персонала

и поездной обстановки, сбоев функционирования, результатов регламентных проверок и диагностирования после восстановления работоспособности.

Для выполнения современных требований, предъявляемых к перевозочному процессу, в автоматизированных системах оперативного управления любого уровня должны контролироваться следующие объекты:

- поезда - от момента приема на полигон системы или окончания формирования до момента расформирования или сдачи на соседний полигон. Составы вагонов в поездах контролируются сообщениями о формировании, отцепке и прицепке вагонов, объединении и разъединении поездов. Дислокация поездов на своем полигоне фиксируется сообщениями со станций об их формировании, отправлении, проследовании, прибытии и расформировании;
- локомотивы - все эксплуатируемые на полигоне управления как своей приписки, так и принятые с соседних полигонов. Одиночное следование отражается передачей сообщений, как о поездах;
- вагоны - от приема на полигон системы до сдачи на соседний полигон. Дислокация вагонов рабочего парка контролируется сообщениями со станций об отцепке от поездов, перестановке с пути на путь, подаче под погрузку и выгрузку, уборке. Местонахождение вагонов на полигоне определяется сообщениями о постановке в состав и справками о поездах [12].

Анализируя существующие методы и средства распознавания подвижных составов железных дорог и исходя из задачи построения эффективных систем управления перевозками, можно отметить, что во всех странах мира ведутся интенсивные работы по внедрению на транспорте новых информационных технологий. Как отмечалось выше, в

рамках программы информатизации железных дорог России ведется разработка системы контроля дислокации вагонного парка ДИСПАРК на базе вагонной динамической модели, которая предусматривает пономерной учет вагонов для ведения работы национальным парком подвижного состава и позволит автоматизировать систему расчетов с железными дорогами других стран СНГ. В дальнейшем предполагается повышение достоверности исходной информации о номерах вагонов и устранение ручного труда счетчиков, которая может быть достигнута с помощью систем идентификации подвижного состава - локомотивов, вагонов, контейнеров и т.д. [7].

Как перспективные на железных дорогах Италии рассматриваются системы автоблокировки и электрической централизации, в которых вместо рельсовых цепей использованы счетчики осей. Считается, что на высокоскоростных линиях целесообразно использование линейных проводников, уложенных между рельсами и обеспечивающих непрерывное измерение скорости и координаты поезда, а также двустороннюю связь поезда со стационарными устройствами автоматики [13]. Недостатком таких систем является невозможность распознавания ими контролируемых объектов.

Представители железнодорожных компаний США провели научно-практическую конференцию по проблеме обоснования перспективной концепции автоматического управления движением поездов. Предпочтение отдано комплексным системам централизованного типа с оперативным решением задачи оптимизации на ЭВМ дорожного вычислительного центра в реальном масштабе времени при наличии непрерывной связи «поезд - центр управления». Отмечается, что основную проблему представляет реализация этой связи при обеспечении требования

отказоустойчивости [14]. Это подтверждает актуальность решения задачи создания локальных подсистем нижнего уровня, обеспечивающих непосредственную связь с подвижным составом.

Железнодорожные компании Burlington Northern и Union Pacific проводят совместную работу по созданию новой системы управления движением поездов, включающей функции интервального регулирования и диспетчерской централизации, причем эта система базируется на космической радиосвязи. Используются методы определения координат подвижных объектов, отработанные для космических систем навигации GIS и GPS, причем погрешность определения координаты не превышает  $\pm 20$  см. В главном вычислительном центре системы концентрируется вся информация о местоположении поездов, отражаемая на видеокarte железнодорожной сети [15]. Рассмотренная система может выполнять функции идентификации составов, однако высокая стоимость, сложность технического обслуживания и большие эксплуатационные расходы не позволяют рекомендовать ее для внедрения на магистральном транспорте Украины.

На Красноярской железной дороге (Российская федерация) создается новая АСУ движением поездов (АСУ ДП). Основные функции этой АСУ ДП:

- определение в реальном времени пространственных координат, времени, пройденного пути и скорости поезда;
- выдача диспетчеру детального поездного положения в районе управления;
- автоматическое ведение поездных документов.

Работа АСУ ДП основана на использовании взаимодействия локомотивной аппаратуры с навигационными спутниками группировок

ГЛОНАСС и GPS [16]. Предлагаемая система предполагает установку сложного оборудования на подвижной состав, что является её основным недостатком.

В Российской Федерации (Октябрьская железная дорога) разработана новая система ДЦ на основе микроЭВМ и программируемых контроллеров (ДЦ - МПК), в которой аппаратура контролируемых пунктов (КП) может быть дополнена приемопередающими устройствами точечного канала связи, предназначенного для двустороннего обмена информацией между стационарными устройствами и локомотивом. С помощью такого канала связи можно автоматически получать в автоматизированном диспетчерском центре управления номер поезда, считывая его при входе на участок, контролируемый системой ДЦ - МПК [17]. Наличие активных датчиков на поездах ограничивает область применения данного метода управления.

В системах ZNS\3800 и ZNS\3801 фирмы Сименс подвижному составу автоматически присваивается номер, который отображается на световых индикаторах табло ЭЦ, и по мере движения по перегону или станции его номер автоматически перемещается по схеме путей на табло до тех пор, пока поезд не прибудет на станцию назначения, не выйдет за границу контролируемого района или номер не будет погашен вручную. Сигналом к перемещению номера поезда от одного участка пути к другому служит смена показаний соответствующего светофора на запрещающее. Поступающая информация обрабатывается центральным вычислительным блоком, в память которого заложены данные о графике движения поездов, путевом развитии и т.д. Недостатком рассмотренных систем управления является то, что при неисправной автоблокировке или ЭЦ необходимо ручное вмешательство в их работу [18].

Планирование перевозок в такой сложной системе, как железная дорога, требует большой подготовительной работы. Подготовка информации вручную уже не соответствует временным требованиям успешного управления ресурсами. Поэтому необходимы мощные инструменты краткосрочного планирования, способные обеспечить быстрое обновление информации о перевозочном процессе. Вместе с тем и на уровне оперативного управления движением имеются резервы, использовать которые только за счет совершенствования диспетчерского управления нельзя. Причиной является дискретный характер оперативного управления, состоящего из двух компонентов: управление маршрутами и управление поездами. Взаимодействие этих компонентов носит дискретный характер, поскольку определяется разграничением поездов стационарными блок-участками. Дискретно, по блок-участкам, освобождение маршрута нарушает непрерывный процесс поездной работы. Поэтому для повышения пропускной способности необходим переход к непрерывной сигнализации об освобождении маршрута, ориентированной на местоположение хвоста поезда.

Переход к автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа (АЛСН) в качестве основного средства обеспечения безопасности делает возможным непрерывное извещение о свободном<sup>TM</sup> пути и переход к подвижным блок-участкам, т.е. к режиму движения с разграничением поездов в сторону тормозного пути [19].

В настоящее время часть персонала в системе перевозок повагонных грузов еще занята ручным сбором данных, их ручной обработкой и перемещением документов, выполненных на бумаге. Много данных собирают повторно, часто документы содержат ошибки. Иногда информация доходит до пользователей слишком поздно. Непрерывный поток

информации о вагонах и отправлениях должен быть обеспечен проектом TS-90 (Германия). Проект включает информационные системы для вагонных депо и вагонного хозяйства, а также для технологий в грузовых перевозках и технологий в продвижениях грузов. Организация непрерывного информационного потока, однако, возможна лишь в сочетании с автоматической идентификацией подвижного состава. Установленные на сети дорог регистрирующие приборы должны поставлять точную информацию о местонахождении вагонов [20].

Составной частью концепции информатизации железнодорожного транспорта является создание высокоэффективных средств автоматического съема информации о подвижном составе и его состоянии, автоматическое ведение на основе этой информации локомотивной и повагонной модели. Это позволит осуществить переход на безбумажную технологию управления перевозочным процессом с заменой бумажных документов соответствующими электронными при одновременном упрощении схем циркуляции информации и сокращении ее дублирования, что в настоящее время является одной из актуальных и не до конца решённых задач [21]. Безбумажная технология управления должна базироваться на создании комплексной информационно-вычислительной системы, в которой с помощью взаимосвязанных ПЭВМ в рамках информационного фонда соответствующего вычислительного центра будут формироваться управляющие документы по комплексам задач технического нормирования, активного учета, контроля и анализа показателей эксплуатационной работы железных дорог. К комплексу задач оперативного контроля работ вагонных парков относятся оперативный учет, контроль и анализ работы вагонных парков, их состояния, перехо-

да вагонов по дорогам сети, обмена между соседними дорогами, а также выполнения норм передачи вагонов по соседним стыковым пунктам [22].

Таким образом, технический прогресс на магистральном железнодорожном транспорте тесно связан с совершенствованием методологии информационного обеспечения систем управления грузовыми и пассажирскими перевозками, реализация которой возможна на основе комплексной автоматизации методов и средств распознавания контролируемых объектов.

## **1.2. Особенности построения автоматизированных систем управления перевозочным процессом метрополитенов**

Быстрое развитие жилищной и промышленной инфраструктуры крупнейших городов мира, динамичный рост их населения при существенной территориальной ограниченности промышленных и деловых районов обусловили невозможность полного удовлетворения потребностей во внутригородских пассажирских перевозках только средствами наземного транспорта. В этих условиях метрополитены являются важным элементом транспортной инфраструктуры крупнейших городов, провозная способность и надежность функционирования которых зачастую являются критическими факторами, определяющими саму возможность нормального жизнеобеспечения. Анализ структуры и методов работы метрополитенов показывает, что обеспечение высоких эксплуатационных показателей их функционирования невозможно без использования АСУ как отдельными технологическими процессами, так и метрополитеном в целом.

В данном разделе рассмотрены принципы построения и особенности функционирования АСУ метрополитена. Кроме того, в нём сформу-

лированы основные теоретические и практические задачи в области разработки и реализации комплекса аппаратных и алгоритмических средств АСУ метрополитена.

Метрополитен представляет собой городскую электрическую железную дорогу с преимущественно подземным расположением станций и путей, предназначенную для удовлетворения потребности населения в быстром и безопасном передвижении. В городах, где функционирует метрополитен, он зачастую является основой городской транспортной системы: к расположению его станций увязывают большую часть маршрутов наземного транспорта. Материально-техническая база метрополитена определяется его назначением и положением в системе городского пассажирского транспорта. Она включает в себя [24]:

- тоннели, станции, эстакады, мосты;
- путь (как правило, в двухпутном исполнении);
- подвижной состав основного и вспомогательного назначения;
- сооружения и устройства, предназначенные для обслуживания и ремонта подвижного состава; основными из них являются электродепо и пункты технического осмотра подвижного состава на линии;
- восстановительные средства. Это оборудование и средства его транспортировки (наземные и подземные), предназначенные для оперативного восстановления движения поездов;
- сооружения и устройства станционного хозяйства. Это путевое развитие и объекты, обеспечивающие перемещение пассажиров и обслуживающего персонала - вестибюли, переходы, лестницы, автоматические контрольные пункты, технические помещения и др.;
- эскалаторное хозяйство. Это собственно эскалаторы, а также мастерские для их технического обслуживания и ремонта;

- сооружения и устройства сигнализации и связи: путевая автоматическая блокировка, электрическая централизация стрелок и сигналов, диспетчерская централизация, часовое хозяйство, установки и устройства проводной связи и радиосвязи, установки радиооповещения на станциях и в вагонах, аппаратура телевизионного наблюдения станционных объектов. К этой же категории можно отнести автоматические и автоматизированные системы управления как движением поездов в целом, так и его отдельными элементами;

- сооружения и устройства электроснабжения;
- санитарно-техническое хозяйство, обеспечивающее необходимый микроклимат, а также воздухо- и водоснабжение.

Производственным процессом метрополитена как предприятия городского пассажирского транспорта является перевозка пассажиров по заданным маршрутам в соответствии с заданным графиком движения и в объемах, ограниченных провозной способностью. Для анализа протекания указанного производственного процесса вышеперечисленные компоненты материально-технической базы метрополитена рационально объединить в системы и подсистемы по функциональному признаку, выделив тем самым ряд типовых технологических процессов. Полученная в результате обобщенная структура производственного процесса метрополитена приведена на рис. 1.1. Как видим, решение основной задачи - обеспечение перевозки пассажиров поездами и нормального функционирования станций и пересадочных узлов - требует массивной взаимоувязанной поддержки со стороны ряда подразделений и служб метрополитена, которые с большой долей условности могут быть названы вспомогательными. Иными словами, метрополитен функционально представляет собой многоэлементную систему со множествен-

ними обратными связями. Теоретический анализ такой системы и синтез алгоритмов управления ею представляют собой сложную задачу. Каждый из элементов структуры, представленной на рис. 1.1, является в свою очередь, весьма сложным технологическим процессом со специфиче-

### Пассажиропоток



O - технологические связи по пассажиропотоку;

---- ► - технологические связи по материальным ресурсам и управляющие связи

Рис. 1.1. Обобщенная структура производственного процесса

метрополитена

Основой производственного процесса метрополитена есть перевозка пассажиров. Этот процесс, будучи очевидно центральным, в то же время предоставляет наименьшие возможности для управления им на этапе эксплуатации метрополитена, поскольку такие характеристики как количество и расположение мест в вагонах, параметры освещения, вентиляции и т.д. неизменны и заданы при разработке самих вагонов. Возможность управления в данном случае наиболее эффективно реализуется на стадиях посадки и высадки пассажиров путем их равномерного распределения вдоль платформы силами и средствами персонала станции, а также путем контроля окончания посадки пассажиров, причем визуальному контролю по-прежнему отводится важная роль [26].

Более существенны возможности управления пассажиропотоком на станции передвижения пассажиров по отведенным для них сооружениям станционного хозяйства (входы, переходы, распределительные залы) и при перевозке их эскалаторами. В последнем случае ставится задача диспетчерского управления работой эскалаторов, которая заключается в определении количества и скорости движения эскалаторов, работающих на спуск и подъем при текущих величине и направлении пассажиропотока через станцию и в соответствующем включении или отключении эскалаторов.

Лимитирующим фактором процесса управления пассажиропотоком путем регулирования работы эскалаторов является также их общее количество на станции. Насколько известно [27], для ряда станций метрополитенов СНГ необходимое количество эскалаторов было занижено на этапе проектирования этих станций, поскольку в процессе расчета не были учтены внутрисюсовые колебания пассажиропотока и простои эскалатора в капитальном ремонте. В результате эти станции были по-

строены каждая только с одним наклонным тоннелем в три эскалатора, что впоследствии резко ограничило пропускную способность этих станций.

Как следует из вышеизложенного, важным условием повышения эффективности пассажирских перевозок на метрополитене является объективная и точная оценка пассажиропотоков. При этом необходимы оказываются не только сведения о временной зависимости пассажиропотока через каждую отдельную станцию, но и сведения о величинах корреспонденций фактических пассажиропотоков (под термином «корреспонденция пассажиропотоков между станциями А и В» понимают количество пассажиров, которые в течение определенного интервала совершили посадку на станции А, были перевезены на станцию В и совершили высадку на станции В) [28]. В результате оказывается возможным существенно уточнить показатели загрузки устройств и сооружений станции, а также загрузку перегонов [29-31, 158] и линий метрополитена в целом, что обеспечивает снижение эксплуатационных затрат и уменьшает время задержки пассажиров на станциях.

Как было отмечено, перевозка пассажиров поездами является основной производственного процесса метрополитена. Безусловным требованием к перевозке является ее безопасность и, прежде всего, безопасность движения поездов. Последняя определяется тремя основными факторами:

- надежность подвижного состава;
- правильная установка маршрутов;
- безопасный интервал движения.

По своей структуре и по эксплуатационным характеристикам метрополитен настолько существенно отличается от магистрального и промышленного железнодорожного транспорта, что разработки в области

АСУ этими видами транспорта [32] представляют для метрополитена весьма ограниченный интерес. Поэтому еще в конце 70-х годов для повышения эффективности Московского метрополитена в целом была предпринята попытка создания системы «АСУ-метро» [28], однако задача оказалась настолько сложной, что эта работа была приостановлена, а разработки ограничились только созданием АСУ некоторыми технологическими процессами метрополитена, прежде всего АСУ движением поездов с подсистемами автоведения и автоматического регулирования скорости АРС [4,35-37]. Подобные разработки, выполненные в США и Европе, нашли отражение в работах [38-41]. Разработаны также АСУ электроснабжением, информационно-вычислительным комплексом службы пути и тоннельных сооружений. Способы и средства обеспечения надежности подвижного состава будут рассмотрены ниже, а сейчас мы обсудим проблемы маршрутизации и интервального регулирования движения поездов ввиду их непосредственной связи с начатым выше обсуждением проблемы управления [4,29].

Маршрут представляет собой станционные пути и стрелки, установленные и запертые в направлении предполагаемого следования поезда. Для согласованной установки (взаимозамыкания) стрелок, сигналов и маршрутов применяют специальные системы управления, называемые системами централизации. В настоящее время на метрополитенах СНГ широко распространена разработанная еще в 70-х годах электрическая маршрутно-релейная централизация (МРЦ) [45,82], управление которой осуществляется со станционного поста централизации, оборудованного специальным пультом-табло. В этой системе стрелки и сигналы устанавливает в соответствующее требуемому маршруту положение одним-двумя переключениями на пульте дежурный по станцион-

ному посту централизации. МРЦ позволяет перевести все стрелки и сигналы на полностью автоматический (без участия дежурного) режим работы, при котором все операции по приему и отправлению (или обороту) поездов инициируются воздействием подвижного состава этих поездов на рельсовый путь. С другой стороны, МРЦ обеспечивает, при необходимости, переход на индивидуальное управление стрелками, каждым из маршрутов в отдельности и другими функциями непосредственного доступа к устройствам. Помимо этого, аппарат МРЦ блокирует ошибочные действия обслуживающего персонала, ведущие к установке враждебных маршрутов, переводу стрелок под составом и др. Недостатком МРЦ является локальность реализуемого ею управления, что не обеспечивает централизованного регулирования в реальном масштабе времени движения поездов в пределах хотя бы одной линии метрополитена. Поэтому логически единственной являлась концентрация функций маршрутизации, контроля стрелок, сигналов и состояния путей в комплексе аппаратуры диспетчерской централизации (ДЦ). При этом набор маршрутов, управление стрелками и сигналами, слежение за движением поездов и маневровой работой на охваченном ДЦ участке осуществляет один человек - поездной диспетчер при помощи пульта-манипулятора и информационного табло. Несмотря на несомненный выигрыш в оперативности и масштабах регулирования движения поездов, обеспечиваемый ДЦ по сравнению с МРЦ, первая, по сути, остается надстройкой над второй, обеспечивая, главным образом, улучшение лишь количественных показателей управления, но практически не предоставляя возможностей управления более широким спектром параметров процесса движения поездов, прежде всего, скоростью поезда и временем хода по перегонам и по линии в целом.

Дальнейшее развитие метрополитена характеризуется интегральной автоматизацией процесса управления. Примером такого построения является иерархическая 2-х-уровневая система управления метрополитеном Мюнхена [44]. Она имеет 10 блок-постов централизации, которые передают все рабочие данные в центральный пост (ЦП), где производится их обработка и представление в наглядной форме. Управление движением автоматизировано. На уровне блок-постов централизации установлена подсистема, осуществляющая автоматический контроль за движением поездов, управлением движением и указанием станции назначения. Получаемая информация о положении стрелок, занятости путей и состоянии сигналов передается системе контроля за движением поездов. Для управления движением каждому поезду присвоен номер, заключающий в себе данные о маршруте и месте назначения. Диспетчер имеет возможность выбрать номер поезда; отменить номер; указать номер вагона (подчиненность номера вагона месту отстоя); запросить номера вагонов определенного поезда; запросить местонахождение определенных вагонов; управлять указателями места назначения, сообщать в ЦП о повреждениях. Встроенная система самодиагностики быстро локализует места повреждений. Обеспечено автоматическое поступление данных о наличии тока в группах токонесущих рельсов и о путевых заграждениях. Номера вагонов выполнены так, что прочитываются машиной, а их подчиненность маршрутам позволяет подсчитывать вагоно-километры. Вся поступающая на мониторы информация вносится в магнитное запоминающее устройство, что позволяет восстанавливать невыясненные ситуации и может быть использовано для обучения. Все рейсы регистрируются в статистическом файле, что по окончании рабо-

чего дня позволяет узнать пройденный путь, отклонения от графика и спецрейсы.

Лидирующее положение в области автоматизации метрополитенов занимает Франция. На линии D метрополитена в Лионе в 1992 г. открыта линия метрополитена системы MAGGALY, на которой полностью автоматизировано управление движением поездов, а также применена централизованная подсистема диагностики поездов непосредственно в процессе их движения на линии. Разработка MAGGALY длилась 7 лет и потребовала расходов около 800 млн. франков. Особенностью системы является всеобъемлющая автоматизация: цифровое автоматическое управление с применением микропроцессоров с постоянным взаимодействием секции с центральным постом управления (ЦПУ), а с помощью проводников, уложенных на пути, на ЦПУ контролируются ускорения и замедления секции; компьютер поезда рассчитывает минимальное безопасное расстояние, применена система подвижных деформируемых участков; с ЦПУ 22 раза в секунду на поезд передается информация о скорости и месте нахождения поезда. В компьютере поезда заложена информация о расположении станций, стрелок, допустимые максимальные скорости и уклоны на линии. Получив информацию о месте расположения поезда и скорости, компьютер рассчитывает минимальное безопасное расстояние, которое должно гарантировать отсутствие столкновений и максимально возможную скорость. Таким образом, расстояния между поездами не фиксированы, изменяются в функции скорости, осуществляется гибкое отслеживание ситуации, интервал между поездами может быть уменьшен. На линии D метрополитена Лиона кроме расчетов, связанных с графиком движения поездов и контролем безопасности движения, полностью автоматизировано

управление станциями (эскалаторами, освещением, вентиляцией, средствами связи, установками для продажи и контроля билетов и т.д.) и управление энергоснабжением.

Вычислительный центр на ЦПУ состоит из 5 ЭВМ фирмы Hewlett Packard. Три машины типа HP720 осуществляют контроль графика линии D, одна ЭВМ типа 720 управляет работой информационного табло, машина HP90 управляет работой энергоснабжения. Пять машин связаны между собой в локальную сеть. Вычислители графика движения и память данных задублированы [46,47].

Метрополитен Сан-Франциско оборудован системой управления SELTRAC, установка которой обошлась в 50 млн. долл. Это позволило в 2 раза повысить пропускную способность линий метрополитена и снизить время ожидания пассажиров [48].

Аналогичные системы внедрены и на метрополитенах других стран мира [49-53]. В этой связи следует отметить, что зарубежный опыт в настоящее время на Украине может быть применен в весьма ограниченной мере. В системах управления универсальных решений не существует и поэтому нельзя экспортировать и внедрять зарубежные технологии без учета работы железнодорожного транспорта в наших условиях. Необходимо определить приоритетные направления в решении задачи комплексной автоматизации метрополитенов, что позволит развивать основные этапы работ по внедрению новых систем с учетом существенных капитальных вложений и возможностью привлечения инвесторов, заинтересованных в реконструкции железнодорожного транспорта.

Определим основной круг задач, решаемых системой управления движением поездов метрополитена. В связи с этим представляется не-

обходимым проанализировать данные о движении поездов и характеристики этого движения, подлежащие контролю и управлению [4, 38-40].

К ним в первую очередь относятся:

- данные о положении и фактическом движении поездов на линии, об установленных маршрутах, состояниях стрелок и сигналов, а также команды на изменение установок;

- график движения и отключения от него;

- скоростные ограничения, установленные на перегонах, и фактические скорости движения поездов; режимы движения по станционным путям, маневровым маршрутам, тупиковым веткам и др.

Рассмотрим подробнее все стороны этого технологического процесса. График движения поездов метрополитена устанавливает для каждого из них время отправления с начальной станции, продолжительности следования по перегонам, продолжительности стоянок на каждой станции, время прибытия на каждую станцию, порядок оборота состава. Оптимизация графика движения при его составлении и высокая точность его соблюдения особо важны для метрополитена ввиду реализуемых на нем исключительно больших размеров движения. Так, при величине данного показателя 50 пар поездов в час интервал попутного следования составляет 72с., а необходимая точность его соблюдения равна 5с. [4]. Неточность соблюдения графика движения поездов приводит к увеличению исполненных интервалов попутного следования, в результате чего реальная провозная способность метрополитена оказывается намного ниже расчетной (например, для метрополитена Торонто отличие составило 15% по результатам обследования) [54]. Большие размеры движения обуславливают практическую невозможность составления оптимального графика движения поездов вручную, поэтому данную

технологическую операцию выполняют на ЭВМ со специальным программно-алгоритмическим обеспечением [56,57]. Составленный таким образом график является плановым. В качестве меры точности его исполнения используют либо величины отклонения фактических астрономических времен прибытия и отправления поезда со станции от плановых, либо величины разностей между фактическим и плановым интервалами по прибытию и по отправлению. При этом компенсацию отклонений выполняют за счет использования ресурса стоянки и (или) ресурса времени хода по перегону [4,61] с учетом в ряде исследований и разработок информации о впереди и (или) сзади идущих поездах [39,64].

Регулирование движения поезда по перегону является важной технологической операцией, оказывающей решающее влияние на исполнение графика движения. Для поездов метрополитена характерны следующие элементы движения по перегону: разгон, выбег, торможение при контроле скорости, дополнительный режим тяги, прицельное торможение и остановка на станции, причем торможений и дополнительных режимов тяги на перегоне может быть несколько [4] в зависимости от принятого в системе алгоритма управления временем хода по перегону. Принятая ранее дискретность задания скорости составляла 10...20 км/ч [35,65] и обуславливала большое количество интенсивных подтормаживаний на перегонах, что ухудшало комфорт поездки пассажиров и характеристики энергопотребления поездной тяги. В настоящее время реализована дискретность 5 км/ч при точности фиксации фактической скорости 0,5... 1 км/ч, что дополнительно позволило существенно уменьшить потери интервала попутного следования. Последней цели можно также достичь путем повышения разгонного ускорения и тор-

возможного замедления в зоне станции [66]. Ошибка при остановке после прицельного торможения на станции не должна превышать 0,5 м [34].

Следовательно, требования к дискретности регулирования параметров движения поездов метрополитена и к точности фиксации этих параметров столь высоки, что могут быть обеспечены только при использовании автоматических систем регулирования.

Рассмотрим технологию обеспечения надежности подвижного состава - третьего из перечисленных выше факторов, определяющих безопасность перевозки пассажиров. Указанную надежность обеспечивает система плановых мероприятий, предусматривающая для каждого состава технический осмотр и профилактический ремонт при отстое на линии, периодический ремонт в депо (эти три мероприятия планируют при составлении графика движения поездов и графика оборота подвижного состава [24,73], средний и капитальный заводские ремонты, а также текущие мойку вагонов и их очистку от пыли в продувочной камере. Все перечисленные виды технического обслуживания выполняются через определенные промежутки времени, величины которых устанавливаются директивно, однако - на основе выводов и рекомендаций теории обслуживания сложных систем [74-76,81]. Как правило, эти промежутки времени опосредованно определяются пробегом подвижного состава [77], поэтому в процессе эксплуатации необходимо контролировать величину пробега каждого вагона. Для обеспечения такого контроля при выходе каждого состава из электродепо на линию за ним строго закрепляют определенные вагоны, идентифицируемые их номерами. Надежный пономерный учет пробега представляет собой организационно и технически сложную задачу, эффективное решение которой может быть

получено только при введении в практику эксплуатации средств автоматической идентификации подвижного состава [53,54].

Таким образом, анализируя совокупность операций, выполняемых в процессе эксплуатации метрополитенов, стоимостные характеристики разрабатываемых новых систем управления перевозочным процессом, а также исходя из задач, решаемых комплексом мероприятий по техническому обслуживанию электропоездов, можно отметить, что существенного повышения эффективности функционирования метрополитенов в условиях Украины можно достичь только путем поэтапного внедрения перспективных информационных технологий на базе проектирования локальных подсистем контроля и управления эксплуатационной работы метрополитенов с последующим их объединением в единую сеть.

### **1.3. Классификация методов распознавания и идентификации железнодорожных транспортных средств**

Совершенствование методологии информационного обеспечения грузовых и пассажирских перевозок тесно связано с разработкой перспективных систем управления подвижным составом, имеющих расширенные функциональные возможности, включающие функции по идентификации подвижных единиц и контроля за их передвижением.

Для решения задачи получения достоверных данных про подвижной состав применяются:

- системы диспетчерского управления движением поездов;
- подсистемы инвентарного учета и планирования использования подвижных единиц;

- подсистемы управления грузовыми перевозками; устройства учета технического состояния, распознавания и слежения за размещением подвижных единиц и др.

Методы и средства идентификации подвижного состава можно функционально разделить по уровням иерархии. На нижнем уровне находятся элементы, которые физически представляют собой датчики информации с дистанционным управлением. К ним относятся:

- рельсовые цепи [34,62,65];
- путевые датчики ДП50-80, ПБМ-56, ПСП-2, ТКП, ДМ-88 [25, 83, 85, 87];
- магнитомодуляционные путевые преобразователи [98,107];
- электронные устройства счета осей [165, 173, 181,185].

Перечисленные путевые датчики используются для определения места дислокации транспортного средства и распознавания его как единого целого, а в случае подсчета общего количества осей и для контроля прибытия поезда на станцию назначения в полном составе [78, 80, 88, 119,176]. Общим недостатком подсистем первого уровня является невозможность идентификации ими вида и номера контролируемого объекта.

Ко второму уровню принадлежат установленные в пунктах контроля локальные устройства считывания информации, обеспечивающие идентификацию контролируемых объектов и получающие исходные данные от соответствующих измерительных датчиков по априорно заданным алгоритмам и критериям качества. Например, в системе идентификации подвижного состава (АВИ) компании GRS (General Railway Signal), где используются только приемоответчик СВЧ сигналов, антенна и опрашивающее устройство или в оптических системах телевизионного обзора [95]. Ко второму уровню можно также отнести и устройст-

ва, использующие вагонные датчики пассивного типа, работающие в различных диапазонах частот [89,91,92,95].

Практическое использование подсистем распознавания второго уровня по-видимому нельзя считать перспективным, так как основная обработка информационных данных в них происходит в напольных условиях, а это требует установки наиболее ответственных измерительных элементов в непосредственной близости от контролируемых объектов, что существенно снижает их надежность работы из-за влияния атмосферных помех, возможности механических повреждений, сложности технического обслуживания и высокой стоимости применяемого оборудования (например телевизионных камер). Поэтому подсистемы второго уровня чаще всего выполняют функции локальных элементов в системах верхнего уровня.

Верхний уровень предполагает наличие устройств управления, координирующих работу различных групп подсистем второго уровня и обеспечивающих оперативную связь с расширенным кругом пользователей, а также вычислительными центрами отдельных подразделений дороги.

Одной из наиболее перспективных систем идентификации поездов в настоящее время является автоматизированная информационная система ATIS фирмы Timtec GmbH (Германия), которая обеспечивает получение полной информации о местоположении, состоянии и технической исправности грузовых вагонов и одновременно осуществляет их распознавание. Система впервые экспонировалась на выставке в Дюссельдорфе в 1995г. и имеет активный датчик, устанавливаемый на вагоне, который передает сигналы во встроенный микрокомпьютер, а затем по сети связи - на пост управления и контроля [9]. Следует отметить и

новую систему автоматического считывания номеров вагонов железнодорожной компании Nagoya Railroad Co (Япония), которая внедрена на сети пригородных и городских сообщений. Номера вагонов и служебная информация содержатся в поездном кодовом блоке. Система также измеряет моменты прохода колесных пар поезда и вычисляет расстояние между ними, что обеспечивает контроль полносоставности и дает дополнительные данные для идентификации поездов на линии.

На железных дорогах США введена в действие система автоматической идентификации подвижного состава, обеспечивающая автоматический контроль за местоположением, а также числом локомотивов и вагонов в каждом составе [79].

Система автоматического контроля поездов, разработанная фирмой GEC Alstom (Франция) включает серию различных устройств для автоматического контроля параметров движения поездов. Например, подсистема поездного контроля заданного замедления СТДС обеспечивает 16 видов информации. Помимо метрополитена в Марселе, она применена на линиях Монреаля, Бразилии, Калькутты и Каира. Принцип действия данной системы основан на использовании дорожных кодированных контуров. Если бортовая аппаратура принимает ограниченное сообщение на входе на участок, она производит замер замедления, что позволяет исключить перекрытие без необходимости обращения к бортовому спидометру [156]. Обычно в системах автоматического управления движением поездов реализуются принципы управления и технология передачи данных для обеспечения точного и безопасного движения без машиниста или с машинистом с помощью ЭВМ [157]. Такая система состоит из трех подсистем: автоматического обеспечения безопасности движения (отслеживание поездов, предотвращение столк-

новений, ограничение скорости движения, автоблокировка); автоматического управления отдельными поездами (управление от начала движения до остановки, открывание-закрывание дверей, изменение направления движения); автоматического контроля движения (контроль движения и выполнение расписания; маршрутизация; регистрация данных; контроль информации о пассажирах).

Вышеназванные системы в той или иной мере решают проблему идентификации подвижных составов. Однако основным и общим их недостатком является наличие сложного и дорогого бортового оборудования, что не позволяет распространить в полной мере данный опыт на магистральный транспорт Украины. Этими же недостатками обладают и спутниковые системы распознавания и определения местонахождение вагонов [15,16].

В литературных источниках имеется множество сообщений о разработке распознающих систем, в которых в качестве кодоносителей используются ферромагнитные колеса железнодорожных транспортных средств [102,108,112]. Такие устройства имеют целый ряд достоинств. Они реализуют региональную концепцию построения с ориентацией на незамкнутые транспортные потоки. Основным достоинством таких устройств идентификации является отсутствие на подвижных составах навесных кодовых датчиков. Поэтому при их реализации не требуется переоборудование всего вагонного парка и исключаются расходы по техническому обслуживанию кодоносителей.

В рамках отраслевых программ Министерства путей сообщения бывшего СССР, ЦУВТ МПС СССР, КБ ЦШ МПС СССР и Центрального научно-исследовательского института комплексной автоматизации (ЦНИИКА, Москва) на кафедре электротехники Харьковской государ-

ственной академии железнодорожного транспорта автором проводились исследования по оценке возможности использования для записи и дальнейшего хранения магнитной информации на колесных парах подвижного состава. Полученные в результате испытаний данные показали, что остаточная магнитная индукция колесной стали [101] сохраняется длительное время, а её уровень стабилизируется и практически не изменяется на протяжении двух-трех лет эксплуатации вагонов после пробега ими первых 5-12 тыс. км. При этом влияние на уровни внешних магнитных полей, создаваемых колесными парами, атмосферных и электромагнитных помех, а также тяговых токов оказалось несущественным. Тем не менее, использовать для построения систем распознавания вагонов магнитные метки, нанесенные на колесные пары тележек и представляющие собой локальные зоны с неоднородной намагниченностью и разной полярностью уровней остаточной магнитной индукции, [97, 166-175, 182-186] по всей видимости, нецелесообразно. В этом случае аппаратура записи и считывания информации получается настолько сложной и энергоёмкой, что реализовать ее в промышленном масштабе практически невозможно. Более перспективным в системах распознавания подвижных составов является использование для идентификации не магнитных меток, нанесенных на колесные пары, а самих колесных пар, вагонных тележек и даже целых вагонов в качестве единичных бит информации [115, 160-164, 174-180].

\*  
формации [115, 160-164, 174-180].

Таким образом, учитывая, что в силу сложившейся в нашей стране сложной экономической ситуации, наличия большого количества транспортных коридоров, а также трудностей быстрой реализации наукоемких технических решений на магистральном транспорте Украины нельзя в полной мере использовать ни одну из существующих систем

распознавания подвижных составов. Поэтому в диссертационной работе предпринята попытка создания методологии построения распознающих систем, позволяющей заполнить этот пробел и которая может быть поэтапно внедрена в сжатые сроки на магистральном транспорте.

#### **1.4. Постановка задачи, цель и методика исследований**

Устройства идентификации подвижного состава широко применяются на железных дорогах мира на магистральном, промышленном транспорте и метрополитенах. Это в первую очередь относится к системам, предполагающим установку на вагонах активных или пассивных кодоносителей. Однако использование существующих устройств распознавания на магистральном транспорте Украины затруднительно, так как обеспечить оборудование всего вагонного парка навесными датчиками практически невозможно. Можно констатировать и отсутствие в настоящее время общей методологии построения распознающих систем, ориентированных на незамкнутые транспортные потоки. В связи с выше сказанным основной целью исследований, которым посвящена данная диссертационная работа, является совершенствование методологии информационного обеспечения процесса грузовых и пассажирских перевозок на основании комплексной автоматизации методов и средств распознавания подвижных объектов железнодорожного транспорта.

Для достижения заданной цели в работе поставлены следующие основные задачи научных исследований:

1. Провести анализ литературных источников по проблеме идентификации железнодорожных транспортных средств и обосновать ис-

пользование наиболее приемлемых из них для подвижных составов магистрального транспорта Украины.

2. Разработать методологию построения новых информационных технологий, повышающих эффективность эксплуатации транспортных средств на основании автоматизации процесса распознавания образов контролируемых объектов.
3. Разработать математические модели информационных задач комплексной автоматизации процессов идентификации транспортных средств.
4. Разработать методы построения информационных систем на основании новых технологий передачи данных подвижными составами железнодорожного транспорта.
5. Разработать математические модели приема и обработки информационных сигналов, которые поступают от объектов, которые контролируются.
6. Реализовать предложенную методологию построения систем информационного обеспечения перевозочного процесса в виде эффективных автоматизированных подсистем.

### **1.5. Выводы по разделу 1**

1. Анализируя существующие методы и средства идентификации подвижных составов железных дорог и исходя из задачи построения эффективных систем управления перевозками, можно отметить, что составной частью концепции информатизации железнодорожного транспорта является создание высокоэффективных средств автоматического съема информации о подвижном составе и его состоянии.

2. В связи с переходом экономики Украины к рыночным отношениям особенно остро встает проблема повышения качества и доступно-

сти предоставляемых железными дорогами транспортных услуг. Повысить эффективность обслуживания клиентов при одновременном снижении транспортных расходов можно путем внедрения новых информационных технологий в процесс диспетчерского управления грузовыми и пассажирскими перевозками.

3. Технический прогресс на магистральном железнодорожном транспорте тесно связан с совершенствованием методологии информационного обеспечения систем управления грузовыми и пассажирскими перевозками, реализация которой возможна на основе комплексной автоматизации методов и средств распознавания контролируемых объектов.

4. Совершенствование методологии информационного обеспечения перевозочного процесса тесно связано с разработкой перспективных систем управления транспортными средствами, имеющих расширенные возможности, включающие функции по идентификации подвижных единиц и контроля за их передвижением.

5. Учитывая наличие в существующих системах распознавания подвижных составов сложного бортового оборудования и его высокую стоимость, на магистральный транспорт Украины в настоящее время невозможно в полной мере распространить зарубежный опыт по идентификации поездов.

6. Решение задачи автоматизации процессов информационного обеспечения перевозок возможно на основе интеграции в существующие методы управления эксплуатационной работой информационных технологий, ориентируемых на незамкнутые транспортные потоки. Данная проблема является весьма актуальной и её решению посвящена диссертационная работа.

## РАЗДЕЛ!

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ РАСПОЗНАВАНИЯ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

#### **2.1. Моделирование технологических процессов магнитной обработки колесных пар подвижного состава**

Эффективность работы железнодорожного транспорта во многом зависит от информационного обеспечения систем диспетчерского управления процессами перевозок. Моделирование поездного положения в реальном масштабе времени требует внедрения новых методов сбора, ввода, обработки и передачи сообщений о передвижениях транспортных средств. Одним из перспективных направлений решения данной проблемы является внедрение новых технологий распознавания подвижных объектов, основанных на использовании колесных пар вагонов для магнитной записи, хранения и передачи информационных сообщений. Это исключает установку на контролируемых объектах датчиков идентификационного кода, что позволяет реализовать региональную концепцию построения системы идентификации поездов [102,106,108,112].

Для построения автоматизированных систем распознавания транспортных средств, использующих в качестве маркеров пассивного типа колесные пары вагонов, необходимо выделить определенный круг задач, включающих выполнение следующих операций.

1. Предварительную магнитную обработку всех колесных пар подвижного состава источником постоянного электромагнитного поля одного направления.

2. Автоматическое распознавание и счет отдельных транспортных средств, входящих в подвижной состав.

3. Кодирование контролируемого объекта по априорно заданному алгоритму путем магнитной обработки колесных пар источником постоянного электромагнитного поля различного направления.

4. Считывание информационных сигналов с колесных пар подвижного состава магнитомодуляционными преобразователями и передача данных об индивидуальном коде-идентификаторе идентифицируемого объекта в региональные контрольные пункты системы диспетчерского управления движением поездов.

На рис.2.1, представлена обобщённая функциональная схема устройства, реализующая выше указанные принципы кодирования вагонов.

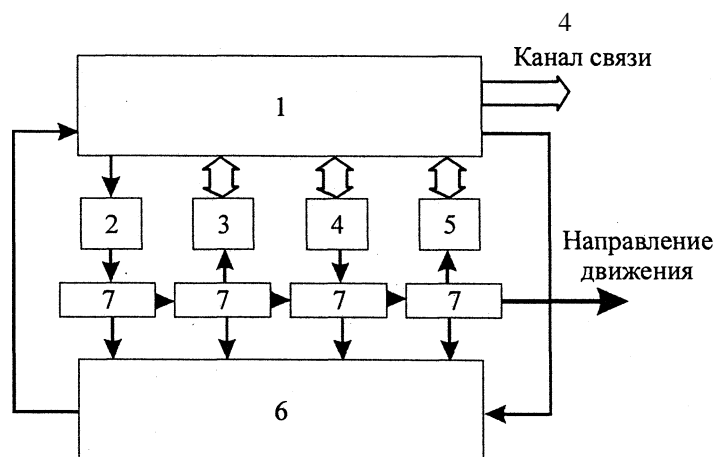


Рис.2.1. Функциональная схема системы идентификации подвижных составов

1 - блок управления; 2 - блок магнитной обработки колесных пар вагонов; 3 - блок автоматического распознавания и счета транспортных средств; 4 - блок кодирования подвижного состава; 5 - блок считывания информационных сигналов; 6 - блок путевых датчиков; 7 - подвижной состав

Одним из основных элементов рассматриваемой системы идентификации является блок магнитной обработки и кодирования колесных пар вагонов, состоящий из устройства управления и путевого электромагнита постоянного тока - функционального намагничивателя (рис.2.2), который обеспечивает магнитную обработку и намагничивание колесных пар вагонов [116,160,161,163,164,171].

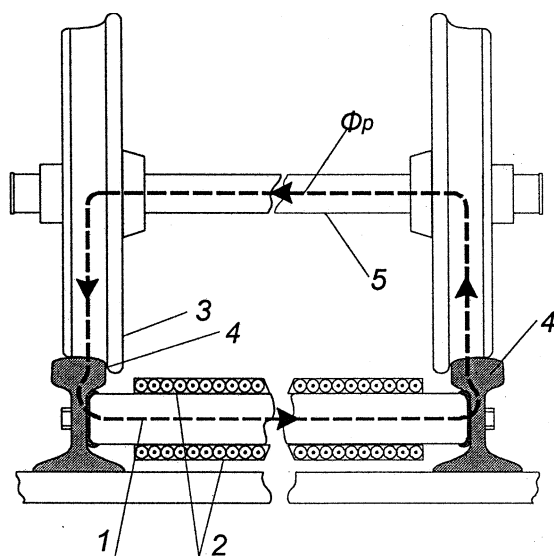


Рис. 2.2. Функциональный путевой намагничиватель:

1 - ферромагнитный сердечник намагничивателя; 2 - обмотки электромагнита; 3 - колесная пара; 4 - головка рельса; 5 - ось колесной пары;  $\Phi_p$  - магнитный поток.

При вступлении поезда на участок кодирования от путевых датчиков на блок управления поступает информация о наличии колесной пары в зоне действия электромагнитного поля намагничивателя. Коммутируя полярность тока в обмотке электромагнита, можно изменять направление магнитного потока  $\Phi_p$ , замыкающегося через колесную пару, и таким образом кодировать подвижной состав [100].

Знание конкретных зависимостей распределения электромагнитного поля в магнитопроводах функциональных намагничивателей в значительной степени облегчает оптимизационные задачи, связанные с проектированием и разработкой реальных объектов магнитной обработки колес подвижного состава. Эти зависимости могут быть получены либо численными методами расчетом на ЭВМ (методом конечных разностей, методом конечных элементов, универсальным методом Иванова-Смоленского и т.п.), описанными в [121-124], либо с помощью моделей прямой аналогии [125], используя сеточные модели и АВМ для получения качественных характеристик. Несмотря на успехи в развитии методов расчета электромагнитных полей с использованием ЭВМ и безусловной прогрессивности этого направления, еще длительное время будут находить место работы, посвященные аналоговому моделированию. Думается, что это объясняется достаточно глубокими причинами.

Во-первых, это малая «эффективность» численных решений. Решение каждой задачи - это решение одной конкретной задачи. Обобщение же результатов решений в настоящее время отсутствует.

Во-вторых, это слабая наглядность численных решений. Даже после решения целого ряда задач не удастся предвидеть изменение параметров магнитного поля при изменении граничных условий.

В-третьих, большая трудоемкость решения даже отдельных конкретных задач.

С подобными сложностями сравнительно просто можно справиться, используя методы аналогового моделирования. В настоящее время практика ставит задачи расчета электромагнитных полей в нелинейных средах с учетом гистерезиса и вихревых токов. Следовательно, наряду с развитием численных методов, целесообразно развивать и методы аналогового моделирования. Основная область применения нелинейных сеточных моделей - моделирование распределения магнитного поля в ферромагнитных элементах электрических аппаратов и машин, а также определение картины поля в различных зонах путевых магнитных датчиков, к числу которых можно отнести и функциональные намагничиватели.

Реальный ферромагнитный материал обладает целым набором свойств, которые с трудом моделируются свойствами других объектов. Так, например, создание моделей на основе сегнетоэлектриков не позволяет строить сеточные модели стационарных полей, а моделирование пространственно-периодического магнитного поля с помощью варикондов требует огромных напряжений и, следовательно, это сильно затрудняет проведение экспериментов. Рациональным выходом из ситуации подобного рода может быть моделирование ферромагнитного материала самим ферромагнитным материалом. При этом необходимо создать такую ячейку модели, в которой бы присутствовали явления гистерезиса, вихревых токов, адекватно проявлялась бы нелинейность, а, кроме того, ячейка должна быть «элементом», т.е. отдельным устройством, связываемым с другими элементами через электрические величины - ток и напряжение.

Задача создания подобной моделирующей сетки может быть решена, если удачно будут определены величины, изображающие магнитный поток, индукцию, напряженность магнитного поля, наряду с физическим существованием последних.

Кроме того, необходимо решать вопросы, связанные с многомерностью требуемого элемента замещения нелинейной ферромагнитной среды. В рассмотренной выше литературе такая задача не решалась и не ставилась, поэтому создание сеточной модели для аналогового моделирования целесообразно начать со сравнительного анализа общего случая уравнений, описывающих напряжения и токи сетки, состоящей из нелинейных элементов, и определить аналогии. Следовательно, целью настоящей части работы является обоснованный выбор электрических величин, изображающих характеристики магнитного поля.

В настоящее время появился ряд публикаций [127-129], в которых представлены решения нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных для задач распределения электромагнитного поля в различных областях электромагнитных аппаратов. Решения этих уравнений находились численными методами с использованием ЭВМ. Авторам удалось достаточно точно и с приемлемой сходимостью решить уравнения, описывающие электромагнитное поле. Сложность решения таких задач заключается в задании граничных условий на поверхности сред и в особых точках. Для задания граничных условий необходимо вычислить, а в большинстве случаев измерить параметры электромагнитного поля на границах раздела сред. Измерение параметров поля в электромагнитной цепи практически всегда связано с изменением картины электромагнитного поля вследствие внесения всякого рода измерительных и первичных

преобразователей. Допущения же, принимаемые при задании граничных условий, в работах [127-129] и др. не всегда корректны и точны.

Важным моментом изучения полей является также учет при моделировании вихревых токов в ферромагнитных массивах рассматриваемых объектов. С созданием нелинейных элементов сеточной модели для замещения ферромагнитных сред, учитывающих явление гистерезиса [130], появилась возможность создания аналоговых моделей электромагнитных аппаратов и магнитных первичных преобразователей, которые с достаточной степенью точности воспроизводили бы распределение электромагнитных полей.

Для удобства описание электромагнитного поля, создаваемого первичным преобразователем (функциональным намагничивателем), разобьем условно на три зоны:

1. ферромагнитные участки магнитопроводов;
2. воздушные зазоры;
3. зоны намагничивающих обмоток с током.

Уравнения Максвелла для каждой из зон имеют специфические особенности, основанные на допущениях, которые принимаются при описании электромагнитного поля. Система уравнений Максвелла в общем виде записывается следующим образом:

$$\operatorname{div} \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} + \mathbf{j} + \mathbf{j}_{\text{пн}}, \quad (2.1)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = -\rho, \quad (2.2)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = 0, \quad (2.3)$$

$$\mathbf{B} = \mu_a \mathbf{H}, \quad (2.4)$$

где  $\mathbf{H}$  - напряженность магнитного поля;

$\gamma$  - удельная электрическая проводимость среды;

$E$  - напряженность электрического поля;

$D$  - электрическая индукция;

$j_{\text{СП}}$  - плотность стороннего тока;

$B$  - магнитная индукция;

$\mu_0$  - абсолютная магнитная проницаемость.

Для первой зоны справедливы следующие допущения:

- а) предварительно расчет и моделирование производим без учета вихревых токов, поэтому

$$j_{\text{ХЯ}} = 0 \quad (2.5)$$

- б)  $\mu_a = \mu_a(n)$  - нелинейная функция.

С учетом сделанных допущений запишем

$$\text{div} B = \text{div} \mu_0 \mu_a H = \text{div} \mu_0 \mu_a j_{\text{ХЯ}} = 0$$

$$\text{div} \mu_a H = 0$$

$$B = \mu_a \nabla A, \quad (2.7)$$

где  $\mu_a$  - относительная магнитная проницаемость среды;

$A$  - магнитный векторный потенциал.

Запишем уравнение (2.6) в декартовой двухмерной системе координат для плоского сечения магнитопровода

$$\frac{1}{\mu_a} \frac{\partial A}{\partial x} = \frac{j_{\text{ХЯ}}}{\mu_0} \frac{\partial A_x}{\partial y}$$

ИЛИ

$$\left| \begin{array}{ccc} i & 7 & 0 \\ \partial & \partial & \rho \\ \partial x & & \\ 0 & 0 & \frac{1}{JU(n)} \frac{\partial A_v}{\partial x} y_- \end{array} \right| - \left| \begin{array}{ccc} i & j & 0 \\ \partial & \partial & \rho \\ \partial x & \partial y & 1 \frac{\partial A_x}{\partial x} \\ 0 & 0 & p(n) \partial y \end{array} \right| - \rho$$

Отсюда следует, что

$$\frac{1}{\Gamma} \frac{\partial A_y}{\partial x} \frac{d}{dx} \left( \frac{1}{\rho(n)} \frac{\partial A}{\partial x} \right) - \frac{1}{\rho(n)} \frac{\partial A}{\partial x} \frac{d}{dx} \left( \frac{1}{\rho(n)} \frac{\partial A}{\partial x} \right) - \frac{1}{\rho(n)} \frac{\partial A}{\partial x} \frac{d}{dx} \left( \frac{1}{\rho(n)} \frac{\partial A}{\partial x} \right) = 0 \quad (2.8)$$

(2.9)

До сих пор дивергенция вектора  $A$  не была определена. Фактически она может быть определена любым удобным способом, при этом только не должно нарушаться основное уравнение (2.6). Поскольку при вычислениях проще и удобнее иметь дело с уравнениями для разделенных компонент, с целью их разделения в уравнениях (2.8) и (2.9) и по соображениям удобства можно определить дивергенцию вектора  $A$  следующим образом [131]:

(2-Ю)

В двумерном приближении выражение (2.10) будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{1}{D'L} \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y}$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu(H)} \frac{\partial A_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu(H)} \frac{\partial A_y}{\partial y} \right) \right] + \vec{j} = 0;$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu(H)} \frac{\partial A_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu(H)} \frac{\partial A_y}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu(H)} \frac{\partial A_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu(H)} \frac{\partial A_y}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.12)$$

Подставив соответственно уравнения (2.11) и (2.12) в (2.8), получим

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu(H)} \frac{\partial A_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu(H)} \frac{\partial A_y}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu(H)} \frac{\partial A_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu(H)} \frac{\partial A_y}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.14)$$

В общем случае уже уравнения (2.13) и (2.14) являются уравнениями с разделенными компонентами, описывающими распределение электромагнитного поля в нелинейной ферромагнитной среде первичных путей преобразователей, однако для выявления

подобия между  
магнитным полем в

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) = 0 \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) = 0 \end{aligned}$$

удобно в дальнейшем пользоваться зависимостями

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) = 0. \quad (2.16)$$

В том случае, когда при расчете и моделировании производится учет вихревых токов, справедливо уравнение

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} \quad (2.17)$$

при допущении, что отсутствуют другие сторонние токи и токи электрического смещения или последними можно пренебречь.

Используя векторные преобразования [24] можно записать уравнение (2.17) в следующем виде:

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mathbf{j} \quad (2.18)$$

Для второй зоны справедливы следующие допущения:

а)  $\nabla \times \mathbf{H}$ ;

С учетом этих допущений запишем

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} \implies \nabla \times \mathbf{B} = 0;$$

Mo

$$V \times B = V \times V \times 2 = v(v - j_4) - V^2 \wedge = 0.$$

Пусть  $A=0$ , тогда

$$V^2 = 0$$

$$v^2 = 0 \tag{2-19}$$

$$N^2 A_y = 0, \tag{2.20}$$

Во второй зоне верно также и выражение для скалярного магнитного потенциала

Отсюда

$$V^2 < p_m = 0. \tag{2.21}$$

Для третьей зоны справедливы следующие допущения:

а)  $A = \text{const.}$ ;

б)  $L = 0$ ;

г)  $y = \text{const.}$

С учетом допущений запишем

$$V \times \vec{E} = y \vec{f};$$

$$y \vec{E} = \frac{\partial B}{\partial t} \vec{i};$$

$$B = \sqrt{y} x A.$$

Преобразуя эти выражения, получим

$$V \times E = -V \times \frac{\partial B}{\partial t} \vec{i} \quad \text{или} \quad V \times E + \frac{\partial B}{\partial t} \vec{i} = 0.$$

Если ротор вектора равен нулю, то поле этого вектора - потенциальное. Поэтому можно принять

$$\vec{E} = -\frac{d}{dt} \text{grad } (p), \quad (2.22)$$

где  $(p$  - потенциал электрического поля.

Используя (2.22), запишем уравнение (2.17) как

$$(2.23)$$

Дивергенцию вектора  $A$  определим в этом случае следующим образом:

$$\text{div } A = -\text{grad } p.$$

С учетом заданной дивергенции выражение (2.23) окончательно примет вид

$$\frac{\partial}{\partial t} = 0 \quad (2.24)$$

или в случае плоского поля

$$\text{div } A = 0 \quad (2.25)$$

Можно также показать, что и для вектора магнитной индукции  $B$  справедлива формула

$$\text{div } B = 0 \quad (2.27)$$

Итак, магнитное поле во всех трех зонах первичного преобразователя (функционального намагничивателя) описывается дифференциальными уравнениями с разделенными компонентами относительно магнитного векторного потенциала  $A$ . Представление уравнений в таком виде необходимо для определения подобия между

описанием электромагнитного поля функционального намагничивателя и электрическим состоянием сеточной модели. В этом случае значительно уменьшается число моделируемых характеристик, а также упрощается схема ячейки замещения моделируемой среды и способы задания граничных условий для решения поставленной задачи.

## **2.2. Расчет и синтез электрической сетки для моделирования электромагнитного поля в отдельных зонах первичных путевых элементов функционального намагничивателя**

Как было отмечено в предыдущем разделе, распределение электромагнитного поля, создаваемого первичным преобразователем, описывается:

- нелинейными уравнениями (2.15), (2.16) и (2.18); уравнением Лапласа для скалярного (2.21) и векторного (2.19) и (2.20) магнитных потенциалов;

- уравнением Пуассона для магнитного векторного потенциала (2.24) и для индукции (2.27).

На их основе необходимо рассчитать и синтезировать сеточные модели для соответствующих зон первичного преобразователя.

Пусть распределение напряжений  $U$  в узлах электрической сетки для моделирования в первой зоне описывается некоторой функцией координат сплошной проводящей среды, которую электрическая сетка замещает. Запишем напряжения в смежных узлах плоской электрической сетки без источников и стоков в следующем виде (узлы 0, 1, 2, 3, 4):

- 0)  $u(x, y)$ ,  
 1)  $U(x + \Delta x, y)$ ;  
 2)  $U(x - \Delta x, y)$ ;  
 3)  $U(x, y + \Delta y)$  +  $U(x, y - \Delta y)$ ;  
 4)  $u(x, y - \Delta y)$ .

Проводимости  $g$  ( $k=1, 2, 3, 4$ ) элементов, включенных между узлом 0 и смежными узлами сетки, выберем следующим образом:

$$g_{10} = g_{20} = g_x = \gamma \Delta x, \\ g_{30} = g_{40} = g_y = \gamma \Delta y, \quad (2.28)$$

где  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  - шаг разбиения области на элементарные площади в направлении соответствующих координат.

Токи, втекающие в узел сетки 0 из остальных узлов, определяются формулами

$$z_{10} = [t(x + \Delta x, y) - u(x, y)]g_{10}; \\ z_{20} = [t(x - \Delta x, y) - u(x, y)]g_{20}; \\ z_{30} = [t(x, y + \Delta y) - U(x, y)]g_{30}; \\ z_{40} = [t(x, y - \Delta y) - U(x, y)]g_{40}. \quad (2.29)$$

Если представить разности напряжений в (2.29) в виде рядов Тейлора и использовать выражения (2.26), то получим уравнения для токов сетки в виде

$$z_{i0} = \gamma \Delta x \Delta y \left[ \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \frac{\Delta x^2}{2} + \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \frac{\Delta x^3}{6} + \frac{\partial^3 U}{\partial x^3} \frac{\Delta x^4}{24} \right]$$

$$\begin{aligned}
 u_{k0} &= y \cdot Ax - Ax \frac{dU}{dx} - \frac{Ax^2}{2} \frac{d^2U}{dx^2} - \frac{Ax^3}{6} \frac{d^3U}{dx^3} - \frac{Ax^4}{24} \frac{d^4U}{dx^4} \\
 u_{k0} &= y \cdot Ay - Ay \frac{dU}{dy} - \frac{Ay^2}{2} \frac{d^2U}{dy^2} - \frac{Ay^3}{6} \frac{d^3U}{dy^3} - \frac{Ay^4}{24} \frac{d^4U}{dy^4}
 \end{aligned} \quad (2.30)$$

$$\frac{d^2U}{dx^2} \frac{\partial^2 u_{k0}}{\partial y^2} - \frac{d^2U}{dy^2} \frac{\partial^2 u_{k0}}{\partial x^2} + R = 0$$

где  $x_k, y_k$  - координаты некоторых точек в интервале между соответственно пронумерованным узлом сетки  $k$  и узлом  $0$ , которые определяют величину остаточных членов рядов Тейлора.

Используя закон Кирхгофа для узла сетки  $0$ , получим уравнение, описывающее электрическую сетку

$$\frac{d^2U}{dx^2} + \frac{d^2U}{dy^2} + R = 0. \quad (2.31)$$

Следовательно, электрическая сетка без стоков и источников, составленная из одинаковых элементов, приближенно удовлетворяет уравнению Лапласа

$$\frac{d^2U}{dx^2} + \frac{d^2U}{dy^2} = 0. \quad (2.32)$$

Такая сетка может быть использована для моделирования лишь во второй зоне с некоторой погрешностью  $R$ . Приняв шаг сетки одинаковым в направлении всех координатных осей

$$h = Ax = Dy, \quad (2.33)$$

можно записать

$$\frac{h^2}{24} \frac{d^4U}{dx^4} + \frac{h^2}{24} \frac{d^4U}{dy^4} = R \quad (2.34)$$

Если в предыдущих выкладках принять, что проводимость элемента сетки зависит от проходящего по элементу тока, а затем выражения для проводимостей преобразовать с помощью рядов Тейлора, как показано в [125], то получим уравнение для сетки, моделирующей распределение магнитного поля в первой зоне первичного преобразователя без учета вихревых токов

$$\Delta x \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \sigma \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \sigma \frac{\partial U}{\partial y} \right) \right) + R U = 0$$

или с учетом (2.33) для одинакового шага сетки

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \sigma \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \sigma \frac{\partial U}{\partial y} \right) + R U = 0 \quad (2-35)$$

где  $\sigma$  - электрическая проводимость элемента сетки.

В третьей зоне первичного преобразователя моделирование электромагнитного поля необходимо произвести в среде, занятой токами. Для получения уравнений состояния электрической сетки, аналогичных уравнениям (2.24), (2.25), (2.26), (2.27), положим, что источник тока  $I$  описывается некоторой функцией

$$I = A_x A_y \cdot \sigma f(x, y), \quad (2.36)$$

а проводимость нагрузки (сток) -

$$Y = Y_0(x, y) A_x A_y. \quad (2.38)$$

В этом случае сеточная модель при наличии источников и стоков будет описываться уравнением для однородной изотропной среды

$$\begin{aligned} \text{Дх-Ду-} \quad & \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \gamma \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \gamma \frac{\partial U}{\partial y} \right) + R \right] = \\ & = 4x + 1y[\text{ст}(x, y) + U - Y_0(x, y)] \end{aligned} \quad (2.38)$$

где  $\text{ст}(x, y)$  - плотность тока источника;  
 $Y(x, y)$  - удельная проводимость стока.

При наличии одних только источников получаем уравнение Пуассона

$$\begin{aligned} \Delta^2 u = -i / \chi \quad & \text{и} \\ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = -a(x, y) \quad & (2.39) \end{aligned}$$

При наличии одних только стоков, выполненных в виде емкостных нагрузок узлов, приходим к уравнению Фурье. Ток в емкостной нагрузке стока в операторной форме запишется в виде

$$I_c(p) = Y_c(p)U = pcU,$$

где  $p$  - оператор дифференцирования.

Переходя к оригиналам, получим

$$I_c = C_{\Delta} = L_{\Delta} \cdot L_{\Delta} \cdot Y_c \cdot C_{\Delta} \quad (2.40)$$

Уравнение (2.36) при этом приобретает вид

$$\Delta^2 u + \dots = \dots \quad (2.41)$$

Можно также показать, что при моделировании нестационарных полей (областей, занятых током), сетка описывается уравнением

$$Y + R = C_0 \cdot h \cdot \dots \quad (2.42)$$

Погрешность замены непрерывной среды электрической сеткой  $R$  можно оценить с помощью численных методов либо выявить экспериментально в процессе моделирования, для чего моделируемая область набирается дважды, но с различным шагом сетки. Так как

погрешность изменяется пропорционально квадрату шага сетки, то ее можно оценить по разности двух решений.

В результате математических преобразований системы уравнений Максвелла (2.1) - (2.4), а также вывода уравнений состояния электрической сетки для распределения электромагнитного поля в различных зонах первичного преобразователя функционального намагничивания (2.32), (2.35), (2.39), (2.41) и (2.42) можно провести аналогию между полем и сеткой с целью создания адекватной модели. Эта аналогия уравнений дает возможность получить аналогию параметров (табл. 2.1) и синтезировать три типа электрических сеток для моделирования электромагнитных процессов в трех зонах первичных преобразователей.

Таблица 2.1

Подобие уравнений, описывающих распределение поля функционального намагничивателя, и уравнений состояния электрической сетки

|  | Электромагнитное поле  | Электрическое поле тока сетки   |
|--|--|---|
| 1                                      | 2  | 3   |
| Первая зона, область, не занятая током | Магнитный векторный потенциал $A$<br>Абсолютная магнитная проницаемость $\mu$ (Я)<br>Напряженность магнитного поля $H$<br>Магнитная индукция $B$ | Напряжение на сетке $U$<br>Сопротивление элемента сетки $r(z / h)$<br>Ток через элемент сетки $i/h$<br>Напряженность электрического поля на сетке $E=U/l$ |

Продолжение табл. 2.1

| 1   | 2  | 3  |
|---|--|--|
| Первая зона,<br>область,<br>занятая током | Магнитная индукция $B$<br><br>Абсолютная магнитная<br>проницаемость $\mu_a(H) = \frac{B}{H}$<br>Напряженность магнитного поля<br>$H$<br>Удельная электропроводность $\gamma$                               | Напряжение на<br>сетке $U$<br>Сопротивление<br>элемента сетки<br>$r(z)=u/i$<br>Ток через элемент<br>сетки $i$<br>$C_0 \cdot h$   |
| Вторая зона                               | Магнитный векторный $A$ либо<br>скалярный $\langle p_m \rangle$ потенциалы<br>Магнитная постоянная $\mu_i$<br>Напряженность магнитного поля<br>$H$<br>Магнитная индукция $B$                               | Напряжение на<br>сетке $U$<br>Сопротивление<br>элемента сетки $\gamma_0$<br>Ток через элемент<br>сетки $i/h$<br>Напряженность<br>электрического<br>поля на сетке $E=U/k$   |
| Третья зона                               | Магнитный векторный потенциал<br>$A$ либо магнитная индукция $B$<br>Магнитная постоянная $\mu_0$<br>Удельная электропроводность $\gamma$<br>Напряженность магнитного поля<br>$H$<br>Магнитная индукция $B$ | Напряжение на<br>сетке $U$<br>Сопротивление<br>элемента сетки<br>$\frac{1}{\gamma_0}$<br>$u \sim \gamma$<br>$C_0 \cdot h$<br>Ток через элемент<br>сетки $i/h$ либо $i$<br>Напряженность<br>электрического<br>поля на сетке $E$ |

Важным моментом для построения аналоговой модели функционального намагничивателя является выбор элемента замещения нелинейной ферромагнитной среды, учитывающего явления анизотропии материала и гистерезиса. Один из возможных вариантов реализации такого устройства предложен д.т.н. Финкельштейном В.Б. и

разработан автором совместно с инж. Золочевским Л.Н. (см.рис. 2.3.)  
[130].

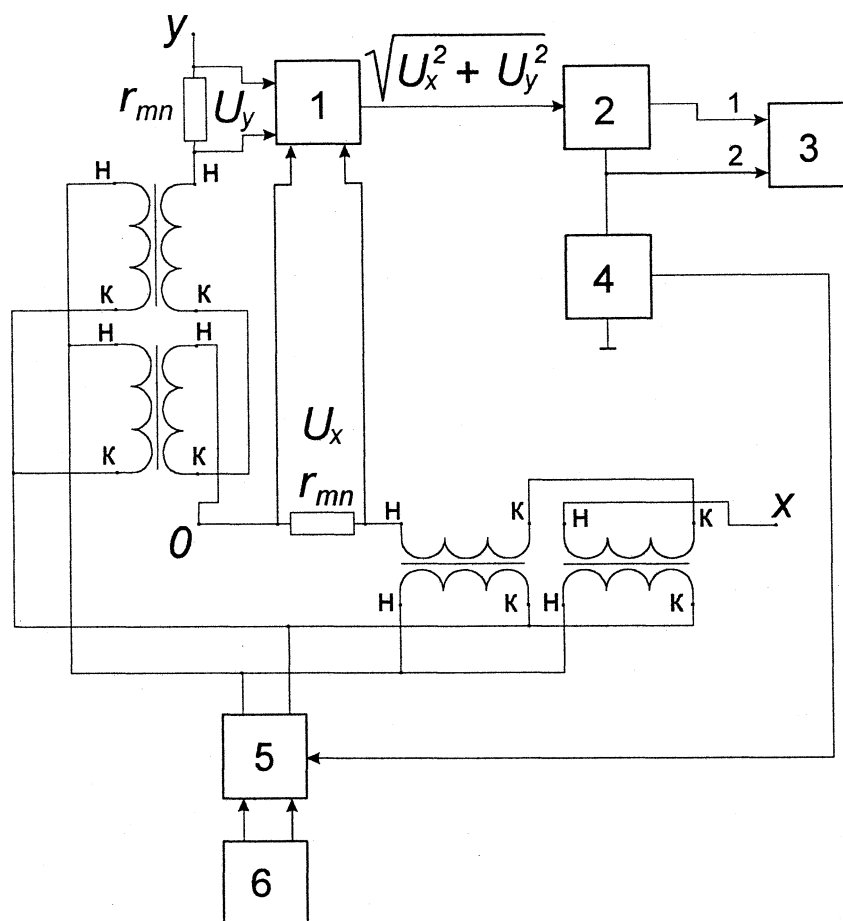


Рис. 2.3. Элемент замещения нелинейной ферромагнитной среды для моделирования поля в нелинейных анизотропных ферромагнитных средах с учетом гистерезиса:

1 - вычислитель, 2 - катушка индуктивности, 3 - делитель напряжения, 4 - датчик тока, 5 - блок умножения на постоянные коэффициенты, 6 - формирующий блок

Сигналы  $U_x$ ,  $U_y$ , пропорциональные токам, проходящим по ортогональным элементам ячейки замещения (см. рис 2.3), снимаемые с датчиков  $g$  и  $g$ , поступают в блок вычислителя 1, который реализует зависимость

$$U_i = yjUx^2i + Uy^2i.$$

Это соответствует уравнению, описывающему состояние плоского магнитного поля в любой точке функционального намагничивателя

$$H = \sqrt{H^2x + H^2y}.$$

Сигналом, моделирующим напряженность магнитного поля, воздействуют на катушку индуктивности 2, сердечник которой изготовлен из материала объекта моделирования (например, из ферромагнетика). В результате такого воздействия индуктивность катушки 2 изменяется нелинейно согласно формуле

$$\underline{Vx^2i + Vy^2i} \tag{2.42}$$

где  $I_t(L)$  - ток, проходящий через катушку индуктивности 2;

$W$  - угловая частота тока.

Зависимость (2.42) может быть реализована с помощью блока деления 3, на первый вход которого поступает уровень напряжения на катушке индуктивности 2, а на второй - сигнал, пропорциональный  $7/(z)$  с датчика тока 4. Выход делителя 3 через блок умножения на постоянные коэффициенты 5, формируемые блоком 6, соединен со вторичными обмотками трансформаторов в ортогональных элементах ячейки замещения, чем осуществляется изменение их индуктивности (а следовательно, и магнитной проницаемости), аналогичное (2.42), путем подмагничивания сердечников по вторичным обмоткам. С помощью блоков 5 и 6 можно в ручном или в автоматическом режиме изменять свойства моделирующей системы по направлениям (моделировать анизотропию). Чтобы исключить любые другие влияния вторичных токов на первичные параметры элементов ячейки, кроме подмагничивания, все обмотки трансформаторов должны быть

идентичными друг другу, а сердечники их - ненасыщенными.

Выполним анализ распределения электромагнитного поля в торцевых зонах функционального намагничивателя. Под функциональным намагничивателем (ФН) будем понимать электромагнитный аппарат (путевой элемент), оказывающий воздействие по заданному алгоритму (функциональному воздействию) на объект подвижного состава посредством магнитного поля. По назначению ФН делятся на записывающие, фиксирующие, стирающие и считывающие информацию с подвижных ферромагнитных объектов железнодорожного транспорта. По конструктивному исполнению ФН могут иметь магнитопровод с воздушным зазором или осуществлять контактное намагничивание колесных пар в зависимости от места установки электромагнитного аппарата. Контактные ФН оказывают большее воздействие на подвижной объект, нежели ФН с воздушным зазором, вследствие меньшего магнитного сопротивления магнитопровода при одинаковых значениях намагничивающей силы. Поэтому, думается, что контактные ФН найдут большее распространение в устройствах идентификации транспортных единиц подвижного состава. Рассмотрим вопрос распределения магнитного поля в торцевой зоне контактного ФН, установленного так, что рельсы являются полюсными наконечниками электромагнита, а накатывающиеся колесные пары - частью замкнутого магнитовода путевого элемента. Такой вопрос возникает при разработке и проектировании электромагнитных аппаратов, а также при оптимизации сердечников намагничивателей. На рис. 2.4 показана торцевая зона функционального намагничивателя 2, укрепленного с помощью дополнительных полюсных наконечников с внутренней стороны рельса 1.

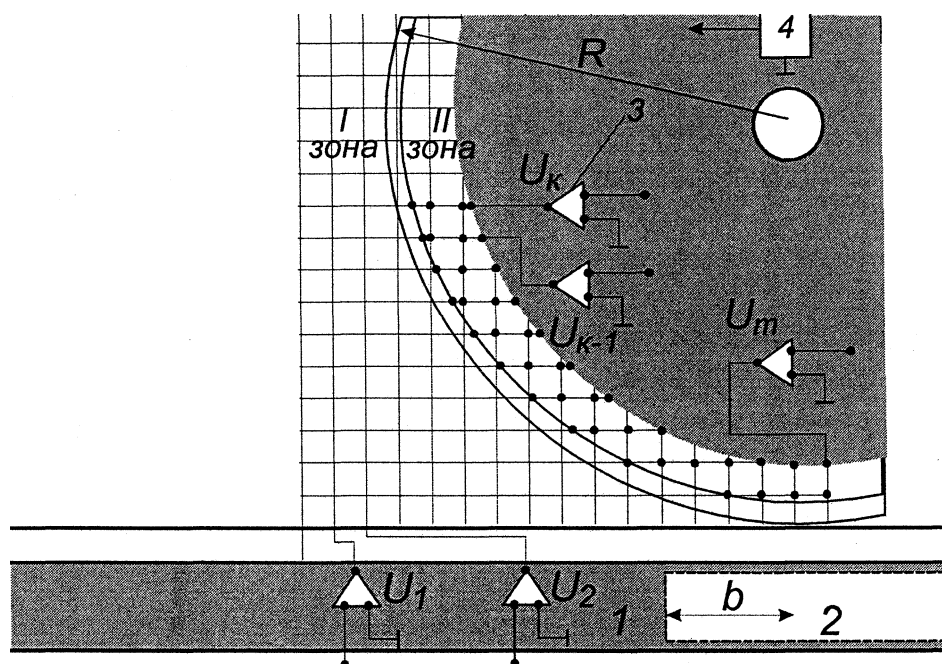


Рис.2.4. Набор круговой границы сеточной модели с помощью проводящего контура

Сеточная модель набиралась из двух типов элементов: линейных - для моделирования распределения магнитного поля в воздушном зазоре и нелинейных - для моделирования в ферромагнетике. Сетка строилась для плоскости, проходящей по наружной поверхности бандажа колесной пары. В сетке из постоянных резисторов границы представляются, в принципе, не точно. Это иллюстрирует изображенный на рис. 2.4 пример набора круговой границы с помощью проводящего контура, соединяющего ближайшие к заданной

окружности узлы сетки. Увеличение точности набора здесь может быть достигнуто лишь путем увеличения числа узлов сетки. Поэтому, приграничные элементы сеточной модели во II-й зоне набирались из переменных резисторов. В такой сетке можно уточнить набор границы, «притягивая» ближайшие внешние узлы на заданную границу. Это достигалось путем набора контура по внешним узлам, как показано на рис. 2.4. При этом несколько нарушилась геометрия набираемого на сетке контура и заданной границы, зато сопротивление резисторов между узлами на участках, пересекаемых границей, уменьшилось в соответствии с отношением геометрических размеров граничного и внутренних элементов сетки. Сопротивление между узлами сетки ( $a$  и  $b$ ) составляет

$$R_{ab} = R_x \cdot (ab/a'b'), \quad (2.44)$$

а между узлами  $c$  и  $b$

$$R_{cb} = R_y \cdot (cb/c'b'), \quad (2.45)$$

Точность набора области может быть увеличена путем перехода в полярную систему координат, в которой производится разделение области на элементарные объемы. Это особенно удобно при задании граничных условий второго и третьего рода для круга. Проводимость элементов схемы замещения находится при этом по общему методу путем определения сопротивлений между противоположащими гранями элементарной ячейки. Для каждого элемента проводимость слоя единичной толщины в радиальном направлении замещается проводимостями в сетке

(2.46)

(2.47)

а проводимость в тангенциальном направлении равна

$$g'' = \frac{2 \ln \left( 1 + \frac{\Delta r}{r_{i0}} \right)}{2 \pi \gamma_c} \quad (2.48)$$

где  $r_{i0} = \sum_{j=1}^M \Delta r_j$  - внутренний радиус для данной элементарной ячейки;

$\gamma_c$  - удельная проводимость моделируемой среды.

Следует также остановиться на выборе системы координат для моделирования распределения магнитного поля в том случае, когда часть границ рассматриваемой области прямоугольные, а часть - криволинейные (см. рис. 2.4). Так как моделируемая область с одной стороны ограничена прямоугольной границей - поверхностью рельса, а с другой - окружностью колеса, то в данном конкретном случае выбор системы координат зависит от характера той части границы, которая соответствует нулевому уровню моделируемого магнитного поля. Нулевой уровень магнитного поля определяется экспериментально в некоторой совокупности точек пространства при максимальной намагничивающей силе ФН с помощью феррозонда. Эксперимент, проводимый при условии  $R = a$ ,  $F = 20000 \text{ A-b}$ , показал, что границы

нулевого уровня можно обозначить с помощью двух прямых линий. В общем случае удобно для определения системы координат пользоваться следующим способом. Моделируемая область набирается дважды: в декартовой и в полярной системах координат. Число элементов в том и другом наборе должно быть одинаково, так как при этом неизменной остается погрешность дискретизации, определяемая выражением (2.34). Затем определяется количество пересечений или совпадений сетки с границами моделируемой области (число узлов для задания граничных условий) и по меньшему их количеству выбирается система координат. В этом случае также уменьшается количество устройств для задания граничных условий или несколько упрощается их структура.

Граничные условия в рассматриваемой задаче задавались в виде распределения напряжений на границе сетки. Для этого узлы сетки были соединены с соответствующими низкоомными выходами усилителей напряжения с регулируемыми коэффициентами усиления  $\beta$ , построенными на основе операционных усилителей. С помощью измерительных приборов определялись значения магнитной индукции в соответствующих точках объекта и согласно формуле определялись значения скалярного магнитного потенциала

$$(2.49)_{\text{до}}$$

Формула (2.49) справедлива лишь в случае задания скалярного магнитного потенциала на границе с рельсовой линией, а также в точках нулевого потенциала, так как шаг сетки при этом в обоих направлениях одинаков (прямоугольные границы, совпадающие с элементами сеточной модели). В случае же криволинейных границ поверхность колесной пары, когда  $h_x \cdot h_y$ , для задания граничных условий получена следующая уточненная формула

$$\langle P_m \rangle = \frac{B_u (h_x - h_y)}{\int_{\text{ли}} -y l h^2 x + h^2 y} \quad (2.50)$$

где  $B_u$  - измеренное значение индукции в точке задания граничных условий.

Измерения распределения потенциалов сеточной модели проводились с помощью потенциометра постоянного тока компенсационного типа, а затем дублировались с помощью цифрового вольтметра.

Эксперимент по моделированию проводился для трех плоскопараллельных сечений, одно из которых проходит по наружной поверхности рельса и колесной пары при  $Z = 0$ , а два других - на расстоянии  $b = 1$  см и  $b = 2$  см, соответственно, от первого. Распределение скалярного магнитного потенциала в торцевой зоне функционального намагничивателя для  $b = 0$  представлено на рис. 2.5.

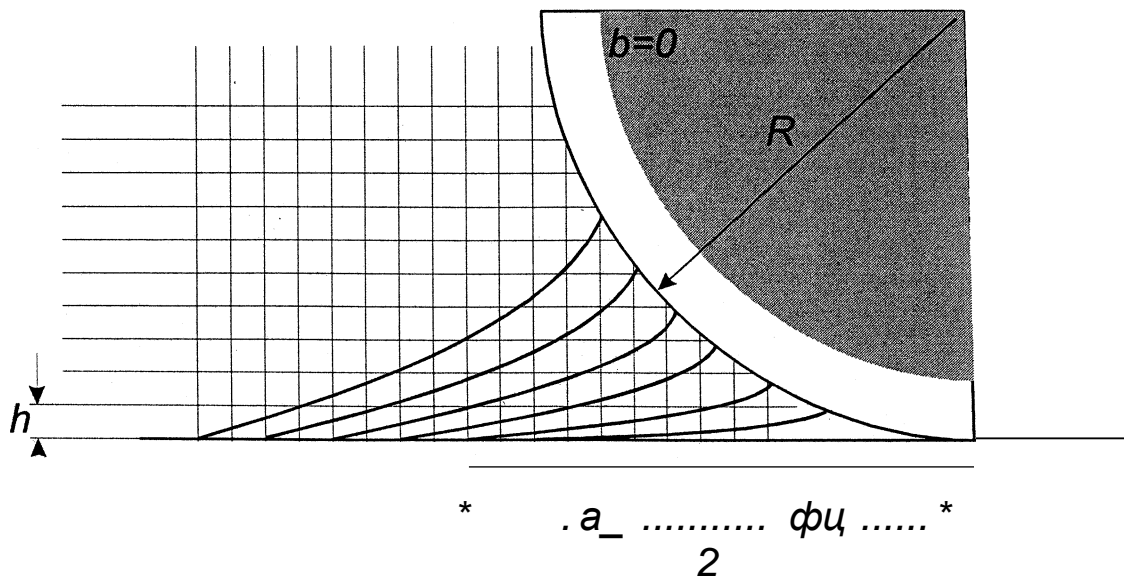


Рис.2.5. Распределение скалярного магнитного потенциала в торцевой

зоне функционального намагничивателя ( $B=0$ )

На рис.2.6 показано распределение скалярного магнитного потенциала в торцевой зоне функционального намагничивателя ( $B=1$  см).

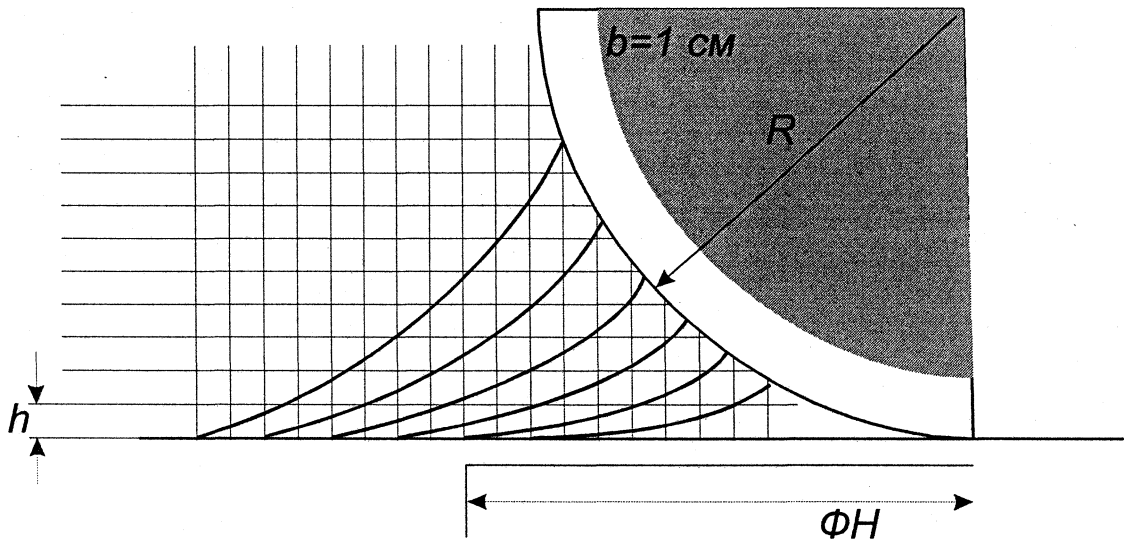


Рис.2.6. Распределение скалярного магнитного потенциала в торцевой зоне функционального намагничивателя ( $B=1$  см)

Для дальнейшего расчета и оптимизации функциональных намагничивателей необходимо установить эффективное сечение воздушного зазора как со стороны рельса, так и со стороны колеса, через которое замыкается рабочий магнитный поток. Ширина этого сечения будет определяться толщиной головки рельса и толщиной бандажа колесной пары, а длина ограничиваться линиями условно нулевого магнитного потока. Под условно нулевым будем понимать поток, значение которого в  $10^3$  раз меньше магнитного потока, замыкающегося через площадку в месте контакта колеса и рельса.

Эксперимент показал, что в воздушном зазоре, ширина которого превышает  $\delta/2$ , величина индукции в каждой точке силовой линии практически одинакова, а следовательно, границу условно нулевого потока можно считать совпадающей с крайней силовой линией магнитного поля. Поэтому длина эффективного сечения, через которое замыкается рабочий магнитный поток может быть определена по формуле:

- для колеса

$$i_4 = L \cdot (B_1 + B_2); \quad (2.51)$$

- для рельса

$$b_p = R - (tg \alpha_x + tg \alpha_2), \quad (2.52)$$

где  $R$  - радиус колеса;

$\alpha_x, \alpha_2$  - углы между радиусами, проходящими через точку касания и продолжающими линии нулевого потока.

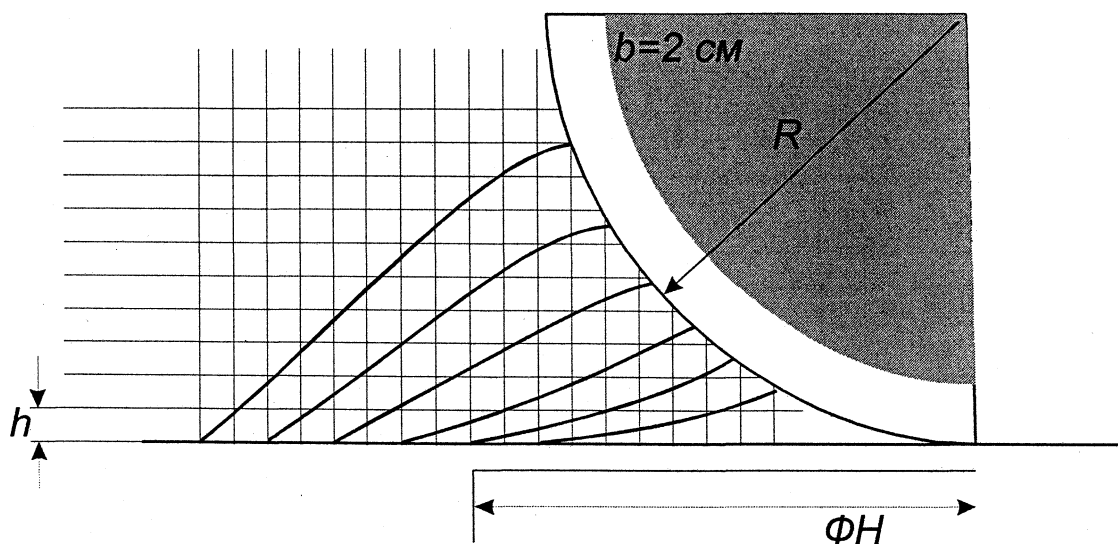


Рис.2.7. Распределение скалярного магнитного потенциала в торцевой зоне функционального намагничивателя ( $b=2$  см)

На рис. 2.7 представлены характеристики функционального намагничивателя при постоянной магнитодвижущей силе, полученные на основе анализа распределения магнитного потока в торцевой зоне при  $b = 2$  см. Результаты аналогового моделирования использованы в процессе создания физических моделей устройств записи информации (см.рис.2.8. и рис.2.9.).

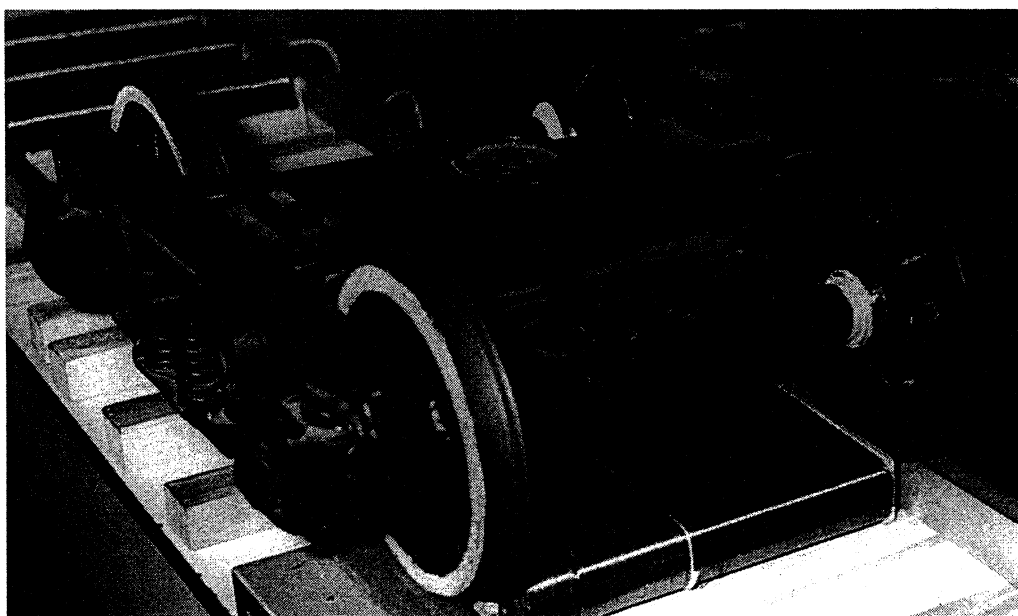


Рис.2.8. Физическое моделирование процесса магнитной обработки колёсных пар тележек

### **2.3. Разработка алгоритма работы и структуры устройств автоматической магнитной маркировки контролируемых объектов**

Для решения задачи управления парком подвижного состава в значительном ряде случаев необходимо располагать информацией о

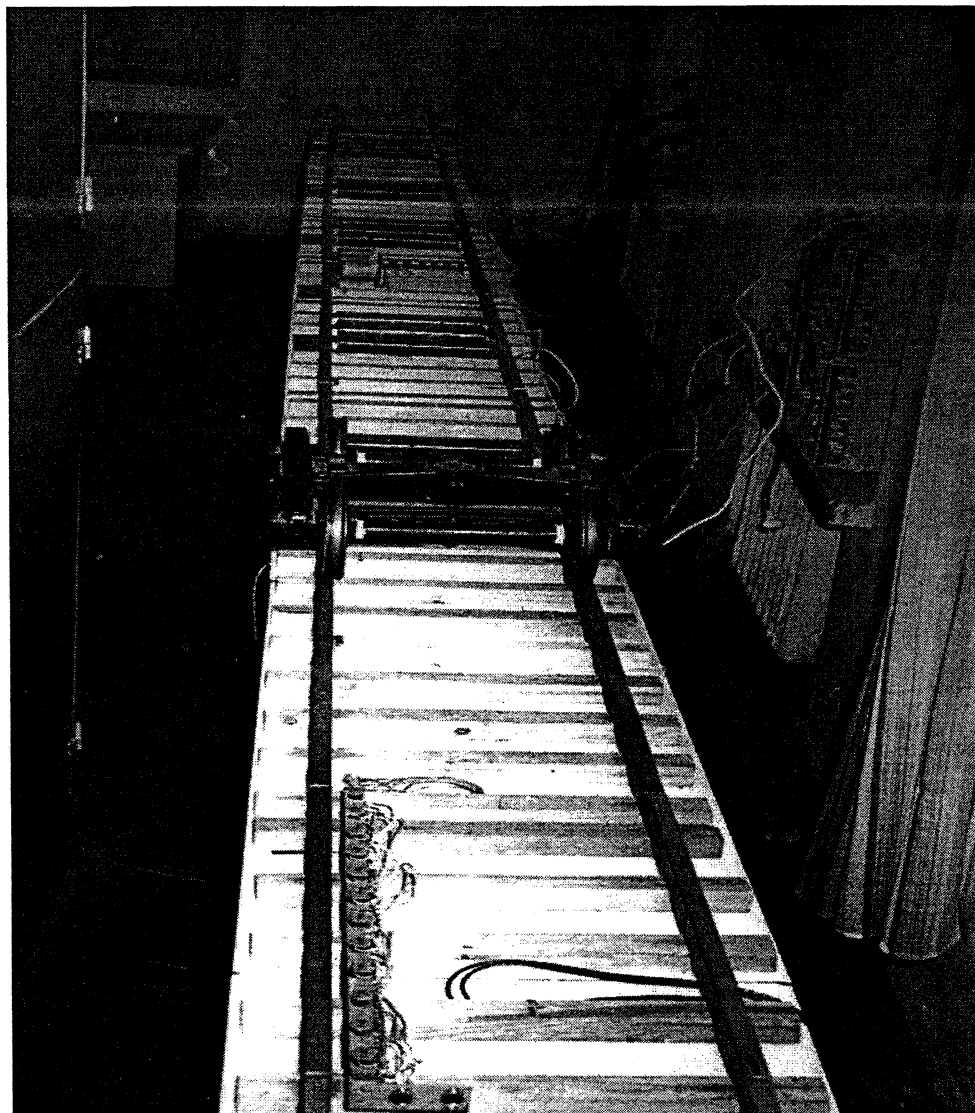


Рис.2.9. Лабораторный макет устройства записи и считывания информационных сигналов

количестве контролируемых объектов в обрабатываемых поездах и о распределении в них вагонов по типам и осности (четырёх-, шести-, восьмиосные или с нечетным количеством осей). Основными проблемами, возникающими в процессе контроля, в этом случае являются:

- распознавание отдельных подвижных единиц в составе;

- фиксирование прохода всех колесных пар, проследовавших пункт контроля;

распознавание каждой колесной тележки.

Предлагаемая методология построения системы идентификации транспортных средств предусматривает создание математических моделей и структурный синтез устройств записи информации [118]. При этом её внедрение невозможно без связи напольных устройств с контролируемым объектом, так как непосредственными носителями информационных сигналов являются колёсные пары вагонных тележек. Поэтому решение данной задачи целесообразно начать с выбора наиболее эффективного способа магнитной маркировки поездов, разработки алгоритмов работы и реализации устройств записи (см. рис.2.10 и рис.2.12) соответствующих данных на кодоносители. Нижним и, по всей видимости, основным уровнем обработки железнодорожного состава является фиксирование прохода колесной пары мимо соответствующего датчика. Как показали исследования, решение этой задачи с высокой достоверностью достигается при использовании магнитных путевых датчиков (датчиков прохода оси) и предварительном однонаправленным намагничиванием колесных пар. Дополнительная информативность может быть придана подвижной единице, если одна из колесных пар будет намагничена в противоположном, нежели все другие пары, направлении. Такая совокупность магнитных меток повышает избыточность, а значит, и помехозащищенность маркировки подвижной единицы. Распознавание тележек базируется на результатах исследования динамики подвижных единиц железнодорожного транспорта, показавших, что скорость отдельного вагона или локомотива за время прохождения расстояния,

равного длине тележки этого вагона или локомотива, изменяется не более чем на 20%. Таким образом, задержка поступления сигнала от очередной колесной пары, превышающая более чем на 20 % временной интервал между первыми двумя колесными парами тележки, надежно свидетельствует об окончании проследования очередной тележки мимо путевого датчика. Алгоритм обработки железнодорожного состава, базирующийся на использовании вышеприведенных предпосылок, представлен на рис.2.11. Принятые сокращения и условные обозначения: *СДПО* - сигнал датчика прохода оси; *СВ* - счетчик времени;  $N_{oc}$  - номер оси в тележке;  $K_{oa}$  - количество осей в  $i$  - й тележке;  $N_{теjt}$  - номер тележки;  $T$  - время, зафиксированное  $СВ_1$  между поступлениями *СДПО* от первой и от второй осей каждой тележки;  $t_N$  - текущее время, отсчитываемое счетчиком  $СВ_N$ .

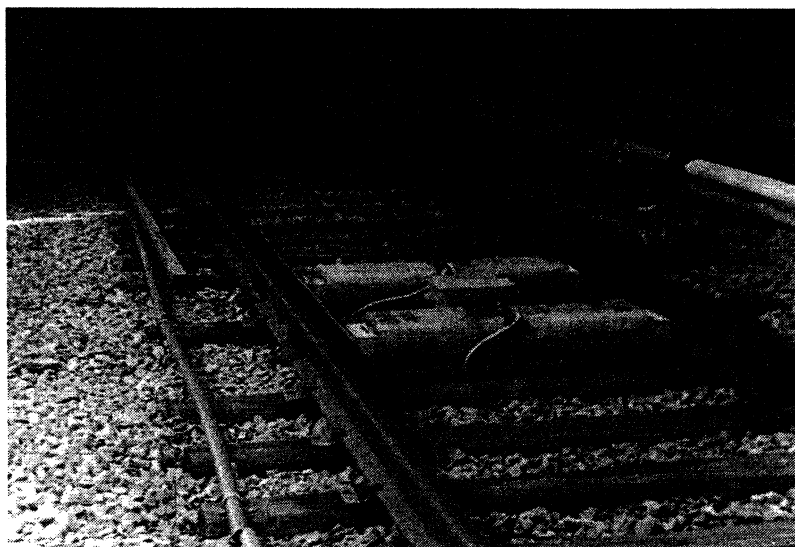


Рис.2.10. Путевой функциональный намагничиватель, установленный в Салтовском электродепо Харьковского метрополитена

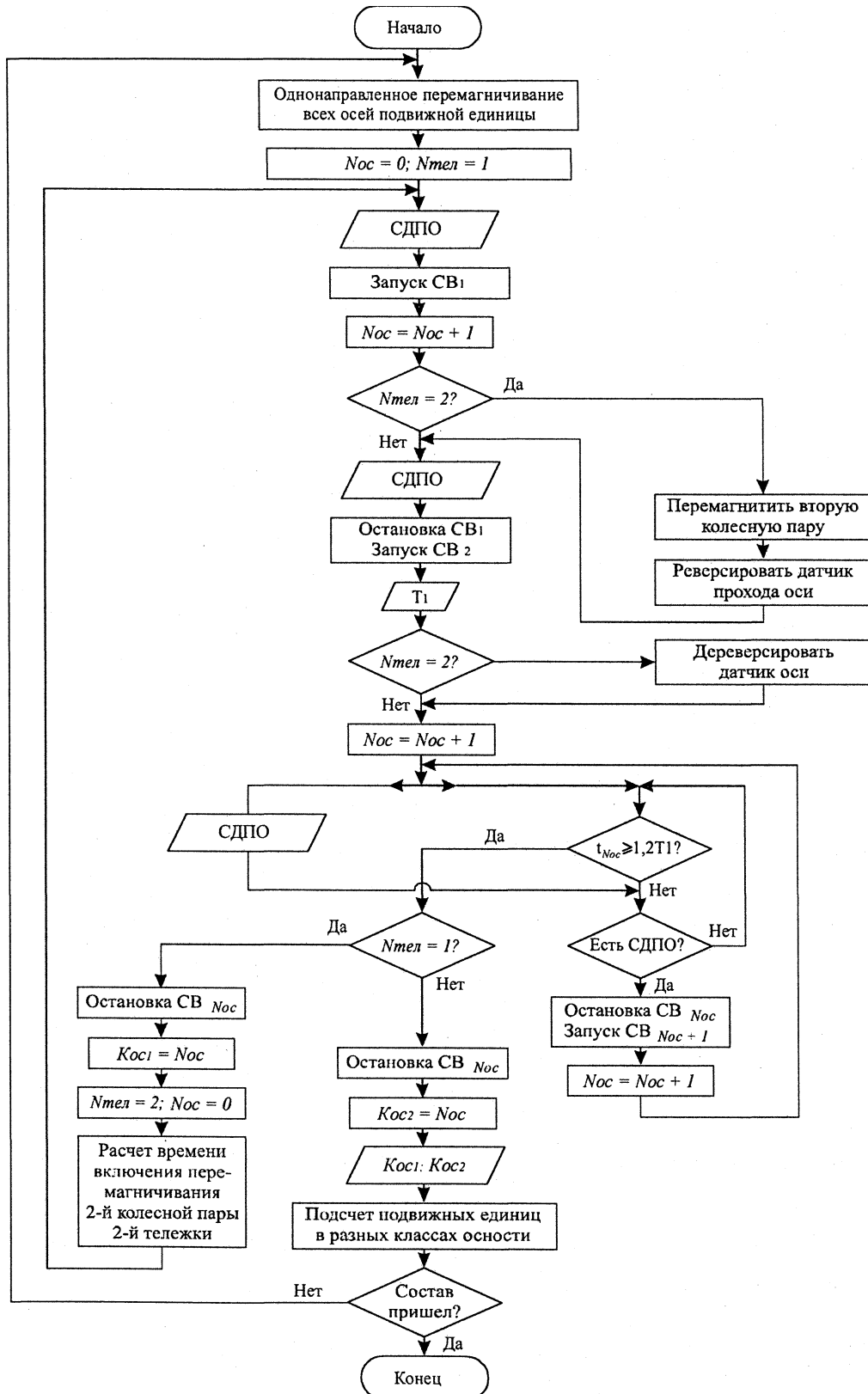


Рис. 2.11. Алгоритм работы устройства магнитной маркировки  
ПОДВИЖНЫХ СОСТАВОВ



Рис.2.12. Устройство магнитной обработки колёсных пар вагонов,  
установленное в лаборатории ХарГАЖТ

Топография размещения напольного оборудования, обеспечивающего функционирование разработанного алгоритма, представлена на рис.2.13 [153]. Подвижная единица предполагается движущейся со скоростью  $v$  в направлении, указанном стрелкой. При этом блок 1 намагничивает (однополярно) все колесные пары, следующие мимо него. Блок 3 по команде, поступающей с устройства управления, перемагничивает одну из колесных пар подвижной единицы в направлении, противоположном заданному блоком 1.

В начале функционирования алгоритма принимается  $N_{oc}=G$  и  $N_{mai} = 1$ . При поступлении *СДПО* от первой оси первой тележки подвижной единицы запускается счетчик  $CB_1$ , а величина  $N_{oc}$  увеличивается на единицу. При поступлении *СДПО* от второй оси первой тележки счетчик *СД* останавливается, а запускается счетчик  $CB_2$ . Фиксируется отсчитанное  $CB_1$  время  $T_1$ , служащее в дальнейшем базовой величиной при определении факта проследования тележки. Величина  $N_{oc}$  увеличивается на единицу и становится равной двум. Поскольку минимальное количество осей в тележке тоже равно двум, то далее производится проверка на окончание проследования тележки. Если  $T_1 < 1,27T_0$  (т.е. 20%-й запас времени не исчерпан), то система проверяет наличие *СДПО* от третьей оси. Если этого *СДПО* нет, то система опять возвращается к анализу величины  $t_{Noc}$  и т.д., пока либо:

а) при  $t_{Noc}$  за  $T_0$  придет *СДПО* от третьей оси и будет остановлен  $CB_2$  и запущен  $CB_3$ , а  $N_a$  увеличен на единицу и система вновь перейдет к одновременному анализу *СДПО* и  $t_N$ , и т.д. до  $N_{oc} = 4$ ;

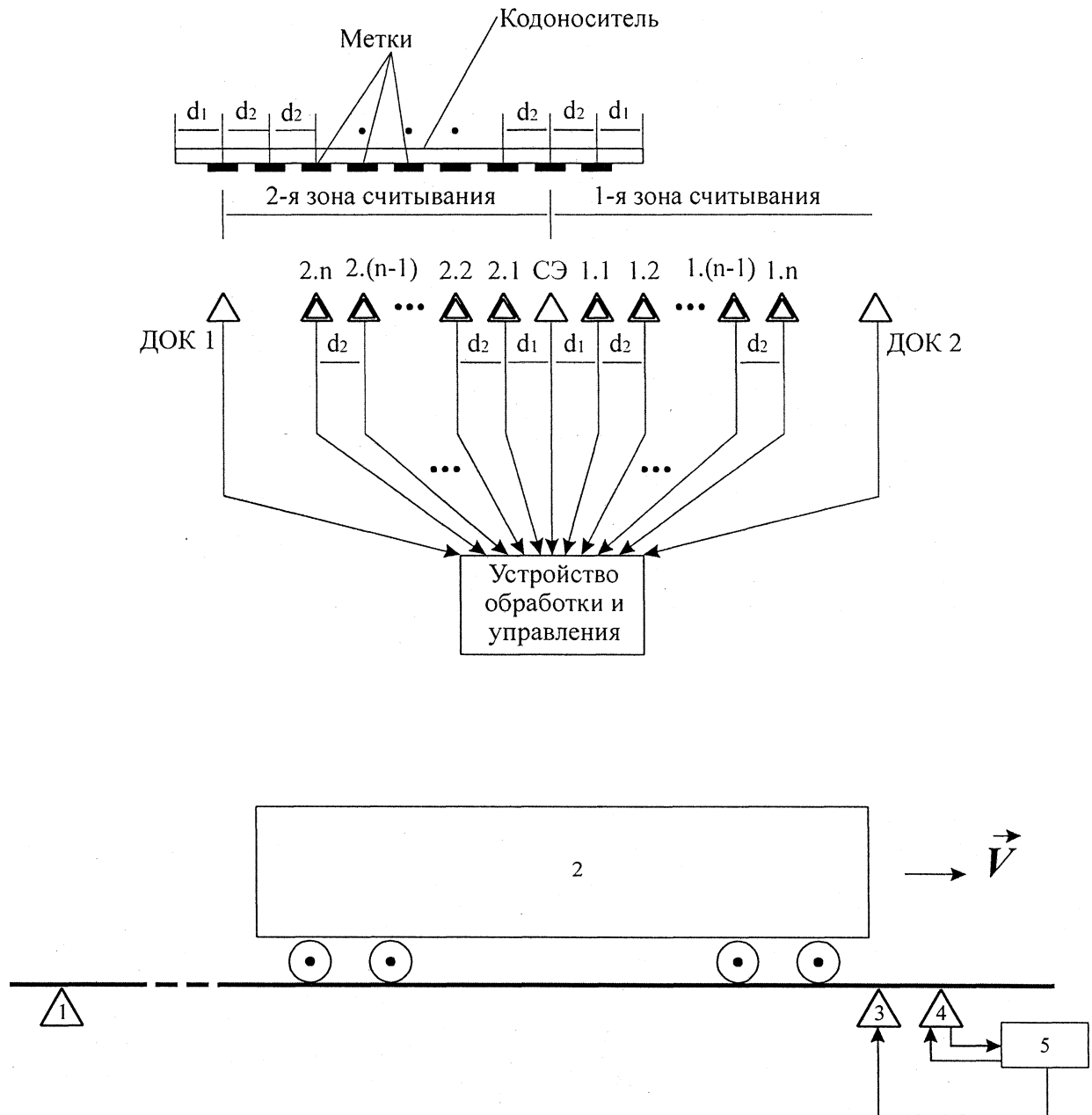


Рис.2.13. Топография размещения напольного оборудования

б) ось окажется последней в тележке, поэтому раньше, чем появится *СДПО* от следующей тележки, величина  $t_{Noc}$  превысит  $1,27^{\wedge}$ , что является признаком окончания проследования тележки (в данном временном отрезке - первой). Будет зафиксировано количество осей первой тележки  $K_{Oci}$ ; принято  $N_{mejl} = 2$  и  $N_{oc} = 0$ . Кроме того, по известной величине  $\tau$ ] и зафиксированному  $K_{oc}$ > (количество осей в тележке опреде-

ляет межосевое расстояние) будет вычислено время, через которое вторая колесная пара второй тележки окажется в зоне действия блока 3 перемагничивания. Это время запоминается в устройстве управления для выработки (с соответствующей задержкой) команд на включение блока перемагничивания и на реверсирование попарности путевого датчика.

После окончания обработки первой тележки система продолжает функционирование из того же положения, что и перед началом обработки первой тележки, но теперь с параметром  $N_{mai} = 2$ . Обработка второй тележки аналогична обработке первой тележки, за исключением временного интервала после прохода первой оси. В этом интервале при обработке второй тележки устройство управления вырабатывает команду на перемагничивание второй колесной пары и на реверсирование путевого датчика прохода оси. А после проследования мимо этого датчика второй оси второй тележки устройство вырабатывает команду на его дореверсирование, т.е. на приведении его в состояние чувствительности к магнитным меткам прямой полярности.

По окончании обработки второй тележки фиксируется количество ее осей  $K_{ос}$ , после чего принимается решение об окончании проследования подвижной единицы и обновляются данные о количестве входящих в обрабатываемый железнодорожный состав подвижных единиц зафиксированной осности. Далее система приступает к обработке следующей подвижной единицы и т.д. вплоть до полного прохождения состава через зону обработки.

Динамика процессов, имеющих место при описанной выше обработке железнодорожных составов, достаточно невысока по сравнению со скоростными возможностями как ЭВМ общего назначения, так и специализированных контроллеров, поэтому необходимость оптимиза-

ции разработанного алгоритма по критерию быстродействия (например, его распараллеливание [154]) не является актуальной.

Идентифицируем образ предъявленного объекта и, при необходимости, сформируем сигнал запуска исполнительного устройства в случае, если распознанный объект является одним из допустимых (действительных) образов [112,113].

Будем полагать, что образ представляет собой совокупность бинарных меток  $L$ . Из  $N = 2^L$  возможных образов действительными на момент предъявления являются  $M (M < N)$  образов, причем каждый из них определяет свой уникальный  $K$ , (примем, что  $i \in \overline{1, M}$ , хотя нумерация классов является скорее вопросом удобства присвоения обозначений). Не задействованные  $N-M$  образы отнесем к классу  $K_{M+1}$  недействительных образов.

В наиболее общем случае образ целиком предъявляется для распознавания, т.е. вся совокупность меток одновременно становится доступной для считывания. При этом на вход устройства распознавания от датчиков поступает случайная реализация вектора признаков (меток)

$$x = x_{oi} + n, \quad (2.53)$$

где  $x_{oi}$  - свободный от помех вектор признаков, соответствующих  $z$ -му образу;

$n$  - вектор отсчета помех в каналах датчиков. Это сумма внутренних шумов каналов (независимых случайных процессов) и наводок от внешних источников помех.

Будем считать, что наличие метки в отсутствии помех соответствует высокий уровень  $\gamma$ , сигнала на входе соответствующего канала блока распознавания, а отсутствию метки - низкий уровень  $\backslash$ . Учитывая соотношение (2.53), можно сказать, что наличие помех приводит к тому,

что реализация вектора признаков задает произвольную точку  $L$ -мерного евклидова пространства, тогда как вектор  $x_0$  может задать только дискретную совокупность из  $N = 2^i$  точек такого пространства. Задача синтезируемого устройства распознавания - оптимальным образом соотнести любую из точек континуума, определяемую вектором признаков  $x$ , с той из точек решетки, задаваемой вектором  $x_0$ , которая в некотором смысле наиболее близка к данной точке континуума.

Вначале рассмотрим оптимальную процедуру распознавания. Итак, на вход устройства распознавания подается  $Z$ -мерный вектор

$$x = x_{oi} + n_e + n_n, \quad (2.54)$$

где  $n_e$  - вектор отсчета внутренних шумов датчиков;  
 $n_n$  - вектор отсчета внешних помех (наводок).

Положим, что  $K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$  - множество образов (комбинаций меток). Уже отмечалось, что  $N = I^L$ . Положим также, что  $p(x|D.)$  является функцией, условной по образу плотности распределения случайного вектора  $x$ , иными словами,  $p(x|k_j)$  является функцией плотности распределения вероятности вектора  $x$  при условии, что наблюдается образ  $k_j$ . Пусть также  $p\{k^{\wedge}\}$  обозначает априорную вероятность предъявления образа  $k_j$ . Тогда апостериорную вероятность  $T'(d|x)$  можно определить с использованием формулы Байеса [137]

$$Ж)-P(П) \quad (2.55)$$

Оценим потери, связанные с неверным принятием решения по результатам анализа реализации  $x$  вектора признаков. Обозначим как лбф,.) потери, вызванные принятием решения  $D$  о принадлежности

вектора  $x$  образу  $k_t$ , в то время как этот вектор порожден образом  $k_t$ . Тогда среднее значение потерь, обусловленных принятием решения  $D$ , по результатам анализа конкретного  $x$ , определяется как

$$R(D, |x) = \sum_{t=1}^n A(t, |x) \cdot P(t, |x). \quad (2.56)$$

В соответствии с общепринятой терминологией [135,136,141], последнее выражение определяет условный риск. Значение  $R$  для произвольного  $x$  определяется решающим правилом  $D(x)$ , т.е. функцией, назначающей решение при любой возможной реализации  $x$ . Поэтому общий риск, связанный с выбранным решающим правилом  $D(x)$ , вычисляется как

$$R = \int_{(x)} P(x) \cdot R(D(x), |x) \cdot P(x) \cdot dx. \quad (2.57)$$

Известно [136,146], что для минимизации общего риска следует выбрать такое решающее правило, при котором будет минимален условный риск (2.56) при  $i = 1, \dots, N$ . Полагая, что при вынесении правильного решения потери отсутствуют, а ошибки одинаково весомы, выберем нуль - единственную функцию потерь:

$$A(i, j, |x) = \begin{cases} 0, & i = j; \\ c, & i \neq j. \end{cases} \quad (2.58)$$

Тогда выражение (2.56) преобразуется к виду

$$R(D, |x) = \sum_{t=1}^n P(t, |x) \cdot I - P(t, |x), \quad (2.59)$$

где  $P(k, |x)$  - апостериорная вероятность принятия решения  $D$ , т.е. вероятность того, что принадлежность вектора признаков  $x$  классу  $k_t$  определена верно.

Иными словами, полученное значение риска представляет собой вероятность ошибки в принятии решения. Чтобы минимизировать среднюю вероятность ошибки, необходимо выбрать такое  $i$ , для которого  $P(c_i|x)$  максимальна. А поскольку в (2.55) знаменатель является константой, не зависящей от  $j$ , то минимум средней вероятности ошибки достигается при

$$P(x|k^*) = \max_i P(x|k_i) \quad (2.60)$$

Таким образом, для вынесения решения относительно образа, которому соответствует поступивший на вход устройства распознавания вектор признаков, необходимо при каждом предъявлении вычислять значение условной плотности вероятности  $P(x|L_i)$ , называемой функцией правдоподобия. Полагая вслед за [134], что внутренние шумы аппаратуры и внешние помехи на интервале обработки являются стационарными гауссовскими случайными процессами с нулевыми средними значениями, можно описать функцию правдоподобия как

$$P(x|k_i) = \frac{1}{(2\pi)^{L/2} |\Sigma|^{1/2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (x - x_{oi})^T \Sigma^{-1} (x - x_{oi}) \right\} \quad (2.61)$$

где  $\Sigma = E\{(x - x_{oi})(x - x_{oi})^T\}$  - ковариационная матрица размерами  $L \times L$ .

Очевидно, что максимизации левой части выражения (2.60) эквивалентна максимизация любой монотонно возрастающей функции от этого выражения. В частности, с учетом (2.61) удобно в качестве такой функции использовать натуральный логарифм. Получим эквивалентное выражение

$$\ln P(x|k_i) = -\frac{1}{2} (x - x_{oi})^T \Sigma^{-1} (x - x_{oi}) = \max_i \quad (2.62)$$

Обозначим левую часть как  $g_i(x)$  и назовем ее разделяющей функцией. Тогда правило принятия решения запишется в следующем виде:

«ПРИНЯТЬ решения Д если  $g_i(jf) >$  для  $\forall x \in I^*$ »■

С целью упрощения вида разделяющей функции рассмотрим левую часть выражения (2.62). Второе слагаемое не зависит от  $i$  и может быть опущено. Теперь проанализируем вид матрицы  $\Sigma$ . С учетом

(2.54) имеем

$$\begin{aligned} \Sigma_i &= E\left\{(\bar{x} - \bar{x}_{oi})(\bar{x} - \bar{x}_{oi})^T\right\} = \\ &= E\left\{x_{oi} + n_{oi} + n_{oi} + n_{oi}\right\} \end{aligned}$$

Поскольку внутренние помехи и наводки независимы, то

$$\Sigma = \Sigma_{\text{ш}} + \Sigma_{\text{н}} = \text{diag}\{a_{B1}^2, a_{B2}^2, \dots, a_{BL}^2\} + Y_{JH}, \quad (2.63)$$

$$= \text{diag}\{a_{B1}^2, a_{B2}^2, \dots, a_{BL}^2\} + Y_{JH}, \quad (2.64)$$

где  $\text{diag}\{..\}$  обозначает диагональную матрицу с элементами, указанными в скобках, а  $a_{Bj}$  - мощность внутреннего шума на выходе  $z$ -го канала датчика (т.е. на  $z$ -ом входе устройства распознавания);  $Y_{JH}$  - ковариационная матрица наводок, конкретный вид которой пока несущественен.

Из выражений (2.63) и (2.64) следует, что  $\Sigma$  не зависит от  $i$ , в результате чего третье слагаемое в выражении (2.62) также может быть опущено. Тогда разделяющая функция приобретает вид

$$\begin{aligned} g_i(x) &= \ln[P(\kappa)] - 1/2 (x - x_{oi})^T \Sigma^{-1} (x - x_{oi}) = \\ &= \ln[p(\kappa)] - 1/2 X^T \Sigma^{-1} X + \dots \end{aligned}$$

Так как в данном выражении второе слагаемое не зависит от  $i$ , то его можно опустить. В итоге разделяющая функция записывается как

$$g_i(x) = w_i^T x + Z_i, \quad (2.65)$$

где транспонированный вектор весовых коэффициентов (весовой вектор):

$$w_i^T = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j^i y_j \quad (2.66)$$

$$Z_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j^i \quad (2.67)$$

Для стационарной помеховой обстановки весовой вектор и величина  $b_i$  для каждого из образов могут быть вычислены заранее, причем в случае равновероятного проявления каждого из  $N$  образов (т.е. включая недействительные образы), первое слагаемое в выражении (2.67) может быть опущено.

Таким образом, оптимальная с точки зрения минимума средней ошибки распознавания, процедура обработки снятого с датчиков вектора признаков  $x$  состоит в следующем. Этот вектор подается в  $N$  параллельных каналов, в каждом из которых в соответствии с (2.65)-(2.67) вычисляется разделяющая функция. Затем вычисленные величины  $g_i(x)$  поступают на  $N$ -входной компаратор, на выходе которого формируется номер  $i$ -того канала, в котором значение разделяющей функции наибольшее, т.е. выносится решение  $D$ . Если  $i = 1, M$ , т.е. принадлежит множеству действительных на текущий момент образов, то вырабатывается сигнал запуска исполнительного устройства (отпирание проходной). В противном случае такой сигнал не формируется. Структурная схема соответствующего блока распознавания образов приведена на рис.2.14 [159].

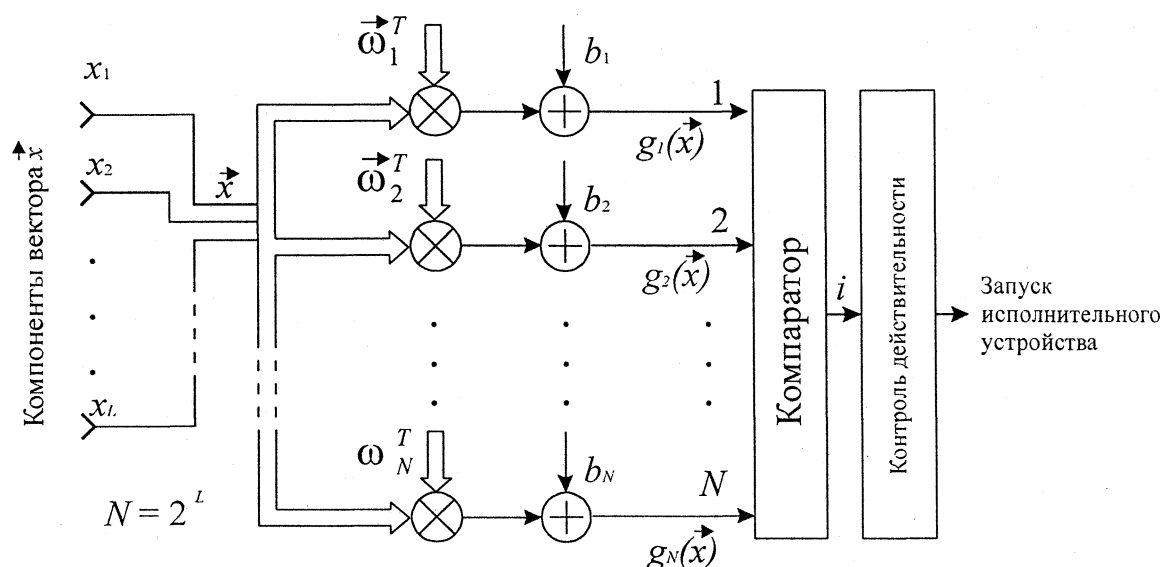


Рис. 2.14. Устройство распознавания, реализующее оптимальную процедуру обработки сигналов

С практической точки зрения недостатком такого устройства является большое число каналов. Например, при восьми позициях кода, т.е. при 8-компонентном векторе  $x$ , число каналов  $N$  равно  $2^8=256$ . Соответствующие этому достаточно простому случаю аппаратные затраты весьма велики. Их, в принципе, можно уменьшить, вводя запоминающее устройство для вектора  $x$  и организовав вычисление разделяющих функций  $g_i(x)$  последовательно для каждого  $i$ . При этом можно будет обойтись одним каналом обработки (при некотором усложнении алгоритма работы компаратора), однако время обработки увеличится примерно в  $N$  раз, что, скорее всего, также будет неприемлемым.

Рассмотрим процедуру обработки реализации  $x$  вектора признаков, позволяющую заменить представленную на рис.2.14 схему  $N = 2^L$ -канальной обработки (с векторными операциями в каналах) на  $\log_2 TV = I$ -канальную схему со скалярными операциями в каналах. С этой целью подвергнем распознаванию не вектор  $x$  в целом, а каждую компоненту этого вектора в отдельности и по результатам покомпо-

нентного распознавания сформируем вектор-решение Я. С учетом принятого выше соглашения о бинарности меток, последующий процесс принятия решения Д сводится к поиску вектора  $x_{oi}$ , который совпадает с %.

Обозначим  $l$ -ю компоненту вектора  $x$  как  $x_l$ . По аналогии с (2.54)

можно записать, что

$$X_l = X_{Oll} + n_{Vl} + n_{Nl}, \quad (2.68)$$

где  $x_{Oij}, n_{Vl}, n_{Nl}$  -  $l$ -е компоненты соответствующих векторов.

Множество  $K^*$  возможных образов (комбинаций меток) в рассматриваемом случае состоит из двух элементов:  $k_1^*$  - в случае наличия метки и  $k_0^*$  - в случае ее отсутствия. Соответственно величина  $x_{oil}$  может принимать два значения:  $h_1$  (высокий уровень) и  $h_0$  (низкий уровень).

Тогда

$$P(x_l | k_1^*) = \frac{1}{\sigma_l \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(x_l - h_1)^2}{2\sigma_l^2} \right] \quad (2.69)$$

$$P(x_l | k_0^*) = \frac{1}{\sigma_l \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(x_l - h_0)^2}{2\sigma_l^2} \right] \quad (2.70)$$

где  $\sigma_l^2$  - мощность помех на выходе  $l$ -го канала датчика.

С учетом этого разделяющие функции имеют вид

$$g_i(x_l) = \ln[p(k_1^*)] - \ln p(x_l | k_1^*) - \ln p(x_l | k_0^*) \quad (2.71)$$

Разумно предположить, что вероятности наличия и отсутствия метки в анализируемой позиции кода (т.е. компоненте вектора  $x$ ) одинаковы и равны 0,5. Поэтому первое слагаемое не зависит от  $i$  и может быть опущено так же, как второе и третье. Получим

$$g_i(x_l) = -\frac{(x_l - h_1)^2}{2\sigma_l^2} + \frac{(x_l - h_0)^2}{2\sigma_l^2} = -\frac{1}{2\sigma_l^2} (x_l^2 - 2x_l h_1 + h_1^2) + \frac{1}{2\sigma_l^2} (x_l^2 - 2x_l h_0 + h_0^2). \quad (2.71)$$

Опустив не зависящий от  $i$  множитель перед скобкой, а также слагаемое  $x_i$ , окончательно получим

$$g_i(x_i) = 2A_i(x_i - \theta_i)^2. \quad (2.72)$$

Таким образом, алгоритм принятия решения о величине  $i$ -ной компоненты вектора  $X$  имеет вид:

$$\begin{aligned} D_i, & \text{ если } 2h_i x_i - h_i > h_i, \\ D_i^*, & \text{ если } 2h_i x_i - h_i < 2h_i \theta_i - h_i, \end{aligned} \quad (2.73)$$

где  $D_i^*$  - решение о присвоении компоненте  $x_i$  вектор-оценки  $\theta_i$  значения  $h_i$ ;

$D_i$  - решение о присвоении компоненте  $x_i$  вектор-оценки  $\theta_i$  значения  $h_i$ .

Алгоритм (2.73) можно переписать также в следующем виде:

$$\begin{aligned} O_i^*, & \text{ если } x_i [2h_i - 2h_i \theta_i] < h_i, \\ P_i^*, & \text{ если } x_i [2h_i - 2h_i \theta_i] > h_i - \theta_i. \end{aligned}$$

Разделив обе части на положительное число  $(\theta_i - h_i)$ , получим синтезированный алгоритм в удобном для решения виде

$$\begin{aligned} S_i, & \text{ если } x_i < 0,5(\theta_i + h_i); \\ D_i, & \text{ если } x_i > 0,5(\theta_i + h_i). \end{aligned} \quad (2.74)$$

Следовательно, при компонентном распознавании и в предположении нормальности закона распределения помех оптимальная по критерию минимума средней ошибки распознавания процедура обработки  $i$ -й компоненты вектора  $x$  сводится к ее сравнению с порогом  $0,5(\theta_i + h_i)$ .

Структурная схема соответствующего устройства распознавания образов приведена на рис. 2.15 [103].

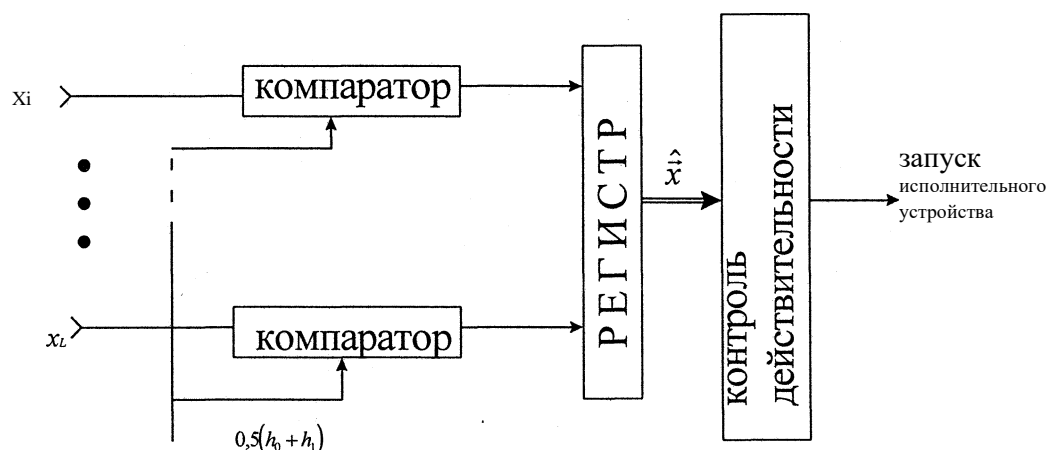


Рис.2.15. Устройство распознавания, реализующее субоптимальную процедуру обработки сигналов

С практической точки зрения преимущество последней схемы в том, что она более универсальна: позволяет реализовать устройство распознавания как при параллельном, так и при последовательном предъявлении меток. В последнем случае достаточно одного компаратора (рис.2.16).

В процессе распознавания контролируемых объектов часто встречается ситуация, когда некоторые из априорно заданных компонентов искажаются или становятся практически неизвестными. Поэтому рассмотрим соответствующую данному случаю процедуру покомпонентного распознавания, в которой неизвестны  $\langle T, h_0 \rangle$  (последние два параметра могут быть неизвестны, например, из-за неизвестной степени износа носителя меток). Разрешение такой априорной неопределенности посредством настройки алгоритма распознавания методом обучения без учителя состоит в получении оценок указанных неизвестных параметров и в их последующей подстановке в алгоритм, разработанный для априорно полностью определенной ситуации [135]. При этом для получения указанных оценок используется сама зашумленная кодовая комбинация, подлежащая распознаванию [94].

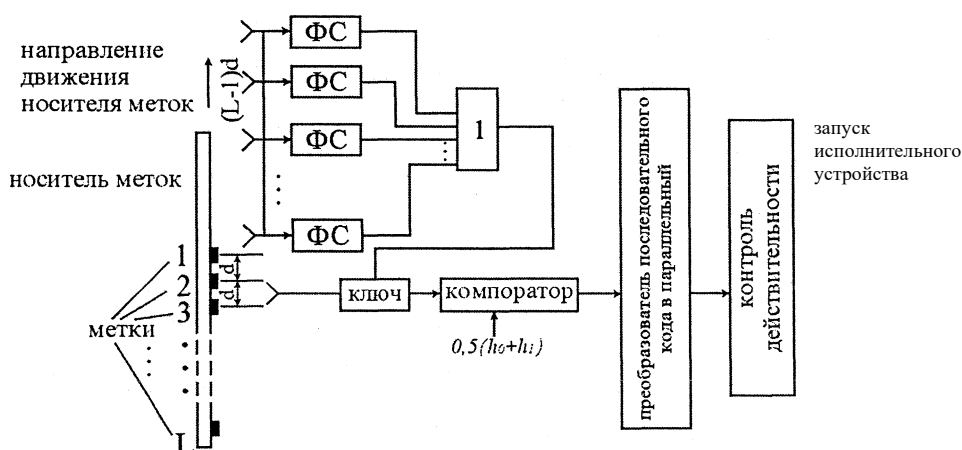


Рис. 2.16. Устройство распознавания, реализующее функцию:

ФС - формирователь строга «начало носителя»

Будем считать процесс предъявления позиций кода на распознавание пуассоновским с неизвестной постоянной интенсивностью  $\lambda$ . Обозначив для краткости априорную вероятность наличия метки (т.е. высокого уровня  $h_i$  сигнала)  $1-P = p(k^+)$ , получаем, что априорная вероятность отсутствия метки (т.е. предъявления НИЗКОГО уровня  $L_i$ ) есть  $1-P = p(k^-)$ . Таким образом, для распознавания предъявляется некоторая  $L$ -позиционная последовательность меток пример которой (без учета помех) изображен на рис.2.17.

Положим также, что предъявляемая за время  $\tau = T$  последовательность меток представляет собой фрагмент стационарного пуассоновского случайного процесса. Вычислим его математическое ожидание

$$M\{N\} = K \cdot p(k^+) + L_0 \cdot p(k^-) = p \cdot L + (i - p). \quad (2.76)$$

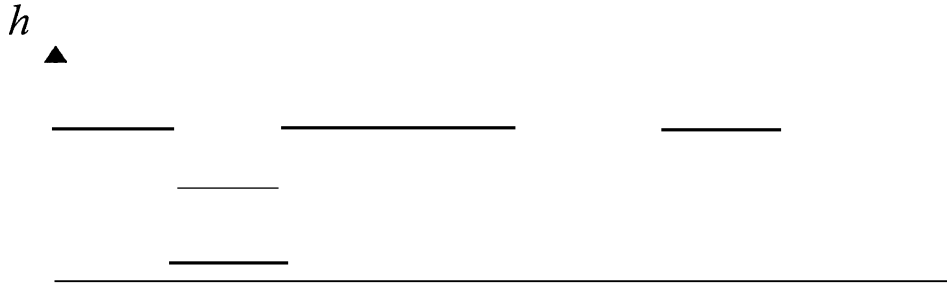


Рис. 2.17. L-позиционная последовательность меток

Теперь запишем выражение для ковариационной функции процесса

$$= \{ W_0 \cdot J + \gamma \}. \tag{2.77}$$

Чтобы получить в явном виде для  $K_n(t, t + z)$ , рассмотрим вспомогательный процесс  $\xi(\gamma)$ , получаемый из процесса  $r(c)$  при  $y_0 = 0$  и  $\gamma = 1$ . Очевидно, что

$$r(0) = J_0 + (r - J_0) - \xi(\gamma). \tag{2.78}$$

Подстановка этого выражения в (2.77) дает:

$$K_n(t, t + \gamma) = \phi_0 + \dots \tag{2.79}$$

Но

$$E\{\dots\} = \dots = \dots$$

поэтому на основании выражения (2.76) получаем

$$E\{S^2\} = \dots \quad (2.80)$$

Таким образом,

$$C(\tau, \tau + T) = \sigma_0^2 + 2\rho h_0(h_i - h_0) + \dots \quad (2.81)$$

где:  $\dots$  - ковариационная функция процесса  $\xi(t)$ :

$$C(\tau, \tau + T) = E\{\xi(\tau)\xi(\tau + T)\} = E\{\xi(\tau) + \xi_2\}, \quad (2.82)$$

По определению,

$$A(\tau, \tau + T) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots + \dots \quad (2.83)$$

где  $p(\dots, \dots)$  - совместная плотность вероятности значений

и  $\xi_2$  процесса  $\xi(t)$ , зафиксированных в моменты времени соответственно  $t$  и  $t + T$ .

В выражении (2.83) нулевой результат будет получен только при  $\dots = \dots = 1$ . Поскольку  $\dots$  и  $\dots$  - дискретные случайные величины, то интеграл (2.83) преобразуется в сумму, в которой не равно нулю только одно слагаемое, соответствующее  $\dots = \dots = T$ .

$$K_f(t, t + T) = P\{f(t) = 1; f(t + T) = 1\} = P\{f(t) = 1; f(t + T) = 1\}. \quad (2.84)$$

Здесь  $P(\dots)$  означает вероятность наступления события.

Если моменты времени  $t$  и  $t + T$  находятся в одном и том же интервале времени  $\Delta t$  (т.е. связана с одной и той же позицией кода, см. рис.2.17), то

$$K_f(t, t + T) = P, \quad (2.85)$$

если же они находятся в разных интервалах (т.е. разных позициях кода) независимо, то

$$P[\cdot] = P^2, \quad (2.86)$$

Вероятность наличия  $m$  точек рассматриваемого процесса на интервале длительностью  $t$  задается законом Пуассона [136]

$$= \frac{e^{-t} t^m}{m!} \cdot \quad (2.87)$$

Нахождение моментов времени  $t$  и  $t + \tau$  в одном интервале означает, что в течение времени  $t$ , считая с момента  $t$ , новых точек процесса не появилось. Подставив в (2.87)  $m = 0$ , получим вероятность нахождения моментов  $t$  и  $t + \tau$  в одном интервале

Поскольку все рассуждения справедливы как для  $t > 0$ , так и для  $t < 0$ , то в нашем случае

$$\hat{W}_H = \hat{W}_0(H) = e^{-|t|}. \quad (2.88)$$

Ввиду того, что случайные события « $t$  и  $t + \tau$  находятся в одном интервале времени» и « $t$  и  $t + \tau$  находятся в разных интервалах времени» составляют полную группу, то вероятность второго из этих событий равна

$$= 1 - e^{-|t|}. \quad (2.89)$$

Учитывая результаты (2.85), (2.86), (2.88) и (2.89) в выражении (2.84), получаем:

$$\begin{aligned} K_t(t, t + \tau) &= P \cdot e^{-|t|} + P^2 \cdot (1 - e^{-|t|}) = \\ &= P - (1 - P) \cdot e^{-|t|} + P^2. \end{aligned} \quad (2.90)$$

Теперь ковариационную функцию случайного процесса  $Y(t)$ , ранее представленную в виде (2.81), можно записать как

$$K_{11}(t, t+T) = h_0^2 Q + 2Ph_0(\Lambda - h_0) + \quad (2.91)$$

$$+ (VV [P - (1-P)\epsilon^{-\Lambda/P}])$$

или, после ряда рутинных преобразований, как

$$\langle (I, I + T) \rangle = [P + \Lambda_0(1-P)]^2 +$$

$$+ (2I - \Gamma_0)^2 - P - (1-P)^{-\Lambda}$$

Поскольку величины  $\mathcal{E}\{I(t)\}$  и  $K_{11}(I, I + T)$  можно оценить на основе сигналов датчиков, то пара выражений (2.76) и (2.91) (или (2.92)) образует два уравнения относительно двух подлежащих оценке неизвестных  $h_0$  и  $h_j$ . Положив для простоты  $T = 0$ , получим:

$$E\{I(t)\} = M = P - (h, -) + h, \quad (2.93)$$

$$\langle (I, I + 0) \rangle = \langle (I, I) \rangle = \Lambda +$$

$$+ 2P \cdot \langle (I, I) \rangle + (\Lambda I)^{\Lambda}$$

Решение этой системы уравнений дает искомые оценки

$$(2.95)$$

$$(2.96)$$

Выражения (2.95) и (2.96) позволяют вычислить оценки  $h_0$  и  $h_j$  величин  $h_0$  и  $I\}$  по результатам измерения математического ожидания и дисперсии пуассоновского процесса при этом знания интенсивности  $\lambda$  потока не требуется.

Помеха и сигнальный процесс независимы, поэтому оценка математического ожидания сигнального процесса

$$\hat{M} = \frac{1}{L} \cdot \sum_{l=1}^L x_l \quad (2.97)$$

является асимптотически эффективной [146]. Опять же в силу указанной независимости, а также в силу стационарности рассматриваемого пуас-

ооовского процесса второй начальный момент выходного сигнала  $X]$   
1 - го канала датчика может быть оценен как

$$A_{\Gamma}^* = A_{\Gamma} + \frac{2 - 1^2}{L} \sim \frac{1^2}{L} \quad (2.98)$$

где  $ST^2$  - дисперсия помехи.

Эта оценка является асимптотически эффективной. Однако, нас интересуют величины  $A_2^{иВ}$  отдельности. Поэтому в устройство распознавания следует ввести дополнительный канал оценки дисперсии с  $f$  помехи. Он может представлять собой, например, такой же комплект датчиков, как и датчики считывания меток, но расположенный вне зоны считывания меток, однако максимально близко к ней (чтобы фиксировать те же помехи, что и датчики считывания меток). По замерам  $z_j$ , снятым с датчиков помех, искомая дисперсия  $O_j$  помехи оценивается как

$$(2.99)$$

Наконец, из (2.98) получаем оценку дисперсии сигнала

$$A_{\Gamma} = A_{\Gamma L} \cdot \quad (2.100)$$

Перепишем теперь разделяющую функцию (2.70), полагая, что вероятности  $p(\kappa^*)$  наличия и отсутствия метки неодинаковы (они равны соответственно  $P$  и  $1-A$ ):

$$-\wedge_T(x^2 - 2xL + L^2) \quad (2.101)$$

Опустив не зависящие от  $i$  слагаемые  $I_{na1}$  и  $\frac{x^2}{2c_j}$ , получим окончательное выражение для разделяющей функции

$$/ \quad (2.102)$$

Подставив вместо неизвестных параметров  $\gamma$ , и ст, их оценки (2.95), (2.96) и (2.99), выпишем алгоритм принятия решения о величине 1 - й компоненты вектора  $x$ :

$$L.P - -4T(A^2 - 2L.X,) > ? L. (1 - - -4T (4^! - 2L<L) \quad (2.103)$$

или

$$\blacksquare \text{ПА} \begin{matrix} (p \setminus h^2 - h^{2D} i^D o \\ < -x Д - 4 \end{matrix} \quad (2.104)$$

При достаточно высоких отношениях (сигнал/помеха) всегда справедливо неравенство  $4 > h_0$ , поэтому от (2.104) можно перейти к окончательной записи алгоритма:

$$x_z > < ^A \quad /X_A / \{ \text{ } ^I \quad (2.105)$$

Соответствующая ему структура устройства распознавания для случая  $L = 3$  представлена на рис. 2.18.

Устройство с такой структурой наиболее адекватно ситуации, в которой вероятность  $P$  постоянна в течение значительного промежутка времени.

Для исключения мешающих параметров построим разделяющую функцию, свободную ОТ конкретных значений величин СУ  $I$ ,  $h_0$  И  $11!$ , т.е. исключим эти величины из функции правдоподобия (2.69), (2.70), воспользуемся известным правилом [134,136]

$$(2.106)$$

$n$

где  $N$  - вектор мешающих параметров;

$N$  - область определения мешающих параметров;

$A$  - вектор информационных параметров.

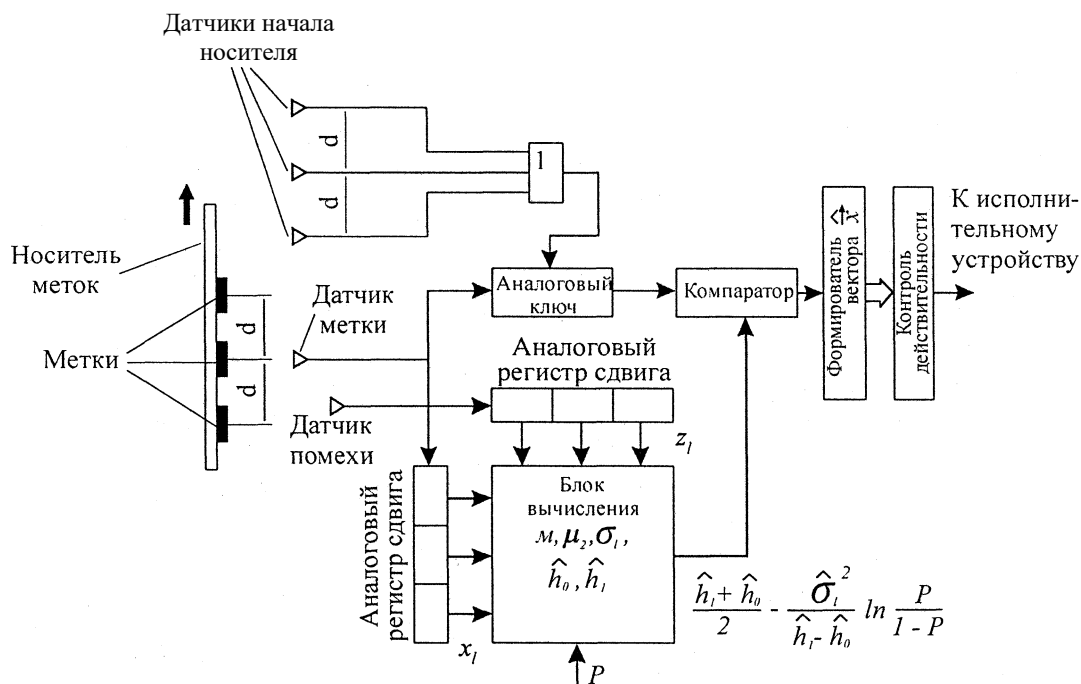


Рис. 2.18. Устройство покомпонентного распознавания образов

В рассматриваемом нами случае покомпонентного распознавания к мешающим параметрам относятся  $h_0$ ,  $h_j$  и  $\sigma_j$ . Поскольку помеха и уровни меток статически не связаны, то величины  $h_j$  ( $i = 0, 1$ ) и  $\sigma_j$  независимы. Выполним расчет для случая высокой априорной неопределенности, в котором каждая из величин полагается равномерно распределенной в некоторых пределах:

$$P \mathcal{N} \left( \hat{h}_i \in [h_{i \min}; h_{i \max}] \right) \quad (2.107)$$

0, при других значениях  $h_i$ ,

где  $h_{i \min}$  и  $h_{i \max}$  ( $i = 0, 1$ ) - соответственно минимальное и максимальное значения параметра ;

$$p(\sigma_l) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_M}; \sigma_l \in (0, \sigma_M]; \\ 0 \text{ при других значениях } < t_l \end{cases} \quad (2.108)$$

Выражения (2.69) и (2.70) имеют одинаковую структуру. С учетом мешающих параметров эта структура такова:

$$p(x_i | k_i^*, h_i, \sigma_l) = \frac{1}{\sigma_l \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(x_i - h_i)}{2\sigma_l^2} \right\} \quad (2.109)$$

Усреднение по мешающим параметрам в соответствии с (2.106)

дает

$$p(x_i | k_i^*) = \frac{1}{\sigma_M} \int_0^{\sigma_M} \frac{e^{-\frac{(x_i - h_i)^2}{2\sigma^2}}}{\sigma} dh \cdot d\sigma, \quad (2.110)$$

Временно опустив несущественные для расчета индексы  $i$  и  $l$ , а также раскрыв скобку в показателе экспоненты, придем к выражению

$$p(x | k^*) = \frac{1}{\Delta h \cdot \sigma_M \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^{\sigma_M} \frac{e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}}{\sigma} d\sigma \int_{h_{\min}}^{h_{\max}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}h^2 + \frac{x}{\sigma^2}h} dh \quad (2.110)$$

Внутренний интеграл является табличным [146,148,150] и сводится, после рутинных преобразований, к выражению

$$I_H = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \cdot \left\{ \operatorname{erf} \left( \frac{x - h_{\min}}{\sigma \sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{x - h_{\max}}{\sigma \sqrt{2}} \right) \right\}, \quad (2.111)$$

где

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt \quad \text{интеграл вероятности.}$$

Дальнейшее вычисление плотности  $p(x | k^*)$  состоит в подстановке выражения (2.111) вместо внутреннего интеграла выражения (2.110).

Очевидно, что результат будет представлять собой разность двух выражений одинаковой структуры, первое из которых обусловлено интегрированием первого слагаемого в фигурных скобках выражения (2.111), а второе - интегрированием второго слагаемого в фигурных скобках выражения (2.111). Сначала рассмотрим первое из получаемых выражений:

$$\frac{1}{2Ahc^2_M J < 72} \left. \frac{erf\left(\frac{h_{\min} - x}{\sqrt{2}} y\right)}{y} \right|_{-\infty}^{\infty} d\sigma = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{y^2} erf\left(\frac{h_{\min} - x}{\sqrt{2}} y\right) dy \quad (2.112)$$

где  $y = \frac{1}{a}$ .

Последний интеграл - табличный [146,148]. После преобразований результат интегрирования можно привести к виду

$$I_{p1} = \frac{1}{2\Delta h \sigma_M} \left\{ \frac{1}{y} \cdot erf\left(\frac{x - h_{\min}}{\sqrt{2}} y\right) + \frac{(x - h_{\min})}{\sqrt{2\pi}} \cdot \partial \left[ O, \frac{(x - h_{\min})^2}{2} y^2 \right] \right\} \Bigg|_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma_M} \quad (2.113)$$

где  $\partial(a,x)$  - дополнительная неполная гамма-функция.

Нетрудно видеть, что, как при  $(x - L_{тип}) > 0$ , так и при  $(x - L_{тип}) < 0$  подстановка пределов интегрирования даст одинаковый результат

$$\frac{1}{2Ah\sigma_M} \left\{ \sigma_M \cdot erf\left(\frac{x - h_{\min}}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sigma_M}\right) + \frac{(x - h_{\min})}{\sqrt{2\pi}} \cdot \partial \left[ O, \frac{(x - h_{\min})^2}{2\sigma_M^2} \right] \right\} \quad (2.114)$$

Аналогичным образом интегрирование второго слагаемого в фигурных скобках выражения (2.111) дает

$$p_2 = \frac{jWf}{2Ah(iM)} \cdot \frac{1}{\sigma_M^2} \cdot \frac{(x - h_{\max})}{\sqrt{2\pi}} \cdot \left[ O, \frac{(x - h_{\max})^2}{2\sigma_M^2} \right] \quad (2.115)$$

В итоге выражение (2.110) с учетом ранее временно опущенных индексов приводится к виду

$$p(x_i | k_i^*) = I_{p1} - I_{p2} = \frac{1}{2\Delta h_i \sigma_M} \cdot \left\{ \sigma_M \cdot \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{x_i - h_{i\min}}{\sigma_M \sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{x_i - h_{i\max}}{\sigma_M \sqrt{2}} \right) + \frac{(x_i - h_{i\min})}{\sqrt{2\pi}} \cdot \left[ O, \frac{(x_i - h_{i\min})^2}{2\sigma_M^2} \right] - \frac{(x_i - h_{i\min})}{\sqrt{2\pi}} \cdot \left[ O, \frac{(x_i - h_{i\max})^2}{2\sigma_M^2} \right] \right\} \quad (2.116)$$

Последнее выражение описывает процесс обработки выходного сигнала  $X|$  /-го датчика, необходимый для дальнейшего формирования решающей функции  $\langle \cdot, (\cdot) \rangle$ . Сам же алгоритм принятия решения при компонентном распознавании с исключением мешающих параметров задается следующим соотношением:

$$q_0(x_i) = P(k_0^*) \cdot p(x_i | k_0^*) \langle \cdot, D_0^* \rangle \langle \cdot, D_1^* \rangle + P(k_1^*) \cdot p(x_i | k_1^*) \quad (2.117)$$

Соответствующая ему структура устройства распознавания для случая  $L = 3$  представлена на рис. 2.19.

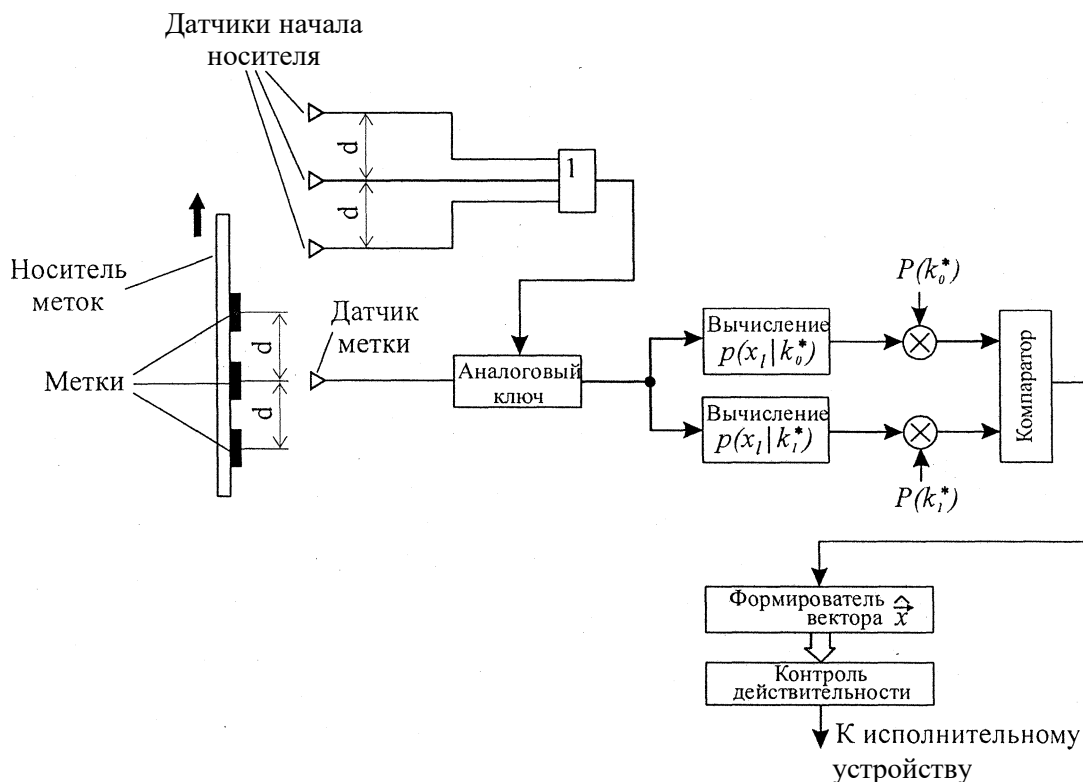


Рис. 2.19. Реализация функции распознавания в условиях априорной неопределенности

#### 2.4. Исследование адаптивных ферроимпульсных устройств считывания информационных сигналов

Во многих практических задачах импульсные сигналы, снимаемые феррозондом, например, с магнитного носителя, наблюдаются на фоне различных помех (меняющееся магнитное поле, наводки от мощного электротехнического оборудования и т.п.).

Ниже ставится задача синтеза параметров тракта ввода импульсных сигналов с целью получения его передаточной и импульсной переходной функции при наличии различных наводок на проводах, соединяющих феррозонд и преобразователь (измеритель) сигналов. Схема тракта ввода сигналов приведена на рис.2.20.

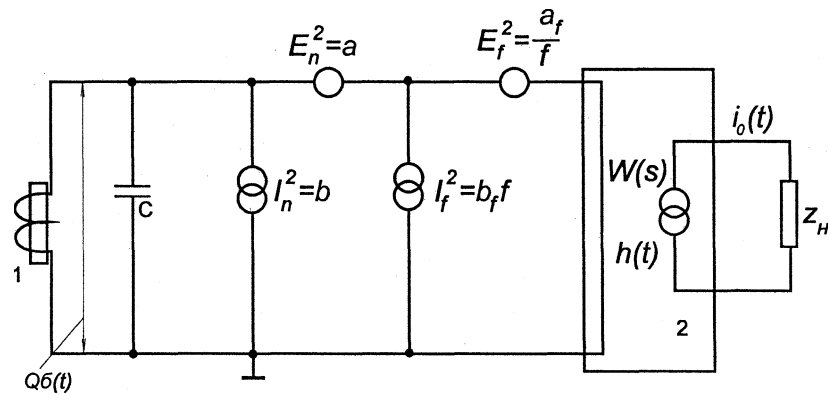


Рис. 2.20. Схема ввода сигналов от феррозонда:

1 - феррозонд, 2 - усилитель-преобразователь

$W_s$  представляет собой передаточную функцию всего тракта преобразования, а  $h_t$  - его импульсную переходную характеристику. На рис.2.20 помехи приведены по входу преобразователя. В схеме могут иметь место следующие помехи со спектральными плотностями [132]:

1. «Последовательный» белый шум от внешних наводок

$$E_n^2 = \quad (2.118)$$

2. «Параллельный» белый шум от внешних наводок

$$i^2 = \quad (2.119)$$

3. «Последовательный» белый шум, вызываемый процессами в полупроводниках, используемых в схеме преобразователя

$$E_f^2 = \frac{a_f}{f} \quad (2.120)$$

4. «Параллельный» белый шум, вызываемый процессами в диэлектриках, используемых в схеме преобразователя

$$I_f^2 = b_f f. \quad (2.121)$$

Все рассмотренные шумы могут быть представлены в виде эквивалентной помехи со спектральной плотностью

$$z^2 = N(\omega) = aC^2 a^2 + \dots + 2\gamma a f C^2 |z_y| + b. \tag{2.122}$$

Эквивалентная схема тракта при этом принимает вид рис.2.21.

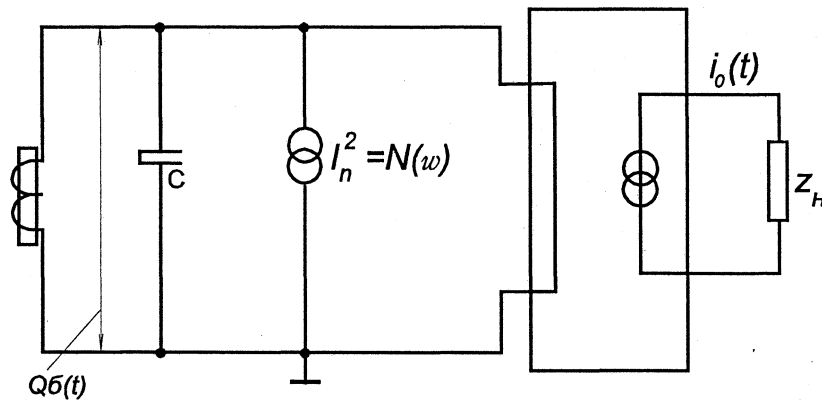


Рис.2.21. Эквивалентная схема тракта преобразования  $\delta(t)$ -импульсов от феррозонда

Оптимальное отношение сигнал/помеха может быть получено в виде следующего соотношения [132]

$$\Gamma C^2 Q^2 \ll G(\omega) \tag{2.123}$$

где  $G(\omega)$  - преобразование Фурье для входного импульсного сигнала  $Q\delta(t)$ .

С использованием (2.122) перепишем (2.123) следующим образом

$$\left(\frac{C}{n}\right)_{opt}^2 \frac{2g^2}{2\gamma} aC^2 a^2 + \dots + \frac{2\gamma a f C^2 \cos B}{\sqrt{2l^f}} da > . \tag{2.124}$$

Значение  $Q^2$ , которое делает отношение сигнал/помеха равным единице, можно определить как квадрат некоторого шумового заряда  $E^2$ .

Вычисление интеграла (2.124) дает

$$C_{opt} \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{k^2 - 1}} \quad (2.125)$$

при  $k < 1$ ,

$$C_{opt} \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{k + \sqrt{k^2 - 1}}{k^2 - 1}} \quad (2.126)$$

при  $k > 1$ .

В (2.125) и (2.126):

$$E_x^2 = c^4 a b \quad (2.127)$$

$EI$  можно рассматривать как квадрат эквивалентного шумового заряда для последовательного и параллельного белого шума, вызываемого оптимальной весовой функцией с неопределенным пиком  $\exp(-|t|/T_c)$ , где  $T_c = c^4 a b$  - постоянная времени так называемого «шумового корня».

1

Следует отметить, что  $y$  - помеха, вызываемая той же весовой функцией, даст следующий шумовой заряд:

$$E_y^2 = \frac{(b_f)^4}{2 \tau_a^2 C^2} \quad (2.128)$$

независящий от временной шкалы весовой функции.

Объединяя (2.127) и (2.128), можно получить следующее выражение для  $k$ :

$$k = \sqrt{E_x^2 / E_y^2} \quad (2.129)$$

Не говоря о члене —, величина  $k$  может быть интерпретирована как отношение двух квадратов «шумовых зарядов», оцениваемых для оптимальной весовой функции с неопределенным пиком.

Из выражений (2.125) - (2.129) может быть построена «оптимальная» зависимость 2 (рис.2.22).

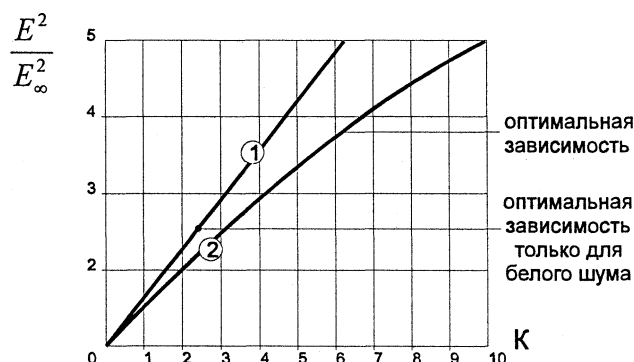


Рис. 2.22. Зависимость  $\frac{E^2}{E_\infty^2} = f(k)$

$$\frac{E^2}{T T - f(k)}. \quad (2.130)$$

На этом же рисунке для сравнения показана зависимость

$$\frac{E^2}{E_r} \sim 1 + \frac{2}{\pi} k$$

представляющая собой прямую линию 1. Можно сказать, что эта прямая представляет собой «оптимум только для белого шума».

В частотной области оптимальная передаточная функция может быть представлена в виде

$$H_{\text{ш}} \sim \exp(-\gamma/\tau_{\text{ш}}) \quad (2.131)$$

где  $B$  - коэффициент пропорциональности.

Опустив член, определяющий задержку  $\exp(-ja > T_p)$ , запишем выражение для весовой функции

$$h\left(\frac{t}{\tau_c}\right) = \frac{J_m \left\{ g \left[ \left( k - i\sqrt{1-k^2} \right) \frac{t}{\tau_c} \right] \right\}}{\operatorname{arctg} \frac{\sqrt{1-k^2}}{k}} \quad \text{при } k < 1, \quad (2.134)$$

Вычисление (2.133) и запись его относительно нормализованного времени дает

$$h\left(\frac{t}{\tau_c}\right) = \frac{g \left[ \left( k - \sqrt{k^2 - 1} \right) \frac{t}{\tau_c} \right] - g \left[ \left( k + \sqrt{k^2 - 1} \right) \frac{t}{\tau_c} \right]}{\ln \frac{k + \sqrt{k^2 - 1}}{k - \sqrt{k^2 - 1}}} \quad \text{при } k > 1, \quad (2.135)$$

На рис.2.23 приведены графики оптимальных весовых функций для различных значений  $k$ , построенные в соответствии с выражениями (2.134) и (2.135). Как видно, весовые функции имеют пик, равный 1, подобный классической экспотенциальной функции  $y = \exp(-|t|/\tau_c)$ , имеющей место при отсутствии у шума, что соответствует весовой функции при  $k = 0$ .

Время нормализовано по отношению к постоянной времени «шумового корня»  $\tau_c = c4ab$ .

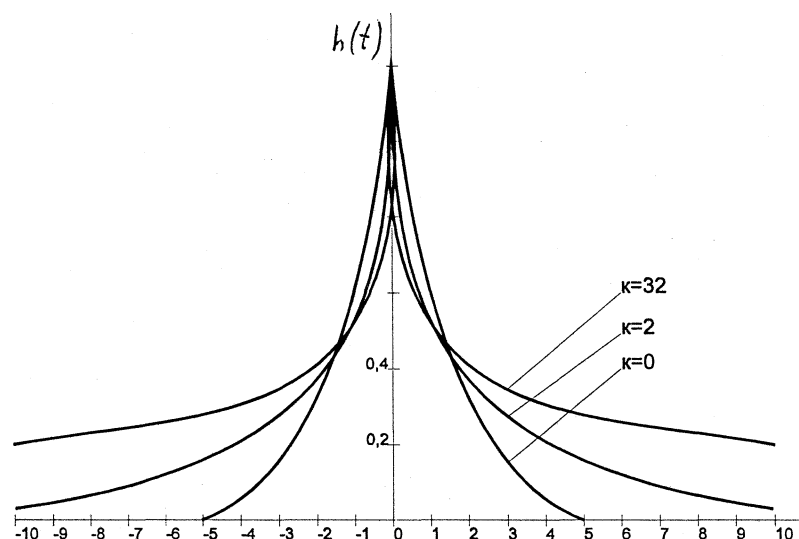


Рис.2.23. Форма оптимальной весовой функции в зависимости от времени

Более часто принимают во внимание тот факт, что весовая функция равна 0 вне временного интервала  $0 - 2T_p$  и симметрична относительно точки  $t = T_p$ . В этом случае выражение для весовой функции принимает вид

$$= \sum_{\pi=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{\pi/2}}{\pi} \exp(-\pi t / 2T_p) \cos(\pi t / 2T_p), \quad \pi=1,3,5,\dots, \quad (2.136)$$

где член с  $(t-2T_p)$  аннулирует вклад членов для времени  $t > 2T_p$ .

Для  $t=T_p$  имеем

$$= \sum_{\pi=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{\pi/2}}{\pi} \exp(-\pi/2) \cos(\pi/2) = 4 \sum_{\pi=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{\pi/2}}{\pi} \exp(-\pi/2), \quad \pi=1,3,5,\dots \quad (2.137)$$

Преобразование Лапласа для (2.136) дает

$$H(s) = \sum_{\pi=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{\pi/2}}{\pi} \frac{\exp(-sT_p)}{1 + s^2 T_p^2} \quad (2.138)$$

В частотной области из (2.138) получаем

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1}{m,n} > \frac{1}{2} [1 + \cos(2\omega T)]^{m,n} \quad m, n = 1, 3, 5, \quad (2.139)$$

Выходной сигнал схемы рис.2.23 может быть получен в виде

$$\overline{I^2(\Gamma)} = \int_{-\infty}^{\infty} p V(\omega) |H(\omega)|^2 d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} j\omega(\omega) |H(\omega)|^2 d\omega \quad (2.140)$$

Подставив (2.122) и (2.139) в (2.140), получим окончательное выражение для выходного сигнала

$$i\delta(t) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\omega} \frac{1}{\omega^2 + 4A^2} \frac{2T}{\omega} \frac{m}{\omega} \frac{c}{\omega} \quad m, n = 1, 3, 5, \dots \quad (2.141)$$

Выражение для отношения сигнал/помеха для данного случая может быть записано как

$$\left( \frac{C}{\Pi} \right)_{T_p}^2 = \frac{V, V A, \sin \frac{m}{2} \sin \frac{n}{2}}{c j^{\frac{m}{2}} a b X Z^{\frac{m}{2}} p^{\frac{m}{2}} m, n} \quad (2.142)$$

где  $Z_{mn}$  определяется интегралом.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\omega^2 + 4A^2} \frac{2T}{\omega} \frac{m}{\omega} \frac{c}{\omega} \quad (2.143)$$

Рассмотрим алгоритм считывания информации с подвижного носителя [106,119]. Он разработан как база для построения на его основе устройств считывания  $n$ -позиционных двоичных кодовых комбинаций, нанесенных на подвижной носитель в виде двоичных магнитных меток [120].

В процессе считывания носитель может двигаться с непостоянной

скоростью, а также совершать возвратно-поступательные движения. Кроме того, на практике возможен вход носителя меток в зону их считывания как в прямом направлении, так и в обратном. Поэтому совокупность датчиков рационально разместить вдоль так называемой линейки считывания (см. рис.2.13). На этом рисунке были приняты следующие обозначения: 1.1-Н.п - датчики определения местоположения кодоносителя в 1-й зоне считывания (ДОМК 1.1 ч- ДОМК 1.n); 2.1 ч-2.п - датчики определения местоположения кодоносителя во 2-й зоне считывания (ДОМК 2.1 -ьДОМК 2.п); ДОК 1 - датчик обнаружения кодоносителя, направляющегося в 1-ю зону считывания; ДОК 2 - датчик обнаружения кодоносителя, направляющегося во 2-ю зону считывания; СЭ - считывающий элемент;  $d_j$  - расстояние между кромкой кодоносителя и первой меткой;  $d_2$  - расстояние между метками.

Метки нанесены на кодоноситель так, что первая из них отстоит на расстоянии  $d_j$  от его кромки, а расстояние между соседними метками равно  $d_2$  (впрочем, это не принципиально, и расстояния между метками могут быть и неравными).

Считывающий элемент СЭ расположен посередине линейки считывания на расстоянии  $d_j$  от ближайших левого и правого датчиков обнаружения местоположения кодоносителя ДОМК. Расстояние от каждого последующего ДОМК до СЭ равно расстоянию от передней кромки кодоносителя до каждой последующей метки на нем (в случае расположения меток с постоянным шагом обозначим расстояние между метками как  $d_2$ ; оно же равно расстоянию между соседними ДОМК). По краям линейки считывания расположены датчики обнаружения кодоносителя соответственно ДОК 1 и ДОК 2, предназначенные для определения направления, с которого кодоноситель входит на линейку считывания. Ал-

горитм считывания данных, базирующийся на топологии элементов подсистемы считывания, представленной на рис.2.13, изображен на рис.2.24. Он функционирует следующим образом.

В отсутствие сигнала от ДОК 1 или ДОК 2 подсистема осуществляет непрерывную балансировку магнитомодуляционного СЭ, компенсируя воздействие на него внешнего магнитного поля, не связанного с кодоносителем и удерживая выходной сигнал СЭ в пределах пороговых значений, соответствующих нулевому уровню этого сигнала.

Пусть, для конкретности, кодоноситель входит на линейку считывания со стороны ДОК 1. Тогда датчики ДОМК 2.14-ДОМК2.П блокируются, т.к. в данной ситуации отсутствует необходимость в получаемой от них информации. Кодоноситель перемещается вдоль линейки считывания слева направо и в некоторый момент времени его кромка достигает ДОМК 1.1. В этот же момент времени середина первой метки оказывается расположенной напротив СЭ, и происходит считывание этой метки и передача ее значения («логический ноль» или «логическая единица») в подсистему верхнего уровня. После этого ДОМК 1.1 блокируется, в результате чего возможное последующее изменение направления движения кодоносителя или его возвратно-поступательное перемещение не приводят к повторному срабатыванию ДОМК 1.1 и повторному считыванию первой метки. При последующем перемещении кодоносителя слева направо срабатывают аналогичным образом (и затем блокируются) все остальные ДОМК (ДОМК 1.2 - ДОМК 1.п). Передача информационных сообщений об идентификационных кодах контролируемых объектов может передаваться непосредственно на локомотив с использованием оптических каналов связи и устройств времяимпульсного кодирования сигналов [99,110].

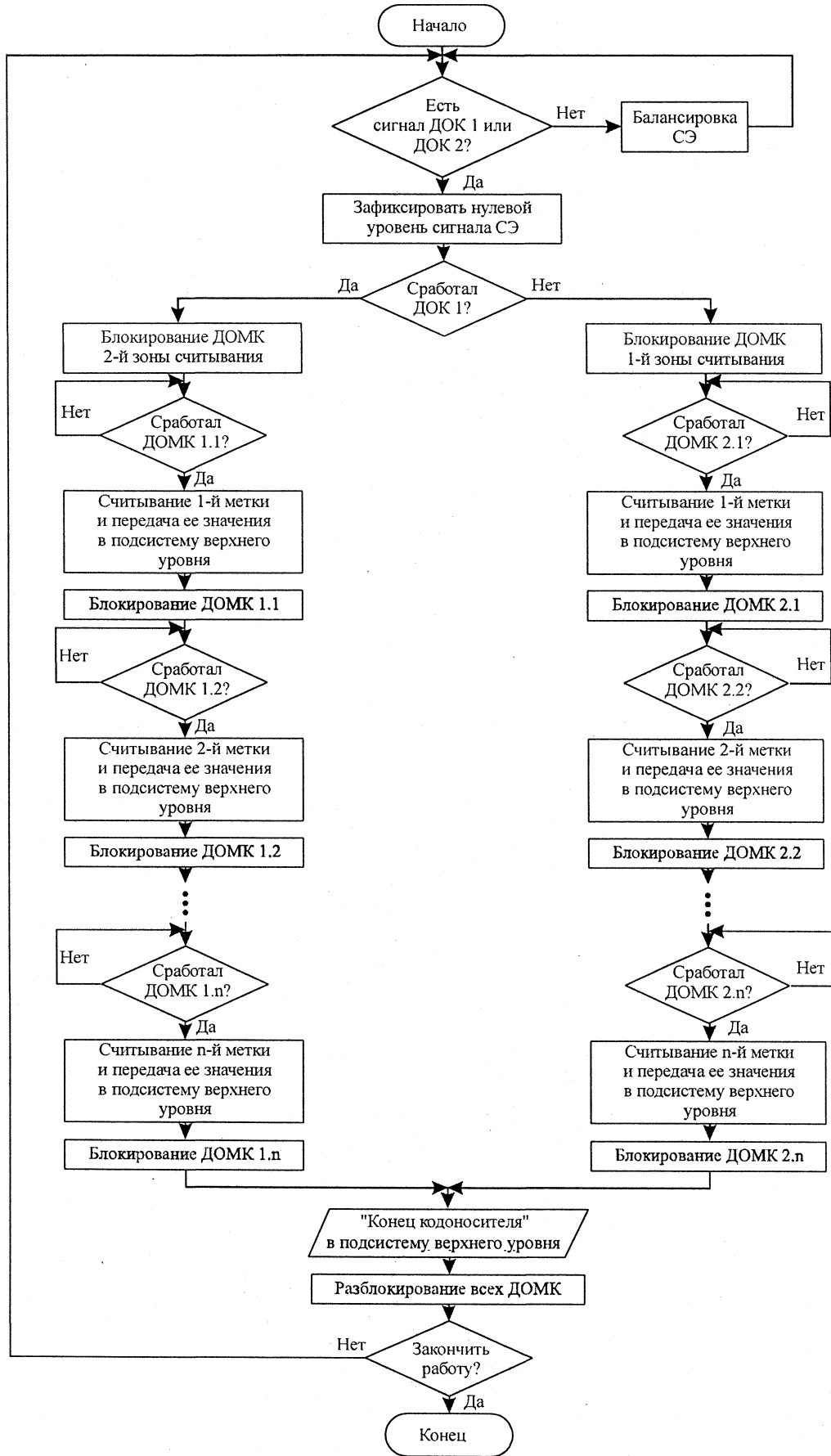


Рис. 2.24. Алгоритм считывания информации с колесных пар подвижного состава

После считывания последней метки формируется сообщение «Конец кодоносителя» для подсистемы верхнего уровня, обработка данного кодоносителя прекращается и все ДОМК обеих зон считывания разблокируются. Если после этого не поступает команда завершения работы, то алгоритм возвращается к процедуре балансировки СЭ.

Функционирование алгоритма в случае, когда кодоноситель входит на линейку считывания со стороны ДОК 2, аналогично вышеописанному, только теперь сразу блокированными оказываются ДОМК 1.14-ДОМК 1.n, а синхронизацию считывания обеспечивают ДОМК 2.1 4-ДОМК2.П.

Таким образом, разработанный алгоритм обеспечивает устойчивость процедуры считывания меток по отношению к неизбежным при эксплуатации нестабильностям скорости перемещения кодоносителя и направления его движения.

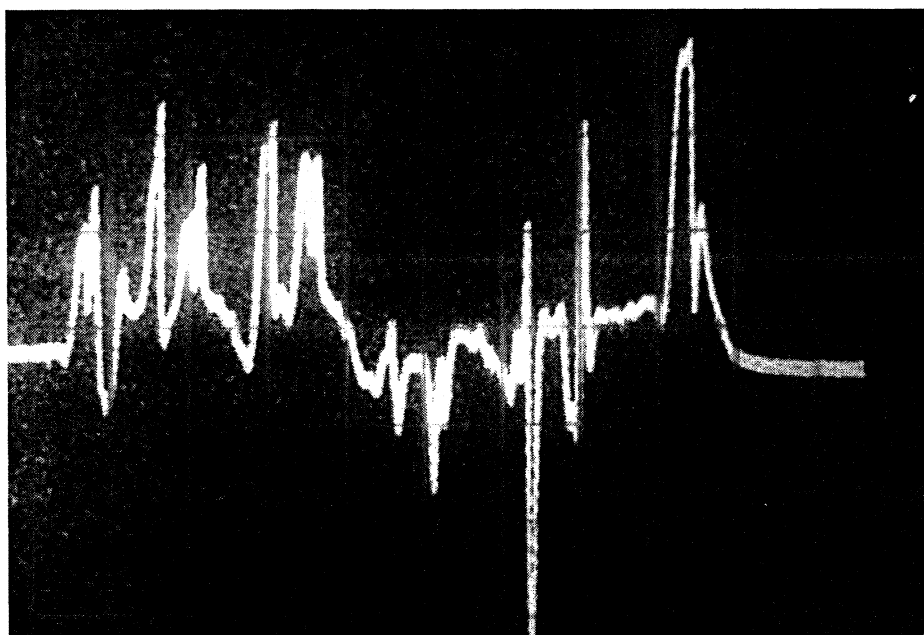
В диссертации проведены экспериментальные исследования разработанных автором опытных образцов адаптивных устройств считывания информации, реализующих выше рассмотренный алгоритм. В процессе испытаний путевые датчики устанавливались на расстоянии 25 см от головки рельса и использовались для измерения уровней остаточных магнитных полей колесных пар электропоездов Харьковского метрополитена (рис.2.25). Характер информационных сигналов, снимаемых адаптивными преобразователями с контролируемых объектов, для различных кодов, наносимых на подвижной состав, представлен на рис.2.26. Как видно из приведенных осциллограмм, разработанные устройства исключают влияния электромагнитных помех, вызываемых током тяговых двигателей электропоездов на результаты измерений.



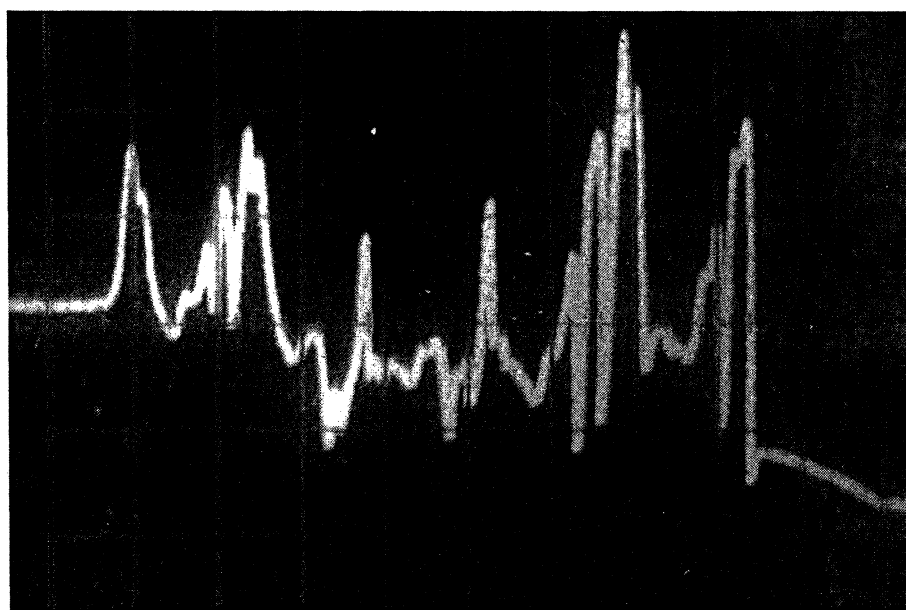
Рис. 2.25. Магнитомодуляционные преобразователи

## 2.5. Выводы по разделу 2

1. Решение проблемы распознавания подвижных составов на магистральном транспорте возможно на базе внедрения новых информационных технологий, основанных на использовании колесных пар вагонов для магнитной записи, хранения и передачи сообщений. Это включает установку на поездах датчиков идентификационного кода, что позволяет реализовать региональную концепцию построения контролирующих систем и повысить эффективность работы железнодорожного транспорта.



Код А



Код В

Рис. 2.26. Осциллограммы напряжения, снимаемые с устройств считывания информационных сигналов, соответствующие различным алгоритмам кодирования колесных пар

2. Одним из основных элементов системы идентификации поездов является функциональный намагничиватель. Характер распределения электромагнитного поля в магнитопроводе функционального намагничивателя можно описать дифференциальными уравнениями с разделенными компонентами относительно магнитного векторного потенциала, что в значительной степени облегчает решение оптимизационных задач, связанных с проектированием и разработкой реальных объектов.

3. Результаты моделирования характера распределения электромагнитных полей для трех плоскопараллельных сечений, одно из которых проходит по наружной поверхности рельса и колесной пары при  $b = 0$ , а два других - на расстоянии  $b = 1$  см и  $b = 2$  см, соответственно от первого, показали, что если под условно нулевым понимать магнитный поток, значение которого в  $10^3$  раз меньше потока, замыкающегося через площадку в месте контакта колеса и рельса, то в воздушном зазоре, ширина которого превышает 8Л, величина индукции в каждой точке силовой линии практически одинакова. Из этого следует, что границу условно нулевого потока можно считать совпадающей с крайней силовой линией магнитного поля.

4. Наиболее эффективным при маркировке транспортных средств является оптимальный с точки зрения минимума средней ошибки алгоритм распознавания колесных пар. Однако, из-за большого количества параллельных каналов он сложен в реализации и поэтому может быть рекомендован только для применения в пунктах записи информационных сигналов. При этом для восстановления потерянной информации в условиях априорной неопределенности целесообразнее всего использовать процедуру покомпонентного распознавания сигналов.

5. В процессе синтеза параметров тракта ввода импульсных сигналов с целью получения его передаточной и импульсной переходной характеристик установлено, что полученные весовые функции имеют пик, равный 1, подобный классической экспотенциальной функции  $y = \exp(-I/T_c)$ , имеющей место при отсутствии у шума, что соответствует весовой функции при  $\kappa = 0$ .

6. Экспериментальные исследования опытных образцов адаптивных устройств считывания информации, проведенные на Харьковском метрополитене, показали, что разработанные устройства исключают влияние электромагнитных помех, вызываемых тяговым током на результаты измерений. При этом путевые датчики устанавливались на расстоянии 25 см от головки рельса и использовались для измерения уровней остаточных магнитных полей колесных пар электропоездов.

### РАЗДЕЛ 3

#### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК КАЧЕСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ, ПЕРЕДАВАЕМЫХ КОНТРОЛИРУЕМЫМИ ОБЪЕКТАМИ

##### 3.1. Математическая модель процесса обнаружения в зоне контроля колесных пар подвижного состава

В процессе идентификации подвижных составов необходимо выносить решение о наличии или отсутствии колесных пар вагонов в контролируемой зоне, анализируя сигналы, поступающие от нескольких независимых датчиков. В связи с этим возникает проблема выбора наилучших, в некотором смысле, процедуры и устройства, обеспечивающих решение указанной задачи, в более широком смысле называемая проблемой комплексирования измерителей [137].

Рассмотрим задачу в следующей постановке. Имеются два датчика, координаты которых известны. Контролируемый объект перемещается с постоянной скоростью  $V$  в пространстве так, что сначала воздействует на первый датчик, а затем на второй (рис. 3.1).

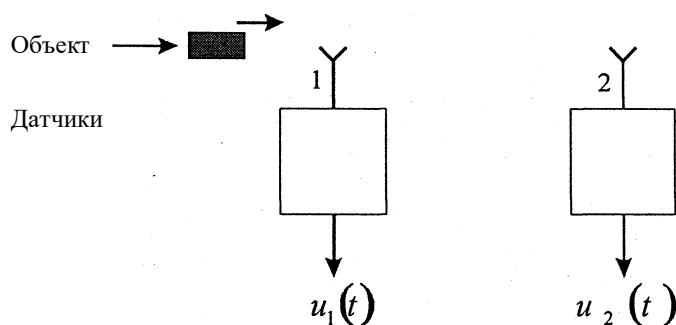


Рис. 3.1. Обработка сигналов от независимых датчиков

Сумма зон действия обоих датчиков образует зону контроля. Выходные сигналы первого и второго датчиков преобразуются в электрические сигналы соответственно и  $u_2(t)$  (которые в дальнейшем будем называть наблюдаемыми процессами). Как на входах датчиков, так и в процессе преобразования полезные компоненты сигналов датчиков подвергаются аддитивному воздействию помех. Функции времени, описывающие эти полезные компоненты, известны с точностью до ряда параметров. Статистические характеристики помеховых компонентов известны либо могут быть измерены. Необходимо на основе анализа наблюдаемых на временном интервале наблюдения  $[T_1 T_2]$  процессов  $w(t)$  и  $w_2(t)$  вынести столь возможно более достоверное решение о наличии или отсутствии объекта (т.е. обнаружить объект) в зоне контроля в указанном временном интервале (интервале наблюдения).

Известны два основных подхода к решению проблемы комплексирования измерителей [137]:

1) комплексирование по входам, при котором осуществляется оптимальная совместная обработка наблюдаемых процессов. Этот подход носит также название оптимального комплексирования;

2) комплексирование по выходам, при котором оптимальная обработка каждого из наблюдаемых процессов осуществляется порознь, а результаты её (выходные сигналы всех измерителей) оптимальным образом объединяются.

Оптимальное комплексирование позволяет решить поставленную задачу наилучшим, с точки зрения достоверности обнаружения объекта, образом. Однако нельзя гарантировать реализуемость оптимального алгоритма обнаружения. Если же его можно реализовать, то аппаратные затраты могут оказаться неприемлемо большими, а выигрыш в досто-

верности обнаружения по сравнению с аналогичным показателем для субоптимальных устройств может быть недостаточно большим, чтобы оправдать эти затраты (при условии, что достоверность, обеспечиваемая субоптимальными устройствами, не ниже заданной). В последующих разделах представлены материалы, позволяющие разрешить указанные проблемы применительно к поставленной задаче.

Примем для описания наблюдаемых процессов следующую модель:

$$u = \sum_{j=1}^n a_j S_j(t); \quad (3.1)$$

$$w_2(t) = \sum_{i=1}^2 a_{2i} S_{2i}(t - m_i) + n_2(t), \quad (3.2)$$

$$t \in [T_1, T_2].$$

Здесь  $z$  - параметр обнаружения:  $z = z_j = 1$ , если объект находился в зоне контроля на интервале наблюдения;  $z = z_0 = 0$ , если это условие не выполнено;

$a_i$  ( $i=1, 2$ ) - амплитуда полезного компонента  $i$ -го наблюдаемого процесса;

$S_1(t)$ ,  $S_2(t)$  - функции времени, описывающие форму полезного компонента соответственно первого и второго наблюдаемого процесса;

$m_i$  - масштабный множитель, задающий скорость изменения функций  $S_1(t)$  и  $S_2(t)$  во времени в зависимости от скорости  $V$  перемещения объекта в зоне контроля;

$t_n$  - задержка появления полезного компонента первого наблюдаемого процесса по отношению к моменту  $t=T_1$  начала интервала наблюдения;

$m$  - задержка колебания  $S_2(t)$  по отношению к колебанию  $S_1(t)$  при  $m_z=1$ , т.е. при некотором значении скорости  $V$ , принятом за номинальное;

$$n_i(t) \quad (i=1, 2) - \text{помеховый компонент } i\text{-го наблюдаемого процесса.}$$

Поведение некоторых членов модели (3.1), (3.2) носит вероятностный характер. Проанализируем обуславливающие его причины и дадим соответствующее описание этих членов.

Будем считать, что все контролируемые объекты проходят зону контроля по одной и той же траектории, со случайными скоростями, равномерно распределенными в диапазоне от минимального  $N_{min}$  до максимального  $N_{max}$  значения. Номинальное значение скорости  $V_n = (V_{mz} + V_{ma})/2$ . Тогда масштабный множитель  $mi = NN_n$  также является случайной величиной, равномерно распределенной на интервале

Соответствующая плотность вероятности есть

$$0, m g [m_{tmin}, m_{tmax}] \quad (3.3)$$

Численное значение параметра  $t_n$  определяется преимущественно поведением объекта перед входом в зону контроля, поэтому будем полагать это значение независимой величиной с плотностью вероятности

$$n_{max} \quad n_{min} \quad (3-4)$$

где  $t_{nmax}$  и  $t_{nmin}$  - соответственно максимальное и минимальное значения параметра  $t_n$

Из физических соображений следует ожидать наличия статистической связи величин  $V$  и  $a_2$ . Примем в качестве характеристики такой связи совместную плотность вероятности и положим ее гауссовской:

$$2^{1/2} A^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f_i \Gamma(\langle i \rangle)^2}{\exp \langle \dots \rangle} \dots$$

где  $a_1$  и  $a_2$  - математические ожидания соответственно величин  $a_1$  и  $a_2$ ;  
 $\sigma_{a1}$  и  $\sigma_{a2}$  - среднеквадратические значения соответственно величин  $a_1$  и  $a_2$ ;  
 $R_{a12}$  - коэффициент корреляции.

Помеховые компоненты  $n_i(f)$  ( $i=1,2$ ) будем полагать взаимно независимыми стационарными в широком смысле гауссовскими случайными процессами со спектральными плотностями мощности

$$S_{n_i} = \frac{1}{2} \exp(-F|f|) \quad 0 \leq f \leq F, \quad (i = 1, 2)$$

и, следовательно, дисперсиями

$$\sigma_{n_i}^2 = \frac{1}{2} F, \quad (i = 1, 2) \quad (3.6)$$

причем граничная частота  $F$  спектра помех полагается большей, чем наивысшая из частот спектра полезных компонентов.

Задача обнаружения контролируемого объекта путем обработки наблюдаемых процессов  $u_x(t)$  и  $u_2(t)$  может рассматриваться как задача оценки параметра  $L$  модели (3.1)-(3.2) при наличии несущественных

параметров  $a_1, a_2, m, t_n$ . Типовым критерием качества оценки в подобных случаях принято считать средний риск [136]

$$p = \int_{L} \int_{N} \int_{H} X(p\{L, 2, ij\}) d\mu_A dX, \quad (3.7)$$

где  $L$  - пространство оценок параметра  $\theta$  ;

$L$  - пространство возможных значений параметра  $\theta$  ;

$N$  - пространство несущественных параметров;

$\gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4)^T$  - вектор несущественных параметров

("T" - символ, обозначающий транспонирование);

$g(\theta, \theta)$  - функция потерь;

$p(\theta, \theta, \gamma)$  - совместная плотность вероятности реализации совокупности величин  $\theta, \theta$  и  $\gamma$ .

Учтем, что согласно известному [138] правилу теории вероятностей

$$p(\theta, \theta, \gamma) = p(\theta, \theta) p(\gamma)$$

и что, ввиду дискретности параметра  $\theta$ ,

$$p(\theta, \theta) = \sum_{k=1}^K P_k \delta(\theta - \theta_k),$$

где  $P_k = P(\theta = \theta_k)$  - вероятность получения оценки  $\theta_k$ , в то время как

истинное значение  $\theta = \theta$ , при условии, что вектор несущественных параметров есть  $\gamma$ ;  $\delta(\cdot)$  - дельта-функция.

Тогда выражение (3.7) преобразуется к виду

$$p = \int_{H} \int_{L} p(\gamma) \sum_{k=1}^K P_k \delta(\theta - \theta_k) d\mu_A d\gamma$$

$$p(\gamma) = \int_{H} p(\gamma) d\gamma$$

(3.8)

Вероятности  $P(Y = j)$  и  $P(L_0)$  - априорные вероятности соответственно наличия и отсутствия объекта в зоне контроля.

При решении задачи оценки дискретного параметра  $L$  имеет смысл применить простую функцию потерь [136]

$$r(L_k) = \sum_{l=1}^5 z_{kl},$$

где  $z_{kl}$  - символ Кронекера.

Постановка этого выражения в (3.8) дает

$$P = \sum_{L} p(L) \{ P(L_0) \cdot P(L_X / L_0, \gamma) + P(L_X / L, \gamma) \} =$$

$$= \sum_{L} p(L) \{ P(L_0, L_X) \cdot P(L_X / L_0, \gamma) + P(L_X) \cdot P(L_X / L, \gamma) \} =$$

Сумма в фигурных скобках есть вероятность принятия ошибочного решения (получения оценки  $L_k$  при истинном значении параметра  $L$ , равном  $L$ ). Так как принятие правильного решения и принятие ошибочного решения составляют полную группу событий, то можно записать, что

$$P = \sum_{L} p(L) \{ 1 - [P(L_0) \cdot P(L_X / L_0, \gamma) + P(L_X) \cdot P(L_X / L, \gamma)] \} =$$

$$= \sum_{L} p(L) \{ 1 - [P(L_0) \cdot P(L_X / L_0, \gamma) + P(L_X) \cdot P(L_X / L, \gamma)] \} =$$

Поскольку

$\sum_{L} p(L) = 1$

то

$$P = 1 - \sum_{L} p(L) \{ P(L_0) \cdot P(L_X / L_0, \gamma) + P(L_X) \cdot P(L_X / L, \gamma) \} =$$

Средний риск  $p$  минимален, если вычитаемое в этом выражении

максимально

$$P(L_0) - P(I_0/L_0) \cdot P(L, \cdot) = \max_L \quad (3.9)$$

Здесь

$$P(L, \cdot) = \int_U p(u_x, u_2/A) \cdot f(u_x, u_2) \cdot dU, \quad i=0,1; \quad (3.10)$$

где  $U$  - область пространства наблюдаемых процессов, в которой принимается решение  $L=A$ .

Подставим (3.10) в (3.9) и поменяем порядок интегрирования.

Получим

$$\begin{aligned} & \int_U P(Y_0) \cdot \int_U p(u_x, u_2/A) \cdot f(u_x, u_2) \cdot dU + \\ & + \int_U P(A) \cdot \int_U p(u_x, u_2/A) \cdot f(u_x, u_2) \cdot dU = \max_L \end{aligned} \quad (3.11)$$

Воспользуемся известными из теории вероятностей взаимосвязями

$$\begin{aligned} p(x, y / z) &= p(y) \cdot p(x / y, z), \\ \int_Y p(x, y / z) \cdot dy &= p(x / z), \end{aligned}$$

из которых вытекает, что

$$\int_Y P(y) \cdot P(x / y, z) \cdot dy = p(x / z).$$

Обозначив реализации наблюдаемых процессов на интервале  $[T_1, T_2]$  как  $u_1$  и  $u_2$  и положив, что  $x=(u_x, u_2)$ ,  $y=f$ , можно на основании последнего выражения записать функцию правдоподобия

$$p(u, u_2/A_i) = \int_U p(r_j) \cdot p(u_x, u_2/A_i), \quad (i=0,1). \quad (3.12)$$

С учетом этого (3.11) преобразуется в

$$P(\Pi_0) \cdot \int_{\mathcal{L}/0} p(u_1, u_2 | \Pi_0) du_1 du_2 + P(2) \int_{\mathcal{U}} p(u_1, u_2 | \Pi_1) du_1 du_2 = \max_{\pi} \quad (3.13)$$

Известно [136,138], что это условие выполняется, если решения  $\pi = \pi_0$  принимаются следующим образом:

$$\begin{aligned} & p(u_1, u_2 | \Pi_0) / P(\Pi_0) \\ & \propto p(u_1, u_2 | \Pi_1) P(\Pi_1) \\ & p(u_1, u_2 | \Pi_0) P(\Pi_0) \\ & \propto p(u_1, u_2 | \Pi_1) P(\Pi_1) \end{aligned} \quad (3-14)$$

Таким образом, совокупность выражения (3.13) и правила (3.14), определяющая порядок оценки дискретного параметра  $\Pi$  в случае поступления наблюдений с двух датчиков, весьма сходна с аналогичными соотношениями для случая одного датчика [136]. Однако в нашем случае  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  - не отсчеты процесса, генерируемого одним источником и имеющие одинаковые вероятностные характеристики, а процессы, генерируемые различными источниками и имеющие различные вероятностные характеристики. Это обуславливает существенную новизну результата.

Положим, что процессы  $w(t)$  и  $z_2(t)$  продискретизованы по времени в соответствии с требованиями, предъявляемыми при представлении функций времени рядом Котельникова [140]. Кроме того, предположим на время, что параметры  $\Pi$  и  $i, j$  известны. Тогда, в соответствии с принятой моделью наблюдаемых процессов, отсчеты  $\langle [i, j] \rangle$  и  $u_2^{[i, j]}$  этих процессов (верхний индекс обозначает номер отсчета, нижний - номер процесса) - гауссовские случайные величины с плотностями вероятности.

$$P(u_2^{[i, j]} | \Pi, p) = \frac{1}{\sqrt{L}} \exp\left\{ -\frac{1}{2} \frac{(u_2^{[i, j]} - \mu)^2}{\sigma^2} \right\}$$

где  $u^{(k)}$  и  $s^{(k)}$  - отсчеты соответствующих функций времени в момент  $t_k = k \cdot \Delta T$ ;  $\Delta T = (2F)^{-1}$  - интервал дискретизации.

Поскольку наблюдение ведется на интервале времени  $t \in [T, T_2]$ , то  $K = K_2 - K_1$ , где  $K_x = (T_x / \Delta T) + 1$ ,  $K_2 = T_2 / \Delta T$ .

Так как случайные процессы  $n_x(t)$  и  $n_2(f)$  независимы, то независимы и случайные величины  $u^{(k)}$  и  $u_2^{(k)}$ . Кроме того, при дискретизации по Котельникову отсчеты взаимно некоррелированы, что для отсчетов гауссовских процессов равносильно независимости. Поэтому

$$p(u_x, u_2 | L, p) = \prod_{k=K_1}^{K_2} p(u_x^{(k)} | L, p) \cdot \prod_{k=K_1}^{K_2} p(u_2^{(k)} | L, p) =$$

$$= \exp \left\{ - \sum_{k=K_1}^{K_2} \left[ \lambda a_2 s_2^{(k)}(m_1, t_n) \right]^2 \right\}$$

Выполним замены  $\sum_{n_j}^2$  на  $N_{0j} F$  и  $(K_2 - K_1 + 1)$  на  $(T_2 - T_x) / \Delta T = (T_2 - T_x) F$  и учтем, что на основании теоремы Парсеваля [139] каждая из сумм может быть заменена интегралом по времени. Получим

$$p(u_x, u_2 | L, p) = \frac{1}{(2\pi F)^{N_{0x} N_{02}}} \cdot \exp \left\{ - \sum_{n_j}^2 \left[ \lambda a_2 s_2^{(k)}(m_1, t_n) \right]^2 \right\} \quad (3.15)$$

Рассмотрим выражения в показателях экспонент, без потери общности полагая, что  $T_x = 0$ ,  $T_2 = T$ :

$$I_{oi} = \frac{1}{N_{oi}} \int_0^T [w_{oi}(t) - \mu_{oi}]^2 dt = p_{ui} - q_{oi}(A, i, j) + p_{si}(A, q),$$

где

- отношение энергии z-го процесса на интервале наблюдения к спектральной плотности мощности помехи

$$I_{oi} = \frac{1}{N_{oi}} \int_0^T u_{oi}^2(t) dt \quad (3.16)$$

- в соответствии с принятой терминологией [136] называется z-м корреляционным интегралом

$$\langle I_{oi}(A, q) \rangle = \frac{1}{N_{oi}} \int_0^T [A^2 q_{oi}(t, m_i, t_n)] dt \quad (3.17)$$

- энергетическое отношение “i-й сигнал/помеха”

$$V_{si}(A, q) = \frac{1}{M_{oi}} \int_0^T [A^2 q_{si}(t, m_i, t_n)] dt \quad (3.18)$$

В итоге выражение (3.15) может быть представлено в виде:

$$p(u_2/A, q) = C_N \quad \blacksquare$$

где  $C_N = \dots$ .

Так как  $p_{ui}$  не зависят от оцениваемого и от несущественных параметров, то можно отнести первую экспоненту к константе и записать что

$$p(u_x, u_2 l A, r_j) = C_{NU} \quad (3,19)$$

С учетом последнего выражения допущение о нежесткой связи амплитудных значений полезных компонентов наблюдаемых процессов и  $m_2(0$  (которой соответствуют значения коэффициента корреляции  $R_{A12}$  из выражения (3.5), меньше единицы) не позволяет на базе (3.12), (3.3) - (3.5), (3.19) и (3.14) получить в явном виде описание алгоритма оценки параметра 2. Однако результаты, полученные в рамках решения задачи оптимального комплексирования двух датчиков, являются полезными в нескольких отношениях:

1) они указывают на неконструктивность точного решения рассматриваемой задачи и на необходимость поиска субоптимальных решений;

2) ряд из полученных соотношений может быть применен в ходе синтеза субоптимальных алгоритмов и устройств;

3) положив  $l^*(\wedge) = \langle \wedge - \wedge, \rangle$  в полученных выше соотношениях (здесь  $\wedge$  - вектор с полностью известными компонентами - несущественными параметрами), можно получить алгоритм и структуру устройства оценки  $L$ , при известных несущественных параметрах и использовать характеристики такого устройства в качестве эталонных при анализе работы субоптимальных устройств.

#### 4) 2 Синтез устройства идентификации, реализующего функцию правдоподобия алгоритма обнаружения колесных пар

Используя полученные результаты, синтезируем субоптимальное устройство, реализующее функцию правдоподобия субоптимального алгоритма обнаружения колесных пар. Будем считать, что амплитуды

чайными величинами, но связаны прямо пропорциональной зависимостью:

$$a_2 = m_A a_1$$

где  $m_A$  - известный неслучайный коэффициент.

С учетом этого допущения модель наблюдаемых процессов примет вид:

$$x_1(t) = \lambda a_x s_x(m, t-t_0) + n_x(t); \quad (3.20)$$

$$u_2(\Gamma) = 2m_A a_x s_2[m, (t-m) - 1,] + n_2(\Gamma).$$

В этой модели несущественные параметры образуют вектор

$$\gamma = (a_1, w, \dots)^T.$$

Случайные величины  $m$ , и  $t_n$  имеют плотности вероятности соответственно (3.3) и (3.4), случайная величина - плотность вероятности

$$X_{(i)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{A1}} \cdot \exp\left\{-\frac{(x_i - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\}$$

Случайная величина  $a_x$  статистически независима от случайных величин  $m$ , и  $t_n$ , которые, в свою очередь, также статистически независимы (см. второй параграф данной главы). Поэтому

$$P(\gamma) = P(a_x, m, t_n) = p(a_x) \cdot p(m) \cdot p(t_n) \quad (3.23)$$

Соответствующее модели (3.20), (3.21) выражение для функции правдоподобия наблюдаемых процессов получим из (3.15):

$$\exp\left\{-\frac{1}{2} \gamma^T \Gamma \gamma\right\}$$

$$1 - \frac{1}{2} \gamma^T \Gamma \gamma$$

$$\frac{1}{2} \gamma^T \Gamma \gamma$$

Определяемые выражениями (3.16)-(3.18) величины  $p_{uj}$ ,  $p_{si}(A,p)$  с учетом (3.24) рассчитываются следующим образом (по-прежнему полагаем, что  $T^{\wedge}O, T_2=T$ ):

$$HuX = \int_{0}^{T} f^W_1(t) dt \quad (3.25)$$

$$Nu2 = \int_{0}^{T} f^W_2(t) dt \quad (3.26)$$

$$q_x(L, *7) = \int_{0}^{T} (05)(m, t - t_n) dt; \quad (3.27)$$

$$(L, i?) = \int_{0}^{T} [Lm_A a_x u_2(t) s_2[m, (t-T)-t_n]] dt; \quad (3.28)$$

$$\Pi = \int_{0}^{T} A^2 a_x s_x(m, -t-t_n) dt; \quad (3.29)$$

$$MS2(L' 7) = \int_{0}^{T} a^2 s^2 m! (t - O - t_n) dt. \quad (3.30)$$

Учет выражений (3.25) - (3.30) не влияет на вид компактной записи (3.19) условной по  $i$ ; функции правдоподобия. Для исключения ее зависимости от несущественных параметров, образующих вектор  $q$ , в соответствии с (3.12) усредним ее по этим параметрам, используя (3.23)

$$p(y, u_2/L) = C_m \int \int p(a_1) p(m, t) \exp\{q_1(A, a_1, m, t) + q_2(A, a_1, m, t) - p_{si}(A, a_1, m, t) - p_{s2}(A, a_1, m, t)\} dt dm da_x. \quad (3.31)$$

С целью дальнейшей конкретизации вида выражений (3.27) - (3.30) положим, что  $\delta(\cdot)$  и  $\delta_2[\cdot]$  представляют собой прямоугольные импульсы, изображенные нарис. 3.2.

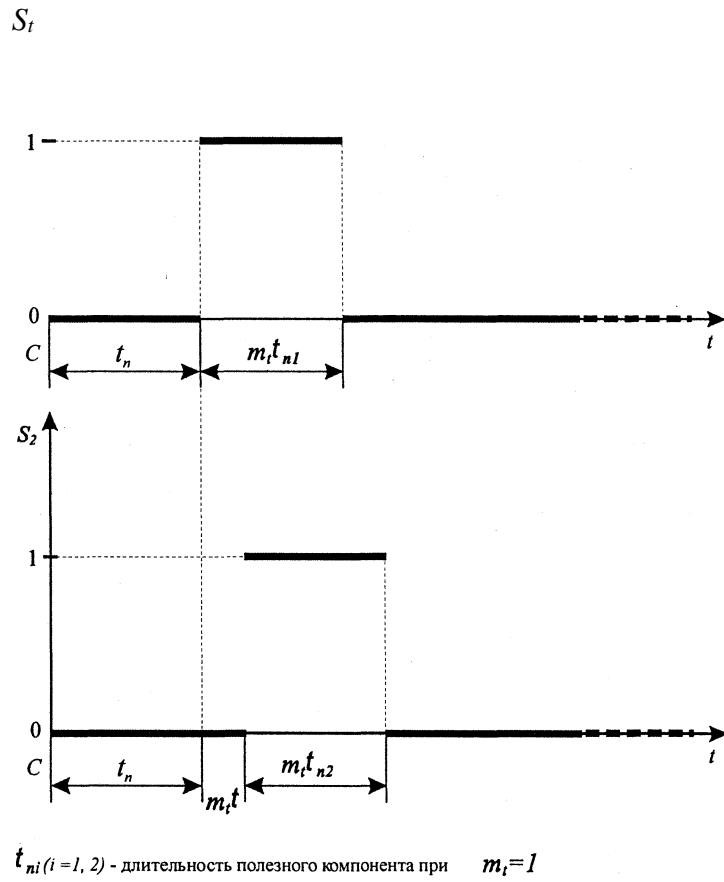


Рис.3.2. Параметры сигналов  $S_1(t)$  и  $S_2(t)$

Соответствующее аналитическое описание таково:

$m_{ni} (i = 1, 2)$  - длительность полезного компонента наблюдаемого процесса при  $m_i = 1$ .

$$\begin{aligned}
 & 1, \Gamma \in [\Gamma_{ni}, \Gamma_{ni} + m_{ni}] \\
 & 0, \text{ при иных значениях } t;
 \end{aligned}
 \tag{3.32}$$

$$\begin{aligned}
 & 1, t \in [\Gamma_{ni}, \Gamma_{ni} + m_{ni}; \Gamma_{ni} + m_{ni} + m_{ni2}] \\
 & 0 \text{ при иных значениях } t;
 \end{aligned}
 \tag{3.33}$$

$$T > \max \{ \Gamma_{ni} + m_{ni}, (\Gamma_{ni} + m_{ni} + m_{ni2}) \}.$$

Рассчитаем величины, определяемые соотношениями (3.29) и (3.30):

$$\frac{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L \dots}{N_{01}} = \frac{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L \dots}{N_{01}} \quad (3.34)$$

$$A_{\gamma}(-M) = \frac{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L \dots}{N_{01}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L \dots}{N_{02}} \quad (3.35)$$

Выражения (3.27) и (3.28) на данном этапе все еще нельзя привести к виду, позволяющему выполнить усреднение в соответствии с (3.31). Чтобы получить  $p(u_1, u_2 / \mathcal{Y})$  в форме, которая может быть интерпретирована как доступный для реализации алгоритм совместной обработки наблюдаемых процессов  $W_j(r)$  и  $u_2(z)$ , модифицируем  $p(m_i)$  и  $p\{t_n\}$ , положив эти параметры дискретными

$$P(\wedge) = \sum_{l=1}^L S^P \cdot \dots \quad (3.36)$$

$$Ж) = \sum_{l=1}^L S(t, \dots) \quad (3.37)$$

Подстановка этих выражений в (3.31) дает:

$$p(u_1, u_2 / \mathcal{Y}) = C_{NU} \cdot 2X^{P \dots} \cdot \sum_{i=1}^{KL} J_p(\langle i \rangle) \cdot \exp\{-a^2 \cdot M(A, k) + a_i \cdot Q(2, k, l) \} \quad (3.38)$$

где

$$M(\mathcal{Y}L) = \frac{\sum_{i=1}^L m_{iX}}{N_{01}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^L m_{iZ}}{N_{02}} \quad (3.39)$$

$$Q(A, k, l) = \int_{a_{1 \min}}^{a_{1 \max}} \exp \left\{ -\frac{a_1^2}{2\sigma_{A1}^2} \right\} M(J, \kappa) + \frac{1}{2\sigma_{A1}^2} Q(A, k, l) da_1 = \dots \quad (3.40)$$

Обозначим в выражении (3.38) интеграл как  $I(X, \kappa, \Gamma)$  и вычислим этот интеграл, подставив в него  $I(X, \kappa, \Gamma)$ :

$$I(X, \kappa, \Gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{A1}} \int_{a_{1 \min}}^{a_{1 \max}} \exp \left\{ -\frac{a_1^2}{2\sigma_{A1}^2} \right\} M(J, \kappa) + \frac{1}{2\sigma_{A1}^2} Q(A, k, l) da_1 = \dots$$

Интеграл в данном выражении является табличным [146] и в итоге

$$\begin{aligned} & \exp \left\{ -\frac{a_1^2}{2\sigma_{A1}^2} \right\} \\ & \text{erf} \sqrt{\frac{a_{1 \max} - M(A, k) + J}{2\sigma_{A1}^2}} \frac{Q(A, k, n + \dots)}{2IM(J, \kappa) + \dots} \\ & - \text{erf} \sqrt{\frac{M(J, \kappa) + \dots}{2M(J, \kappa) + \dots}} \dots \end{aligned} \quad (3.41)$$

При  $2-2_0=0$  имеем  $L/(OL) = 0$ ,  $2(^\circ>M) = 0$  и

$$W, O=| \operatorname{erf}\left(\frac{a_{1\max} + \alpha}{\sigma_{A1}\sqrt{2}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a_{1\min} + \alpha_1}{\sigma_{A1}\sqrt{2}}\right) \quad (3.42)$$

причем величина  $/_0$  не зависит от  $\kappa$  и  $l$ . Таким образом, в соответствии с (3.38) и (3.42) имеем

$$P_{< \kappa} (3.43) \quad \kappa=1 \dots 7=1$$

При  $2=2] = 1$  значения  $Q(l, k, l)$  и  $M(\backslash, \kappa)$  являются, согласно (3.39) и (3.40), функционалами от « $(l)$  и  $w_2(r)$ . Этому значению параметра  $2$  соответствует  $\cdot$ . В итоге

\*-1 7-1

Вспомнив, что плотности вероятности (3.36) и (3.37) являются, применительно к решаемой задаче, дискретными сигналами плотностей вероятности (3.3) и (3.4), получим, что

$$P_{mk} = \dots P = \dots L$$

и что

$$C \kappa \quad (3.44)$$

\*-1 7=1

С учетом (3.43) и (3.44) отношение правдоподобия принимает вид

$$\frac{/ > (\underline{ц}, 1/2 / 2 \underline{о}) - \underline{£} p - \underline{Л}}{p(u_x, u_2 / \wedge \wedge I(\backslash, \kappa, l))} \quad \kappa=1 \dots 7=1$$

Использование последнего выражения в (3.14) приводит к следующему алгоритму принятия решения:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \gamma(1, k, l) \quad *V_l) \quad (3.45)$$

$$\sum_{l=1}^L \quad *V_x)$$

Синтезированный субоптимальный алгоритм обнаружения контролируемого объекта путем комплексирования двух датчиков реализуется в виде многоканального устройства, структурная схема которого представлена на рис.3.3. Это устройство выносит решение о наличии объекта ( $\lambda=1$ ), если сумма функционалов  $\gamma(1, k, l)$ , вычисленных по всем возможным значениям  $k, l$ , превышает порог  $KL \ln \frac{P(\lambda=1)}{P(\lambda=0)}$ , и решение об отсутствии объекта - если эта сумма порога не превышает.

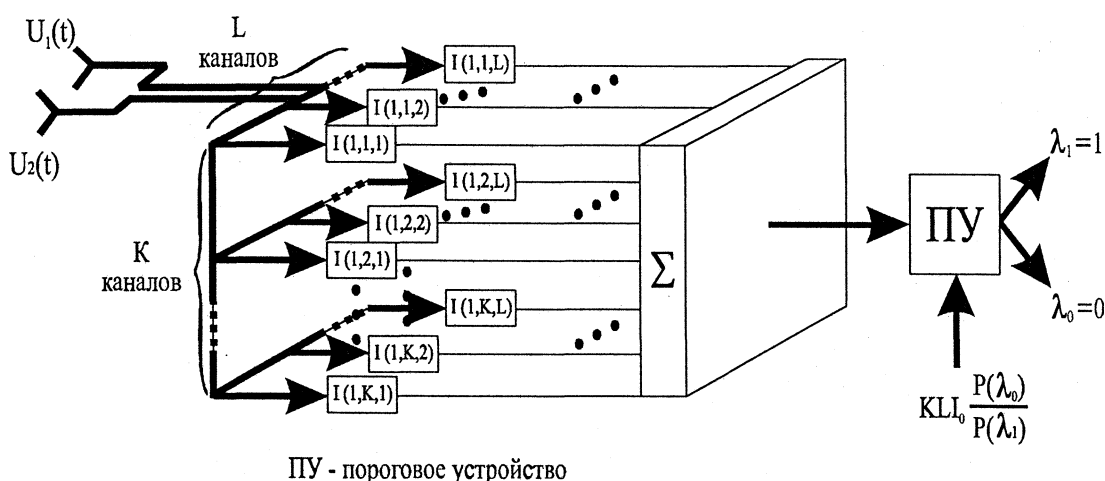


Рис.3.3. Многоканальное субоптимальное устройство распознавания колёсных пар

Многоканальность этого устройства может явиться препятствием для его реализации. Поэтому целесообразно изыскать способ сокращения каналов и синтезировать соответствующий обнаружитель. Следует

оценить качественные характеристики устройств, синтезированных в рамках этого подхода, и сравнить их с качественными характеристиками оптимального обнаружителя. Для этого рассмотрим упрощенную модель, использование которой позволит уменьшить количество каналов до одного ценой определенного снижения достоверности обнаружения.

Положим в (3.20) и (3.21), что полезный компонент сигнала носит не импульсный характер, а характер некоторого постоянного уровня. Для этого примем, что  $s_x(f) = s_x$ ,  $s_2(t) = s_2$ . Потребуем, чтобы при такой замене энергия  $E_i$ , ( $i = 1, 2$ ) каждого из полезных компонентов, рассчитанная на интервале наблюдения при  $m_i = 1$ , осталась прежней. С учетом этого требования, а также на основании (3.32) и (3.33) получаем

$$E_i = \int_0^{T_{ii}} p^2 dt = s^2 T, \quad (3.45)$$

откуда

$$s_i = \sqrt{E_i / T_{ii}}, \quad i=1, 2. \quad (3.46)$$

С учетом сделанных допущений модель наблюдаемых процессов имеет вид

$$u_x(f) = X - a_x s_x + n_x(f), \quad (3.47)$$

$$u_2(t) = A T n_A - a_x s_2 + n_2(t), \quad (3.48)$$

где все параметры, за исключением  $s_2$ , имеют те же характеристики, что и в предыдущих подразделах. Следовательно, в рамках принятой модели (3.47), (3.48) вектор  $f_j$  несущественных параметров вырожден в скаляр  $a_x$ . Поэтому выражение (3.31) для функции правдоподобия приобретает вид

$$p(u_x, u_2 | X) = C_{NU} \int_{a_{2min}}^{a_{1max}} \exp\{ \dots \} da_x \quad (3.49)$$

(3.50)

$$4_2(2, \dots) = \frac{2Jl - m, a_x s_2 \dots}{N_{02} \dots} \int u_2(t) dt, \quad (3.51)$$

$$P_s(2 > \dots) \sim \frac{J^2 a^2 s^2}{N_{01}} \frac{J^2 a^2 \delta_x T}{N_{01}} \quad (3.52)$$

$$\frac{J^2 m^2 a^2 \delta^2 T}{\dots} \quad (3.53)$$

Подстановка выражений (3.50) - (3.53) в (3.49) дает

$$p(u_x, u_2 | J) = C_{NU} \int_{a_{2min}}^{a_{1max}} p(a_x) \cdot \exp\{ \dots \} da_x, \quad (3.54)$$

где

$$M(2) = \frac{J^2 z^2 T \dots J^2 m^2 \delta^2 T}{\dots} \quad (3.55)$$

$$2(2) = \frac{1}{N_{01} \dots} \int u_x(t) dt + \frac{2J \dots}{4-2} \int u_2(t) dt = \quad (3.56)$$

(3.57)

(3-58)

Для плотности вероятности  $p(a_x)$ , заданной выражением (3.22), интеграл, входящий в (3.54), уже был найден в предыдущем подразделе (см. (3.41)). В итоге получаем

$$p(P, w_2 / 2) = C_{NU} \cdot I(J),$$

где

$$I(2) = \frac{e^{-1}}{\sqrt{2\pi}} \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{M(\lambda)}} d\lambda$$

$$-erf \left| \frac{I - QW + \dots}{\dots} \right|, \quad (3.59)$$

$erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$  - интеграл вероятностей.

Отметим, что при  $2=0$  (т.е. в отсутствие контролируемого объекта)  $I(0)=I_0$ , где  $I_0$  определяется соотношением (3.42).

Теперь отношение правдоподобия имеет вид

$$p(u_x, u_2 / h_f) \quad (3.1)$$

и алгоритм (3.14) принятия решения выглядит так

$$\begin{aligned} \gamma(1) &< \gamma_0 \cdot P(J_0) / P(J_X), \\ \gamma(1) &> \gamma_0 \cdot P(J_0) / P(J_X). \end{aligned} \quad (3.60)$$

Соответствующая ему структурная схема обнаружителя, в котором  $2(2)$  вычисляется в соответствии с (3.56), приведена на рис.3.4.

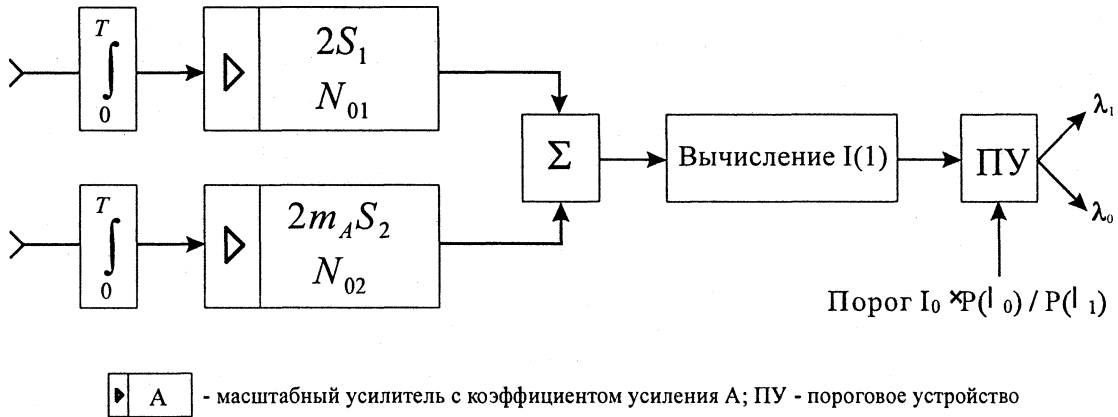


Рис.3.4. Одноканальное субоптимальное устройство распознавания колёсных пар

Использование (3.57) приводит к иной структурной схеме (рис.3.5). В этих устройствах вектор  $\dot{y} = [w](f)u_2(z)]^T$  обрабатывается одним процессорным каналом, в отличие от устройства, изображенного на рис. 3.4.

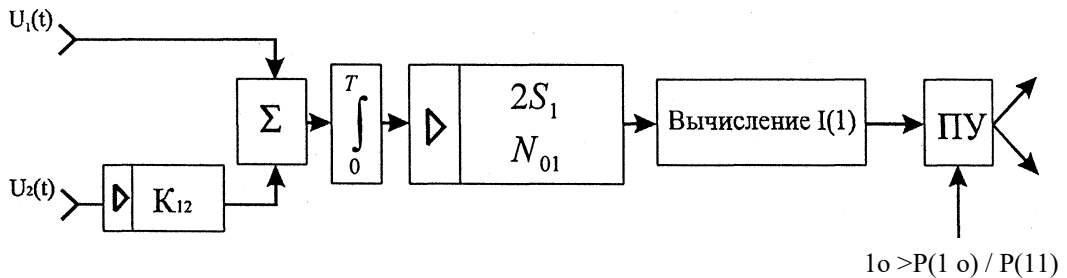


Рис.3.5. Устройство распознавания колёсных пар с одним процессорным каналом

Наиболее сложным узлом обоих устройств (рис. 3.4, рис. 3.5) является блок вычисления величины  $I(1)$ . Особенно сложна реализация устройства вычисления интеграла вероятностей как средствами цифровой схемотехники [7], так и средствами аналоговой схемотехники, даже с использованием различных аппроксимаций [90,150], так как в последних используются операции вычисления квадратичной экспоненты и

квадратного корня, реализация которых средствами обеих схмотехник сложна сама по себе [60,126,151]. Существенного упрощения блока вычисления величины  $I(1)$  можно достичь, если предположить, что значения амплитуды  $a_x$  полезного компонента достаточно тесно сгруппированы вокруг величины её математического ожидания, в результате чего пределы интегрирования в (3.49) можно заменить на бесконечные. Поскольку  $\text{erf}(\infty) = 1$ , а  $\text{erf}(-\infty) = -1$ , то (3.42) и (3.59) приобретут соответственно вид

$$(3.61)$$

$$(3.62)$$

Так как  $\ln x$ - монотонная функция  $x$ , то при логарифмировании обеих частей неравенства (3.60) не будут нарушены. Выполнив логарифмирование с учетом (3.61), получим

$$\ln \frac{P(1)}{P(2)} >< \ln \left[ \frac{P(1)}{P(2)} \right] \quad (3.63)$$

(знак “><” служит символом наличия обоих неравенств).

Обозначив множитель при второй экспоненте выражения (3.62) как  $W$ , придем, в соответствии с (3.63), к неравенству

$$2(1) + \frac{-2\gamma}{\dots} >< 4 M(1) + \dots \quad P(L) \quad (3.64)$$

где

$$a^l \quad 1 \quad \ln \frac{L}{(1)} + \frac{1}{2\sigma_{\Delta 1}} \quad (3.65)$$

Для краткости записей присвоим правой части соотношения (3.64) обозначение  $Z$ . Тогда алгоритм принятия решения приобретет вид

$$(3.66)$$

а структурные схемы обнаружителей, приведенные на рис. 3.4 и рис.3.5, трансформируются в структурные схемы, приведенные соответственно на рис. 3.6 и рис. 3.7. Для построения устройств, реализующих эти структурные схемы, достаточно использовать только масштабные усилители, сумматоры, интеграторы и блоки возведения в квадрат. Такие узлы достаточно просто реализуются средствами как аналоговой, так и цифровой схемотехники [60,104,126,151 ].

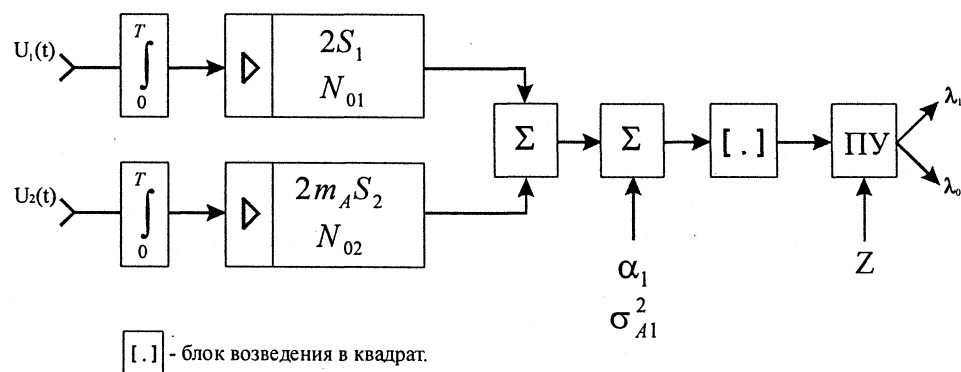


Рис.3.6. Устройство, реализующее субоптимальный алгоритм распознавания колёсных пар

Отметим, что алгоритм (3.66), реализуемый представленными на рис. 3.6 и рис.3.7 обнаружителями, позволяет, в отличие от алгоритма (3.60) и предшествующих ему, получить в аналитическом виде характеристики качества обнаружения.

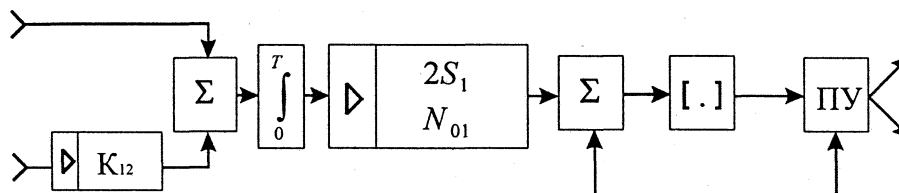


Рис.3.7. Аналоговое устройство распознавания колёсных пар

### 3.3 Методика расчета вероятности ошибки обнаружения колесных пар

Для расчета характеристик качества обнаружения необходимо знание вероятностных характеристик случайной величины

$(o A = 2(1) + \overset{-2}{L O'ли}$  при наличии полезного сигнала и в его отсутствие. При

этом первым этапом решения задачи является определение вероятностных характеристик случайной величины  $0(1)$ . В соответствии с (3.57)

01 o

Поскольку при любом значении  $t$  величины  $Щ$  ( $\Gamma$ ) и  $u_2$  ( $0$  по условию являются гауссовскими, то и  $0(1)$  как их линейное преобразование тоже гауссовская случайная величина. Значит, для полного задания закона ее распределения достаточно найти ее математическое ожидание и дисперсию.

Математическое ожидание находится как

$$E_{01} = \mathcal{E}\{e(1)\} = A_{01}^+ \wedge_{2-} \mathcal{E}\{\langle_2Ю\} \} \mathcal{L}, \quad (3.67)$$

где  $E\{.\}$  - операция нахождения математического ожидания.

Дисперсия находится с помощью известного соотношения

$$D_{Q_1} = E\{[Q^2(1) - E_{Q_1}]^2\} = \Phi^2(0) \quad (3.68)$$

Здесь

$$E\{Q^2(1)\} = \left(\frac{2s_1}{N_{01}}\right)^2 \cdot E\left\{\left[\int_0^T [u_1(t) + K_{12} \cdot u_2(t)] dt\right]^2\right\}.$$

Выразив квадрат простого интеграла через двойной интеграл, придем к выражению

$$\begin{aligned} \Phi^2(1) &= 2 \int_0^T \int_0^T E\{u_1(x) u_1(y)\} dx dy + K_{12}^2 \int_0^T \int_0^T E\{u_2(x) u_2(y)\} dx dy + \\ &+ 2K_{12} \int_0^T \int_0^T E\{u_1(x) u_2(y)\} dx dy + K_{12}^2 \int_0^T \int_0^T E\{u_2(x) u_2(y)\} dx dy \end{aligned} \quad (3.69)$$

Определим  $E_{Q_1}$  и  $D_{Q_1}$  при наличии полезных компонентов в наблюдаемых процессах. Сначала подставим (3.47) и (3.48) в (3.67), положив  $2 = 1$

$$\begin{aligned} E_{Q_1} &= \frac{2s_1}{N_{01}} \int_0^T \int_0^T E\{a_x\} + K_{12} \int_0^T \int_0^T E\{a_x\} dx dy \\ &= \frac{2s_1}{N_{01}} \int_0^T \int_0^T E\{a_x\} + K_{12} \int_0^T \int_0^T E\{a_x\} dx dy \end{aligned} \quad (3.70)$$

Теперь, положив в (3.47) и (3.48)  $2=1$ , найдем слагаемые  $B_{jk}$ , входящие в выражение (3.69).

$$\begin{aligned}
 B_{xx} = & \int_{00}^{mm} + n_x(x) [a_1 s^2] = \int_{00}^{mm} |E\{s^2\} - s^2| dx dy + \\
 & + \int_{00}^{mm} E\{n_x(y)\} \cdot E\{n_x(x)\} dx dy + \int_{00}^{mm} E\{n_x(x)\} \cdot E\{n_x(y)\} dx dy + \\
 & + \int_{00}^{mm} E\{n_x(x)\} \cdot E\{n_x(y)\} dx dy .
 \end{aligned}$$

Поскольку математическое ожидание помехового компонента равно нулю, то

$$B_{xx} = E\{a^2 p^2 T^2 + \int_{00}^{mm} E\{n_x(y)\} \cdot E\{n_x(x)\} dx dy\} \tag{3-71}$$

Подынтегральное выражение  $E\{n_x(y)\} \cdot E\{n_x(x)\}$  представляет собой корреляционную функцию помехового компонента первого наблюдаемого процесса. Принятой нами модели спектральной плотности мощности помехи, как показано в [136], соответствует корреляционная функция помехи

$$E\{n_x(x) \cdot n_x(y)\} = N_{ox} \cdot F \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \sin[2\pi F(x-y)] \dots = p(x-y).$$

Поэтому второе слагаемое выражения (3.71) приобретает вид

$$\int_{00}^{mm} \int_{00}^{mm} E\{n_x(y)\} \cdot E\{n_x(x)\} dx dy$$

В предположении, что  $F \cdot T \gg 1$ , данное выражение может быть упрощено [155] и записано как

$$N_{ox} F T \int_{-\infty}^{\infty} \dots$$

Интеграл является табличным [146]; в итоге получаем

$$B_{11} = \int_0^2 \int_0^2 s^2 \tau^2 + \dots \quad (3.72)$$

Слагаемое  $B_n$  выражения (3.69) имеет вид

$$B_{12} = \int_0^2 \int_0^2 +I_1(x) \cdot [I_1(x) + I_2(y)] dx dy,$$

откуда с учетом взаимной независимости помеховых компонентов следует

$$B_{12} = -E\{a^2\} \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot T^2. \quad (3.73)$$

Далее нетрудно видеть, что

$$B_{21} = B_{12}. \quad (3.74)$$

Наконец,

$$B_{22} = \int_0^2 \int_0^2 +n_2(x) \cdot [m_1 a^2 + n_2(y)] dx dy.$$

Выкладки, аналогичные проведенным при расчете  $B_{11}$ , дают

$$B_{22} = (\kappa_{12} - m_1 a^2 - \Gamma)^2 \cdot \int_0^2 n_2^2(y) dy + \quad (3.75)$$

Для нахождения величины  $E\{a^2\}$ , входящей в соотношение (3.72) - (3.75), используем известную [141] связь между вторым начальным моментом случайной величины, ее математическим ожиданием и дисперсией

$$= a^2 + \sigma^2.$$

С учетом этого соотношения, подстановка выражений (3.72) - (3.73) в (3.69) дает

$$f\{e^1(1)H, (s, K, \sigma_{A1}^2, m_{A1}^{\wedge})\} = \frac{1}{\sigma_{A1}^2} \exp\left\{-\frac{(Q - E_{Q1})^2}{2\sigma_{A1}^2}\right\} \quad (3.74)$$

Подставив это выражение, а также выражение (3.70) в соотношение (3.68), окончательно получим

$$D_{Q1} = \left(\frac{2s_1}{N_{01}}\right)^2 \left\{ \sigma_{A1}^2 + T^2(s, K, m_{A1}^{\wedge})^2 \right\} \quad (3.76)$$

Итак, плотность вероятности случайной величины  $Q = 2(1)$  есть

$$P(Q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{Q1}}} \cdot \exp\left\{-\frac{(Q - E_{Q1})^2}{2D_{Q1}}\right\}$$

Плотность вероятности случайной величины  $Q_A = Q(Y) + \text{полу-}$   
& A1  
чается из предыдущей путем ее смещения на  $a_j / cr^2_{A1}$  в сторону больших значений

$$\frac{1}{D_{QX}} \cdot \exp\left\{-\frac{\left(Q_A - E_{Q1} - \frac{\alpha_1}{\sigma_{A1}^2}\right)^2}{2D_{Q1}}\right\}$$

Введя обозначения  $D_{QA} = D_{\&}$  и

$$\frac{1}{D_{QA}} = \frac{1}{D_{Q1}} + \frac{\alpha_1^2}{\sigma_{A1}^4} \quad (3.77)$$

получим

$$m) = -j = \hat{=} - \exp \frac{(Q_A E_{QA})}{2 D_{QA}} \quad (3.78)$$

Как уже было отмечено, нас интересует закон распределения случайной величины  $o_A = Q_A$ . Известно [8], что для  $p(Q_A) >$  описываемой выражением (3.78), этот закон имеет вид

$$P\{o_A\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} D_{QA}} \exp\left\{-\frac{o_A^2}{2 D_{QA}^2}\right\} \quad (3.79)$$

Данное выражение позволит рассчитать условную вероятность правильного обнаружения объекта

$$D_{ю} = \int_z^{\infty} p(p > A) da \quad (3.80)$$

где Z- порог (см. (3.66)).

Теперь определим  $E_{QX}$  и  $D_{QX}$  в отсутствие полезных компонентов в наблюдаемых процессах, т.е. при  $u_x(t) = n_x(t)$ ,  $m_2(\Gamma) = m_2(\Gamma)$ . В этом случае из (3.67) с очевидностью следует, что  $E_{ex} = 0$ , поэтому, согласно (3.68), дисперсия есть  $D_{Ql} = E\{2^2(1)\}$ . Расчет величины  $E\{2^2(1)\}$  в соответствии с выражением (3.69) приводит к следующим результатам:

$$\bullet \textcircled{R}12 \sim -\textcircled{R}21 - 0'$$

$$\gg \frac{\Gamma-2 \wedge 02?}{22 - \wedge 2} \quad 2$$

В итоге имеем

$$Z)gi \text{---} D_{QN} \text{---} 0,5 \frac{T_i}{\dots} \left( \frac{N + K^2 N}{\dots} \right) \quad (3.81)$$

а плотность вероятности случайной величины  $Q_N = 2(1) +$  равна

$$P_{III} = \frac{1}{D_{Q_N}} \left| -\frac{(Q_N - E_{Q_N})^2}{2D_{Q_N}} \right|$$

где  $E_{Q_N} = a_x/c_{AX}$

Нас интересует плотность вероятности величины  $co_N = Q_N^2$ . Аналогично тому, как это было сделано для  $co_A$ , получаем

$$X^{(N)} = \frac{1}{D_{Q_N}^{>N}} \cdot \exp\left\{ -\frac{A + \wedge_{QN}}{2D_{Q_N}} \cdot ch\left( \frac{E_{Q_N} \sqrt{\omega_N}}{D_{Q_N}} \right) \right\}$$

Данное выражение позволит рассчитать условную вероятность ложной тревоги, т.е. вероятность принятия решения о наличии объекта тогда, когда на самом деле его нет

$$P_{\Gamma} = \frac{J_P(\otimes JV)^{\wedge JV}}{Z} \cdot \quad (3.84)$$

Перейдем к расчету вероятности правильного обнаружения. Подстановка (3.79) в (3.80) дает

$$P_{\Pi O} = \frac{e^{-\frac{E_{Q_A}^2}{2D_{Q_A}}}}{\sqrt{2\pi D_{Q_A}}} \int_z^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\omega_A}} e^{-\frac{\omega_A}{2D_{Q_A}}} \cdot ch\left( \frac{E_{Q_A} \sqrt{\omega_A}}{D_{Q_A}} \right) d\omega \quad (3.85)$$

Введем в подынтегральном выражении обозначения

$$\frac{1}{2D_{Q_A}} \cdot \frac{\wedge_{QA}}{\wedge_{QA}} \quad \text{введем также новую переменную интегрирования}$$

$x = 4\otimes_A$  и учтем, что  $ch y = 0,5(e^y + e^{-y})$ . В итоге входящий в (3.85) интеграл преобразуется к виду

$$I = \int_{jz} e^{-(px^2 - qx)} dx + Jz$$

Оба эти интеграла являются табличными [146] и дают

$$I = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{p}} e^{\frac{q^2}{4p}} \left[ 2 - \operatorname{erf} \left( \sqrt{pZ} - \frac{q}{2\sqrt{p}} \right) - \operatorname{erf} \left( \sqrt{pZ} + \frac{q}{2\sqrt{p}} \right) \right]$$

Возврат к выражению (3.85) с одновременной обратной подстановкой сокращенно обозначенных констант дает

$$P_{\text{по}} = 1 - 0,5 \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{E_{QA}}{\sqrt{2D_{QA}}} \right) + \operatorname{erf} \left( \frac{E_{QA}}{\sqrt{2D_{QA}}} \right) \right] \quad (3.86)$$

Аналогичным образом выполненный на базе соотношений (3.83) и (3.84) расчет вероятности ложной тревоги дает

$$P_{\text{лт}} = 1 - 0,5 \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{\sqrt{Z} - E_{QN}}{\sqrt{2D_{QN}}} \right) + \operatorname{erf} \left( \frac{\sqrt{Z} + E_{QN}}{\sqrt{2D_{QN}}} \right) \right] \quad (3.87)$$

Для лучшей интерпретируемости полученных результатов представим входящие в них выражения как функции вероятностных и энергетических параметров наблюдаемых процессов. С этой целью введем такие параметры:

1) отношение энергии среднестатистического значения полезного компонента первого наблюдаемого процесса к спектральной плотности мощности помехового компонента этого процесса

$$\langle II \rangle = \frac{2.2 \text{ м}}{N} \quad (3.88)$$

2) аналитическое отношение для второго наблюдаемого процесса

$$\frac{2}{\sqrt{N}} \frac{m A^2 \sigma^2}{\dots} \quad (3.89)$$

3) параметр группирования плотности вероятности амплитуды (3.22)

$$L = a_1 / \langle \tau_{пл} \rangle \quad (3.90)$$

Подставим полученные ранее выражения для  $E_{QA}$ ,  $E_{QN}$ ,  $D_{QA}$  и  $D_{QN}$  в аргументы функции ошибок, входящей в состав выражений (3.86) и (3.87), и преобразуем эти аргументы с учетом вновь введенных параметров (3.88) - (3.90). Опустив не имеющие самостоятельной ценности громоздкие промежуточные выкладки, запишем их результаты:

$$\frac{\sqrt{Z} - E_{QA}}{\sqrt{2D_{QA}}} = \frac{\alpha_1 \sqrt{Z} - 2(q_1^2 + q_2^2) - A^2}{\frac{1}{A} \sqrt{8(q_1^2 + q_2^2)^2 + 4A^2(q_1^2 + q_2^2)}} \quad (3.91)$$

$$\frac{\sqrt{Z} + E_{QA}}{\sqrt{2D_{QA}}} = \frac{\alpha_1 \sqrt{Z} + 2(q_1^2 + q_2^2) + A^2}{\frac{1}{A} \sqrt{8(q_1^2 + q_2^2)^2 + 4A^2(q_1^2 + q_2^2)}} \quad (3.92)$$

$$\frac{\sqrt{Z} - E_{QN}}{\sqrt{2D_{QN}}} = \frac{\alpha_1 \sqrt{Z} - A^2}{2\sqrt{q_1^2 + q_2^2}}; \quad (3.93)$$

$$\frac{\sqrt{Z} + E_{QN}}{\sqrt{2D_{QN}}} = \frac{\alpha_1 \sqrt{Z} + A^2}{2\sqrt{q_1^2 + q_2^2}}; \quad (3.94)$$

$$\alpha_1 \sqrt{Z} = 2\sqrt{q_1^2 + q_2^2 + \frac{A^2}{2}} \cdot \sqrt{\ln \frac{P(\lambda_0)}{P(\lambda_1)} - \ln \left[ \frac{A \cdot e^{-\frac{A^2}{2}}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{q_1^2 + q_2^2 + \frac{A^2}{2}}} \right]} \quad (3.95)$$

Из этих пяти выражений с очевидностью следует, что функции ошибок, входящие в выражения (3.86) и (3.87), а значит, и вероятности  $P_{по}$  и  $P_{лт}$ , зависят даже не от энергетике сигнала и помехи в рамках отдельного наблюдаемого процесса, а зависят от обобщенного энергетического параметра

$$P_{12}^2 \sim \frac{2}{q_{12}^2 + A^2} \quad (3.96)$$

В результате этого

$$(3.97)$$

$$P_{ЛГ} = 1 - 0,5 \left[ \frac{\sqrt{Z} + A^2}{2q_{12}} \right] \quad (3.98)$$

где

$$\sqrt{Z} = 2 \sqrt{q_{12}^2 + \frac{A^2}{2}} \cdot \sqrt{\ln \frac{P(\lambda_0)}{P(\lambda_1)} - \ln \left[ \frac{Ae^{-\frac{A^2}{2}}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{q_{12}^2 + \frac{A^2}{2}}} \right]} \quad (3.99)$$

Последнее выражение позволяет по известным априорным вероятностям наличия и отсутствия объекта, по вероятностным характеристикам полезного компонента и по его энергетическим характеристикам полезных и помеховых компонентов вычислить величину порогового уровня  $Z$ , используемого в обнаружителях, структурные схемы которых приведены на рис. 3.6 и рис. 3.7:

$$\frac{\hat{A} - Aa}{F P_{ЛГ} \cdot n} \quad (3.100)$$

Для определения границ применимости соотношений (3.97) - (3.100) вспомним, что в процессе синтеза описываемых ими обнаружителей было сделано допущение, что “значения амплитуды  $a_x$  полезного

компонента достаточно тесно сгруппированы вокруг величины  $a_x$  ее математического ожидания”. Поскольку  $a_x$  распределена по гауссовскому закону, то в качестве условия тесноты группирования можно использовать неравенство  $3\sigma_{AX} < a_x$ , откуда следует, что соотношения (3.97) - (3.100) применимы, если

$$A = \frac{a_x}{3\sigma_{AX}} > 1.$$

Теперь перейдем к расчету характеристик качества обнаружения. Зададимся двумя вопросами:

- 1) если объект действительно находится в зоне наблюдения, то с какой вероятностью он будет обнаружен?
- 2) с какой вероятностью обнаружитель допускает ошибки?

Ответом на первый вопрос служит величина  $P_{по}$ . Для ответа на второй вопрос конкретизируем понятие “ошибка” применительно к нашему случаю. Очевидно, что могут иметь место два варианта ошибки - принятие решения об отсутствии объекта, когда в действительности он есть (ситуация “пропуск цели”) и ситуация “ложная тревога”. В качестве числовой характеристики ошибок удобно принять среднюю вероятность ошибок [136]

$$P_{ош} = (1 - P_{по}) \cdot L_{л0} + P_{по} \cdot L_{л1} \quad (3-101)$$

В данном выражении величина  $1 - P_{по} = P_{ни}$  как раз и равна условной вероятности пропуска цели [157]. На основе соотношений (3.97) - (3.99) и (3.101) были построены зависимости  $P_{по} = f(A, P(A_0), P(L_X))$  и  $P_{ош} = f(A, P(A_0), P(L_X))$  при заданных значениях  $P(A_0), P(L_X)$  и  $A$ , приведенные в приложении А.

Анализ представленных в приложении А результатов позволяет сделать следующие выводы:

1) если считать значимыми различия величин вероятностей, превышающие  $10^3$ , то следует признать, что при  $q^2 < 320$  характеристики обнаружения в значительной степени зависят от априорных вероятностей наличия и отсутствия объекта;

2) рост параметра группирования А ведет к повышению качества обнаружения;

3) с ростом величины  $q_{22}$  влияние априорной информации (о величинах А,  $P(2_0)$  и  $P(2)$ ) на характеристики обнаружения становится все менее существенным;

4) при большой величине РСЛ) большое значение вероятности правильного обнаружения достижимо даже при малых значениях  $q^2$  и А, однако при этом величина  $P_{\text{ош ср}}$  может являться недопустимо большой для ряда практических приложений.

Если интерпретировать обнаруживаемый объект как единичный импульс, принадлежащий некоторому двоичному коду конечной длины, нанесенному на некоторый неидеальный, с точки зрения помех, носитель, то на основании результатов, приведенных в приложении А, можно заключить следующее: если заданы допустимое минимальное значение  $P_{\text{по min}}$  и максимальное значение  $P_{\text{ош ср тах}}$ , то, варьируя вид и длину кода (т.е. величины  $P(L_0)$  и  $L/C$ ) и вид носителя (т.е. величину А и достижимое значение  $q_{12}$ ), можно оптимизировать как требования к коду, так и требования к характеристикам носителя кода, а отсюда - и к аппаратуре устройства обнаружения.

Полномасштабная оценка выигрыша в качестве обнаружения за счет исследуемого нами комплексирования по входам по сравнению с

обнаружением сигнала по результатам наблюдения одного процесса в настоящее время представляется затруднительной не только для общего случая, но даже и в рамках принятой нами модели сигналов и помех. Причина состоит в том, что к настоящему времени в литературе исследована эффективность обнаружения прежде всего для рэлеевских флуктуаций амплитуды, характерных для радиосигналов (см., например, книги [149,155]), либо выкладки не доведены до конца, как это сделано в работе [23], в которой вероятность ошибок не усреднена по амплитуде. Тем не менее, определенное сопоставление результатов выполнить можно. Учитывая, что для рассчитанных в настоящей работе зависимостей случай  $A=24$  близок к ситуации приема сигнала с полностью известными параметрами, можно сравнить  $P_{ош\text{ср}}$  при  $P(2_0) = P(\text{Л}) = 0,5$  и  $A=24$  с аналогичной вероятностью для случая известной амплитуды и равных априорных вероятностей наличия и отсутствия объекта, рассчитанной в [23]. Соответствующие кривые приведены на рис. 3.8 [109].

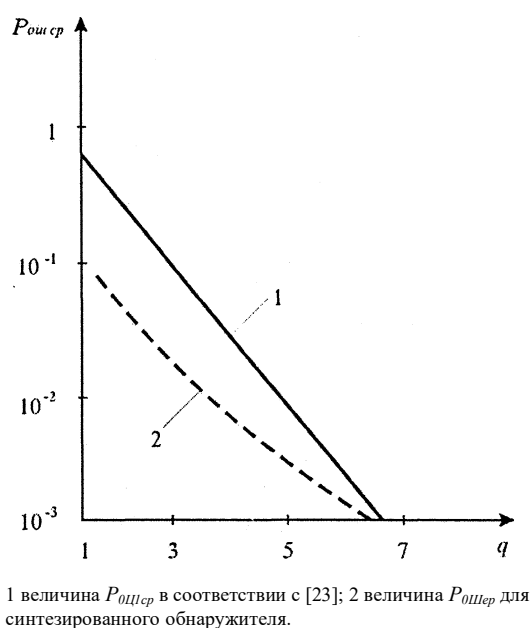


Рис.3.8. Сравнительные характеристики качества обнаружения объектов

При построении кривой 2 полагалось, что величины  $q_x$  и  $q_2$ , задаваемые соотношениями (3.88) и (3.89), одинаковы и равны энергетическому отношению “сигнал/шум”  $q$  для обнаружителя, рассмотренного в работе [23], вследствие чего  $q^2_2 = 2q^2$ . Рис. 3.8 иллюстрирует преимущество синтезированного в настоящей работе обнаружителя (рис. 3.6 и рис. 3.7).

Рассмотренные выше устройства распознавания колёсных пар вагонов реализуют функцию комплексирования принимаемых сигналов по входам. Рассмотрим возможность построения данных обнаружителей, осуществляющих комплексирование по выходам, и сравним полученные результаты. Как уже было отмечено в разделе 3.1., при таком комплексировании обнаружителей полезные компоненты наблюдаемых процессов  $u_x(t)$  и  $u_2(f)$  идентифицируются порознь в отдельных процессорных каналах, а окончательное решение о наличии (Яюбщ<sup>-1</sup>) или об отсутствии (Любш<sup>=0</sup>) контролируемого объекта выносится путем объединения канальных решений  $L_y$  и  $L_{0i}$ , где  $i=1,2$  - номер канала.

Для синтеза структуры  $i$ -го канального процессора, обрабатывающего только  $i$ -й наблюдаемый процесс, нет необходимости заново проделывать все выкладки: синтез можно провести на основе полученных ранее результатов для комплексирования по входам.

Сначала оценим возможность синтеза и реализации канального процессора на основе “строгой” модели (3.20), (3.21), (3.32), (3.33) наблюдаемых процессов, если положить, что наблюдается только один из них:

$$u(t) = L \cdot a \cdot s(m_i, t_n, t) + n(f),$$

где  $u(f) = u_x(t)$  или  $w_2(f)$ ;

$$z = 1;$$

$$z = 2;$$

$$a = \begin{cases} a_1 & z = 1; \\ \text{ИВД,} & z = 2. \end{cases}$$

Указанное условие ведет к тому, что в (3.26)  $//_{н2} = 0$  и что согласно (3.28)  $q_2(A, jj) = 0$ . Это приводит к упрощению вида выражения (3.39) для  $M(L, k)$  и выражения (3.40) для  $Q(A, k, l)$ . Однако вид формулы (3.41) для  $I(L, k, l)$  не изменится, поэтому не изменится и алгоритм обнаружения (3.45), а в соответствующем ему устройстве (рис. 3.3) останется только один входной сигнал, в остальном же схема не изменится, оставшись многоканальной. Поэтому вывод о затруднительности ее реализации по-прежнему остается в силе.

Следовательно, вновь возникает необходимость перехода к модели (3.47)-(3.48) при условии наличия только одного наблюдаемого процесса. В результате получаем из (3.55) и (3.56) соответственно

$$4(I) = \frac{1}{N_o}; \quad (3.102)$$

$$= \frac{1}{\wedge 0_o} \quad (3.103)$$

Здесь  $\Gamma(\Gamma) = u_e(\Gamma)$  или  $u_2(?)$ ;  $N_o = N_{ox}$  или  $N_{02}$ ;

$$\left. \begin{array}{l} 5], i = 1; \\ m_{\Delta s_i}, i = 2; \end{array} \right\} \quad (3.104)$$

где величины  $s_i$  определяются соотношением (3.46).

Формулы (3.61) и (3.62) для  $\gamma(2)$  сохраняют свой вид (с учетом того, что  $L/(2)$  и  $Q(A)$  определены по-новому), формулы (3.62), (3.65) и алгоритм (3.66) также сохраняют свой вид, а структурные схемы, изображенные на рис.3.6 и рис.3.7, преобразуются каждая в одну и ту же схему канального процессора, изображенную на рис.3.9.

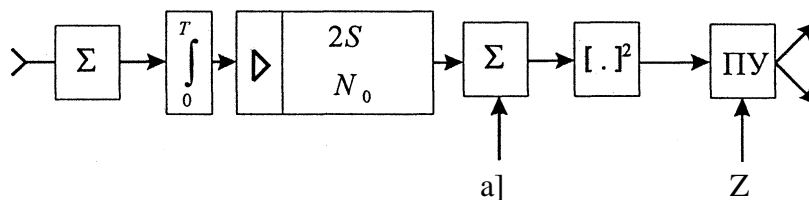


Рис.3.9. Структурная схема канального процессора

Рассчитаем характеристики качества обнаружения каждого канального процессора. Сразу же отметим, что, поскольку  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$  - гауссовские случайные процессы, то  $Q(X)$ , задаваемая выражением (3.102) при  $X=1$ , - гауссовская случайная величина. Поэтому все выкладки, приведшие к формуле (3.86) для  $P_{по}$  и формуле (3.87) для  $P_{лт}$ , остаются справедливыми. При этом в выражениях (3.91)-(3.95) для аргументов функций ошибок следует заменить  $q^*_{22}$  на

2

2 ГП

(3.105)

В остальном же процедура расчета вероятности обнаружения для отдельно взятого канального процессора остается той же, что и для процессора в целом при комплексировании по входам.

Существенно важным является вопрос зависимости качества обнаружения от способа объединения выходных сигналов канальных процессоров. Поскольку речь идет об объединении двух логических сигналов, то возможны два варианта такого объединения:

- 1) логическая операция ИЛИ (OR, логическое сложение);
- 2) логическая операция И (AND, логическое перемножение).

При этом структурная схема процессора, реализующего комплексирование по выходам, имеет вид, представленный на рис. 3.10.

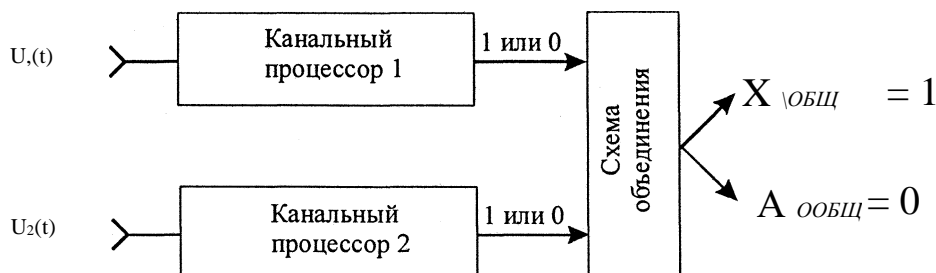


Рис. 3.10. Структурная схема процессора, реализующего комплексирование по выходам

Сначала рассмотрим первый из вариантов объединения. Обозначим как  $(\kappa^* / 2;)$  событие, заключающееся в том, что  $i$ -м ( $z=1,2$ ) каналным процессором выносится решение ( $\kappa = 0,1$ ) при том, что истинное значение параметра  $A$ , есть  $z$ , ( $z = 0,1$ ). Очевидно, что при объединении каналов выходов каналных процессоров путем логического сложения событие “Правильное обнаружение” считается состоявшимся, если состоялось хотя бы одно из событий  $(1/1)$  и  $(2/1)_2$ . Учитывая, что каждый каналный процессор выносит свое решение независимо (т.к. по условию независимы помехи в каналах), и применяя к двум рассматриваемым событиям теорему сложения вероятностей [141], получаем

$$\begin{aligned}
 P_{\text{А}} &= P_{(1/1)} + P_{(2/1)_2} - P_{(1/1)} \cdot P_{(2/1)_2} = \\
 &= P_{m1} + P_{m2} - P_{m1} P_{m2}
 \end{aligned} \tag{3.106}$$

где  $P_{noj}$  - вероятность правильного обнаружения в  $i$ -м канале ( $i=1,2$ ).

Событие “Ложная тревога” считается состоявшимся, если состоялось хотя бы одно из событий  $(2/0)_1$  и  $(2/0)_2$ . Аналогично правильному обнаружению имеем

$$P^{(oR)} = P_{mX} + P_{m2} - P_{mJ} >_{m2}, \quad (3.107)$$

где  $P_{лтi}$  - вероятность ложной тревоги в  $i$ -м канале ( $i=1,2$ ).

Величина средней вероятности ошибок не зависит от способа объединения выходов канальных процессоров и по-прежнему рассчитывается по формуле (3.101). Для объединения выходов путем логического сложения обозначим ее как  $P_{,, TM^I}$ .

Теперь рассмотрим второй вариант объединения выходов - путем логического перемножения. Очевидно, что в этом случае событие “Правильное обнаружение” следует считать состоявшимся, если оба события  $(2/2)_1$  и  $(2/2)_2$  состоялись одновременно. Тогда, с учетом независимости принятия решений канальным процессором, имеем

$$P^{\wedge} = P(I/I')_{обч} = P(I/I) \cdot P(I/I)_2 = P_{nm} \cdot P_{пo2}. \quad (3.108)$$

Аналогичным образом вероятность ложной тревоги определяется как

$$P^{\wedge} = P(2/0)_{обч} = P(2/0)_1 \cdot P(2/0)_2 = P_{лт1} \cdot P_{лт2}. \quad (3.109)$$

Величины средней вероятности ошибок  $P^{\wedge}_{cp^I}$  по-прежнему рассчитываются по формуле (3.101).

Выясним, не обладает ли одна из двух рассмотренных схем объединения преимуществами в качестве обнаружения. Для этого ответим на два вопроса.

1. В каком отношении находятся между собой величины  $P^{<OR)}$  и

$p(AND)$  по

Предположим, что  $P^{<A)}$   $> P_{\text{цo}^m}$ . Тогда, на основании (3.106) и (3.108) можно записать, что

$$P_{O1} \quad \text{по2} \cdot \text{по1} \cdot \text{по2} \cdot \text{по1} \cdot \text{по2}$$

или

$$\frac{P_{O1} \cdot P_{O2} \cdot p}{2} \quad P_{O1} \cdot P_{O2}$$

Представим правую часть в виде произведения корней

$$\frac{P_{O1} \cdot P_{O2} \cdot p}{2} \quad \sqrt{P_{O1} \cdot P_{O2} \cdot p}$$

Поскольку среднее арифметическое никогда не превышает среднего геометрического, и каждый из сомножителей в правой части меньше единицы, то последнее неравенство всегда справедливо, и поэтому

$$P^{<R)} > P^{<D)}$$

Аналогичным образом можно доказать, что

$$P^{(OЯ)} \cdot p(AND) \quad (3.111)$$

Оба эти неравенства справедливы при любых условиях.

2. В каком отношении находятся между собой величины  $P^{<A)}$  и

$p(AND)$  Q

$^1 O G).cp$

Предположим, что  $P^{<A)} < P^{<O}p^j$  ■ Тогда, используя (3.101), получаем

$$P(L,)[1 - p^{TM}] + P(L_0) \cdot p \quad < P(L,)[1 - i p_{\text{цo}}] \cdot P^{<TM)} > ,$$

откуда

$$W[-\hat{\Gamma}] < \blacksquare$$

Поскольку, в соответствии с (3.110) и (3.111), величины в квадратных скобках всегда положительны, то

$$\frac{P \langle \hat{P} \rangle^{OR} - P \hat{P}}{P_{TM} P \hat{P}}, \quad (3.112)$$

Подставив в это выражение соотношения (3.106)-(3.109), придем к неравенству

$$\frac{P(M)}{PW} \leq \frac{P + P - 2P}{P + P - 2P \cdot P} \blacksquare P \quad (3.113)$$

При больших величинах энергетического отношения “сигнал/шум”  $q$  в каналах можно считать, что  $P_{\Pi 01} + P_{\Pi 02} \ll 2$ . Кроме того, неравенство только усилится, если заменить в знаменателе величину  $(P_{ЛТ1} + P_{ЛТ2})$  на меньшую (в силу соотношения между средним арифметическим и средним геометрическим) величину  $2\sqrt{P_{ЛТ1} \cdot P_{ЛТ2}}$ . В результате получим, что

$$\frac{P \langle \hat{P} \rangle}{P \hat{P}} < \frac{1 + P_{\Pi 01} + P_{\Pi 02}}{\sqrt{P_{ЛТ1}} \cdot \sqrt{P_{ЛТ2}} (1 \sim y) P \langle T \rangle \blacksquare P \langle Y \rangle}$$

При больших значениях  $q$  вычитаемое в круглых скобках значительно меньше единицы, поэтому с учетом (3.108) и (3.109) имеем

$$P \langle \hat{P} \rangle < M \quad (3.114)$$

Это и есть ответ на второй вопрос, т.е. при больших  $q$  величина  $< P_{o}^{cp} \rangle_{\text{ПРИ}}$  соблюдении условия (3.113). Кроме того, при соблюдении этого условия (при малых и средних величинах  $q$  - условия (3.112), зависящего и от вероятностных характеристик при объединении способом логического сложения) схема ИЛИ оказывается безусловно предпочтительнее схемы И, т.к., согласно (3.110), неравенство  $P^{(OR)} > P^{(D)}$  справедливо всегда. Следовательно, в отсутствие жестких требований к величине  $P_{\text{ош ср}}$  рационально использовать в качестве схемы объединения схему ИЛИ, т.к. она обеспечивает превосходство, как минимум, в величине вероятности правильного обнаружения.

### 3.4. Эталонные характеристики качества обнаружения

Для объективной оценки качества функционирования синтезированных устройств следует сравнить их характеристики обнаружения с характеристиками наилучшего по принятому нами критерию минимума среднего риска (см. раздел 3.1) обнаружителя. В качестве такового, как уже отмечалось в разделе 3.1, можно принять комплексированный по входам обнаружитель, функционирующий в соответствии с алгоритмом (3.14), при полностью известных несущественных параметрах  $a_x, a_2, m_t, t_n$ . При этом условии выражение (3.19) для функции правдоподобия приобретает вид

$$p(u_x, u_2/2) = \dots \cdot e^{91 w+92} \quad (\mathcal{L})_{\wedge(\mathcal{Y})},$$

где  $q_i W$  и  $p_{Sj}(\mathcal{L})$  определяются соответственно выражением (3.17) и (3.18).

При  $\mathcal{Y} = 2_o=0$  имеем  $p(u_x, u_2/\mathcal{Y}_o) = C_{NU}$ , в результате чего алгоритм (3.14) приобретает вид



$$E\{q_c(V)\} = E_{Q_C} \int_0^T \int_0^T -s_i(t) - E\{u_x(t)\} dt + \int_0^T \int_0^T -j a_2 \cdot s_2(t) \cdot E\{u_2(t)\} dt$$

(в записи полезных компонентов наблюдаемых процессов известные несущественные параметры  $m$ , и  $t_n$  опущены). Поскольку  $E\{u(0)\} = \text{ад}(0, \text{то}$

$$E_{Q_C} = \int_0^T \int_0^T \text{pfo}^2 (0 < \# + (W = \int_0^T \int_0^T + \int_0^T \int_0^T = \int_0^T \int_0^T \text{AsI} (1) + \int_0^T \int_0^T \cdot \quad (3.117)$$

Здесь  $3j$  - энергия полезного компонента  $i$ -го наблюдаемого процесса. Поэтому отношение  $\int_0^T \int_0^T / M$  имеет тот же смысл, что и величина  $qf$  (см. (3.88) и (3.89)) и может быть обозначена так же. Тогда

$$E_{Q_C} \sim \int_0^T \int_0^T (1) + \int_0^T \int_0^T \text{As2} (1) \sim \int_0^T \int_0^T (?i ?2) \cdot \quad (3.118)$$

В результате математическое ожидание левой части выражения (3.115) равно

$$E_{QCM} \sim \int_0^T \int_0^T \text{Ns} \int_0^T \int_0^T (1) + \int_0^T \int_0^T \text{S2} (1) - \int_0^T \int_0^T \#2 ,$$

Дисперсия левой части выражения (3.115) равна дисперсии величины  $q_c(X)$

$$E_{QCM} = D\{q_c(1)\} = \int_0^T \int_0^T \{J(1)J - \int_0^T \int_0^T$$

$$\int_0^T \int_0^T \int_0^T \int_0^T u_2 (f) a_2 s_2 (t) dt \left. \right\} +$$

$$= B_{\text{ц}} + B_n + B_{22} E_{Q_C}. \quad (3.119)$$



$$\frac{Mn^3 + J}{2 \Gamma 3}; \quad (3.123)$$

Подставив (3.122) в (3.120), получим

$$B_{\cdot} = 2^{\wedge} + 4^{\wedge}. \quad (3.124)$$

Подстановка соотношений (3.118), (3.120) и (3.124) в (3.119) дает

$$DQCM \sim 2^{(7i + ?2)} \cdot$$

Обозначим

$$\text{я}_{12} = 21^{+?2}. \quad (3.125)$$

Тогда

$$EQCM \sim \text{я}_{12}' \quad (3.126)$$

$$DQCM = 2^{\wedge} \text{я}_{12}, \quad (3.127)$$

Обозначив левую часть неравенства (3.115) как  $y$ , можем теперь для случая наличия полезных компонентов в наблюдаемых процессах записать плотность вероятности

$$P^{\wedge} = \frac{1}{2q_{12} \sqrt{\pi}} \cdot \exp \left\{ -\frac{(y - q_{12}^2)^2}{4q_{12}^2} \right\} \quad (3.128)$$

Рассчитаем параметры плотности вероятности случайной величины  $y$  при отсутствии полезных компонентов. В этой ситуации  $\mathcal{E}\{w, (/)\} = 0$ , поэтому

$$\mathcal{E}\{w, (/)\} = 2^{\wedge} = 0,$$

$$EQCM \sim \sim_{AS1}(1) \sim Psi(1) = \sim_{(\#1 + \#2)} = \sim_{\#12}' \quad (3.129)$$

При расчете величины  $D_{OCM}$  по формуле (3.119) в данной ситуации имеем  $B_n = 0$ . При расчете же величины  $B$ , следует учесть, что при отсутствии полезного компонента дисперсия корреляционного интеграла такая же, как и при его наличии, а математическое ожидание корреляционного интеграла при этом равно нулю [149]. Поэтому имеем

$$E\{X_{11}^2\} = 2\sigma_1^2.$$

В итоге, при отсутствии полезных компонентов в наблюдаемых процессах, выражение (3.119) приобретает вид

$$D_{OCM} \sim \sigma^2 \cdot \text{Я}_2 = \dots$$

С учетом (3.128) и (3.129) плотность вероятности величины  $y$  в данной ситуации записывается как

$$P_M = \frac{1}{\sqrt{4\pi T C}} \exp\left\{-\frac{y^2}{4 T C}\right\} \quad (3.131)$$

Введем в описании алгоритма (3.115) обозначение

$$P_{\text{ЛЯ}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{y^2}{2}\right\} \quad (3.132)$$

Тогда обеспечиваемая этим алгоритмом вероятность правильного обнаружения записывается как

$$P_{\text{по}} = \int_{\gamma_{01}}^{\infty} p(y) dy \cdot$$

Подстановка сюда выражения (3.128) для  $p(y)$  приводит к табличному интегралу:

$$P_{\text{по}} = \frac{1}{2q_{12}\sqrt{\pi}} \int_{z_{01}}^{\infty} \exp\left\{-\frac{(y-Y_n)^2}{4q_{12}^2}\right\} dy = \frac{1}{2q_{12}\sqrt{\pi}} \int_{z_{01}-q_{12}}^{\infty} \exp\left\{-\frac{y^2}{4q_{12}^2}\right\} dy$$

где  $Y] = y - q_{12}^2$ . В итоге имеем

$$P_{\text{по}} = 0,5 \operatorname{erfc} \frac{z_{01}}{\sqrt{2}q_{12}} = 0,5 \left[ 1 + \operatorname{erf} \frac{z_{01}}{\sqrt{2}q_{12}} \right] \quad (3.133)$$

где  $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$  - интеграл вероятностей,

Обеспечиваемая алгоритмом (3.115) вероятность ложной тревоги рассчитывается как

$$P_{\text{лт}} = \int_{z_{01}}^{\infty} p_0(y) dy$$

Выкладки, аналогичные проделанным при расчете  $P_{\text{по}}$ , приводят к следующему выражению:

$$P_{\text{лт}} = 0,5 \operatorname{erfc} \frac{z_{01}}{\sqrt{2}q_{12}} \quad (3.134)$$

Более удобной числовой характеристикой ошибок является средняя вероятность ошибок, вычисляемая через  $P_{\text{по}}$  и  $P_{\text{лт}}$  по формуле (3.101).

Таким образом, совокупность выражений (3.101), (3.133) и (3.134) позволяет рассчитать характеристики качества обнаружения при оптимальном комплексировании (комплексировании по входам) для идеального случая полностью известных параметров полезных компонентов наблюдаемых процессов. Эти характеристики и следует полагать эталонными при сравнении качества функционирования синтезированных устройств.

Перед тем, как привести сравниваемые характеристики качества обнаружения, определим условие их сравнимости. Будем полагать, что величина  $q^2_2 = q^2 + q^2$  одинакова для всех сравниваемых устройств. Учитывая, что для устройств, реализующих комплексирование по входам, характеристики качества обнаружения в  $i$ -м канале зависят только от  $q_i$  (причем оба канала равноправны), приведем результаты расчетов для двух случаев: а)  $q^2 = 0,9^2$  и б)  $q^2 = 0,1^2$  — первый из которых соответствует равенству отношений “сигнал/шум” на входах канальных процессоров, а второй соответствует девятикратному отличию этих отношений.

Результаты расчетов приведены в таблицах приложений. Величины, относящиеся к субоптимальному обнаружителю, помечены верхним индексом “(С)”, а величины, относящиеся к оптимальному обнаружителю (эталонные величины) помечены верхним индексом “(Э)”. Средняя вероятность ошибок по-прежнему рассчитывалась по формуле (3.101).

Для представления результатов расчетов при  $q^2 = 0,9q^2_2$  и  $q^2 = 0,1q^2_2$  нет необходимости составлять таблицы в том же объеме, в каком составлены таблицы в табл. Б.1 - Г.2, поскольку  $P_S$ ,  $P_{\text{Э}}$ ,  $P^{\text{С}}_{\text{Э}}$ ,  $P^{\text{С}}_{\text{С}}$  не зависят от соотношения между  $q^2$  и  $q_j$ , а зависят только от их суммы  $q^2_2$ . Поэтому их величины остаются теми же, что приведены в табл. Б.1-Г.2 для соответствующих значений  $P(L_0)$ ,  $P(L_1)$ ,  $A, q^2_2$ , а в табл. Д.1-К.2 приведены только характеристики качества обнаружения при комплексировании по выходам.

### 3.5. Выводы по разделу 3

1. Как и следовало ожидать, обнаружитель сигнала с полностью известными параметрами обеспечивает наименьшую среднюю вероят-

ность ошибки, поскольку минимизированный в разделе 3 средний риск как раз и равен этой величине.

2. Из устройств, реализация которых осуществима, наименьшую  $P_{оюср}$  обеспечивает субоптимальный обнаружитель.

3. При использовании субоптимального обнаружителя влияние априорных вероятностей  $P(L_0)$  и  $P(L_1)$  на  $P_{по}$  и  $P_{оаср}$  мало и уменьшается с ростом  $q_n$ . При комплексировании по выходам однозначной зависимости между априорными вероятностями и характеристиками качества обнаружения установить не удалось, но, в любом случае, разброс результатов не более чем двукратен. При обнаружении одиночного объекта этот разброс несущественен, однако, если объект представляет собой, например, одну из группы меток, в совокупности составляющих некоторый двоичный код, и ставится задача минимизации ошибки обнаружения кода в целом путем выбора вида кода (от вида кода зависят  $P(Y_0)$  и  $P^{\wedge}$ ), то данный разброс окажет существенное влияние на результат выбора. Однако для получения количественных характеристик требуется отдельное исследование.

4. При комплексировании по выходам, в случае большого различия отношений “сигнал/шум” в каналах, при малых значениях  $q_n^2$  и  $P(Z_0) < P(Z_1)$  меньшую  $P_{оајср}$  обеспечивает объединение путем логического перемножения, а при тех же условиях и  $P(Z_0) > P(Z_1)$  меньшую  $P_{оаср}$  обеспечивает объединение путем логического сложения.

5. При комплексировании по выходам вероятность правильного обнаружения всегда выше, если используется объединение путем логического сложения.

## РАЗДЕЛ 4

### АНАЛИЗ И СИНТЕЗ УСТРОЙСТВ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

#### 4.1. Математическое моделирование процесса обнаружения идентифицируемого объекта

Для идентификации типа контролируемого объекта необходимо определить количество колесных пар в каждой из тележек. С целью автоматизации этой операции могут быть использованы магнитные метки, нанесенные на колесные пары следующим образом: каждая пара намагничена так, что левое колесо является северным полюсом постоянного магнита, а правое колесо - южным полюсом. Количество колесных пар в одной тележке может быть от одной до трех.

Для считывания метки с каждой из пар используется точечный магнитный датчик. Будем полагать, что тележка проходит мимо него с постоянной, но неизвестной скоростью  $V$ , величина которой лежит в диапазоне  $[V_{\min}, V_{\max}]$ . Положим, что при движении колеса относительно датчика с некоторой номинальной скоростью  $V_{\text{ном}}$  на выходе последнего формируется импульс напряжения, описываемый функцией времени  $a \cdot s(f)$ , где  $a$  - амплитуда импульса;  $s(f)$  - импульсная функция единичной амплитуды (нормированный отклик датчика). Будем считать, что в одной тележке магнитные свойства и намагниченность всех колесных пар одинаковы и поэтому каждая из последних формирует на выходе датчика сигнал одной и той же амплитуды. В то же время амплитуды сигналов от разных тележек отличаются. Кроме того, в выходном сигнале датчика содержится аддитивная помеха.

Основываясь на вышеприведенных предпосылках, запишем модель выходного сигнала датчика в следующем виде:

$$x(t) = \dots + A2as[Q(t - m - \Gamma)] 4- \wedge as^{\wedge}t - 2m - t_d] + \dots + И(0, re^{\wedge}.rj. \quad (4.1)$$

Здесь

$A_{i,j}$  - двоичный параметр, определяющий наличие ( $\wedge=1$ ) или отсутствие ( $\wedge=0$ )  $i$ -й колесной пары в тележке. Положим, что для одноосной тележки  $\wedge_1 = 1, \wedge_2 = \wedge_3 = 0$ ; для двухосной  $\wedge_1 = \wedge_2 = 1, \wedge_3 = 0$ ; для трехосной  $\wedge_1 = \wedge_2 = \wedge_3 = 1$ ;

$v$  - множитель, определяющий временной масштаб нормированного отклика датчика  $S(t)$ :

$$e = v K_{om} > \wedge^{nom} \wedge^{[\wedge^{min} \wedge^{max}] > \quad (4-2)$$

где  $V$  - текущая скорость горизонтального перемещения колесной пары;

$V_{nom}$  ~ заранее заданное номинальное значение скорости;

$t_d$  - время задержки появления отклика от первой колесной пары по отношению к моменту  $t = \Gamma$  включения датчика;

$m$  - временное расстояние между откликами, инициированными соседними колесными парами, при номинальной скорости движения тележки;

$\Gamma_1, \Gamma_2$  - соответственно время включения и время выключения датчика. Будем считать, что длительность интервала времени  $\Delta T^1 = \Gamma_2 - \Gamma_1$  такова, что он целиком охватывает время прохождения мимо датчика трехосной тележки при любой ее скорости из диапазона  $[V_{min}, V_{max}]$ ;

$n(t)$  - аддитивная помеха.

Оговорим характер и степень влияния вышеперечисленных параметров на выходной сигнал датчика. Величины  $L_r$  являются мультипликативными априори неизвестными параметрами, подлежащими оценке с целью определения количества колесных пар в тележке. Задержка  $t_d$  является априори неизвестным случайным параметром, величина которого не представляет непосредственного интереса при определении количества колесных пар. Примем закон распределения величины  $t_d$  равномерным с плотностью вероятности

$$P(t_d) = \frac{1}{t_{d \max} - t_{d \min}} \quad \text{при } t_d \in [t_{d \min}, t_{d \max}] \quad (4.3)$$

О ирм других вел.  $t_d$ .

Такое задание  $t_d$  соответствует наименее благоприятному для решения поставленной задачи случаю, когда никакой информации о поведении величины  $t_d$  на интервале  $[t_{d \min}, t_{d \max}]$  нет.

Величина амплитуды  $a$  также априори неизвестна, однако экспериментальные замеры дают основания полагать, что она представляет собой случайную величину, значения которой весьма тесно сконцентрированы у некоторого постоянного значения  $A$ ; дисперсия этих значений равна  $\sigma^2$ . Величины  $A$  и  $\sigma^2$  зависят от материала и условий эксплуатации колесных пар и могут быть априори оценены статистическими методами. Примем закон распределения амплитуд гауссовым с плотностью вероятности

(4.4)

Дисперсия при этом полагается достаточно малой, так, чтобы вес "хвостов" распределения, соответствующих не связанным с физической

реальностью отрицательным и очень большим амплитудам, был незначителен.

Масштабный временной множитель  $v$ , в отличие от  $a$  и  $t_d$ , может быть весьма точно оценен до начала процедуры определения количества колесных пар. Для этого может быть использован доплеровский измеритель скорости, достаточно широко применяемый на транспорте [143]. После измерения скорости  $V$  величина  $e$  рассчитывается по формуле (4.2).

В качестве модели помехи примем гауссовский стационарный (в широком смысле) случайный процесс с равномерным ограниченным спектром [136]

$$\begin{cases} N_0/2, & f \in (-F_n, F_n); \\ 0, & f \notin (-F_n, F_n); \end{cases}$$

где  $F_n$  превышает наивысшую частоту отклика  $S(f)$ .

Принятые нами модели сигнала и параметров позволяют представить задачу определения количества колесных пар по нанесенным на них магнитным меткам как задачу оценки информационных параметров полезного сигнала, содержащего также мешающие параметры  $a$ ,  $t_d$  и наблюдаемого на фоне гауссовского шума с равномерным ограниченным спектром.

Сведем все информационные параметры в вектор  $L = (L_1, Y_2, Y_3)^T$ , а все мешающие параметры - в вектор  $\theta = (a \ t_d)^T$ , где символ "Т" обозначает операцию транспонирования. Теперь отметим, что, в соответствии с моделью (4.1), на практике могут иметь место только четыре вектора  $L$ :

1)  $L_0 = (0 \ 0 \ 0)^T$  при отсутствии полезного сигнала.

Припишем этой ситуации вероятность  $P_0$ . При этом

$$x(\Gamma) = s_0 + u(\Gamma) > \quad (4-6)$$

где  $s_0 = 0$ ;

2)  $A_j = (1 \ 0 \ 0)^\Gamma$ , если тележка одноосная. Припишем этой ситуации вероятность  $P_x$ . При этом

$$x(\Gamma) = S_1(\Gamma, \mathbb{L}_1, 0) + u(l) , \quad (4.7)$$

где

$$= a - s[6V - rj] ; \quad (4.8)$$

3)  $\mathbb{L}_2 = (11 \ 0)^\Gamma$ , если тележка двухосная. Припишем этой ситуации вероятность  $P_2$ . При этом

$$x(0 = S_2^\wedge, A_2, \mathbb{R}j + n(Z) , \quad (4.9)$$

где

$$S_2(\Gamma, \mathbb{L}_2, \mathbb{R}) = a + a \blacksquare - m - \quad (4.10)$$

4)  $\mathbb{L}_3 = (111)^\Gamma$ , если тележка трехосная. Припишем этой ситуации вероятность  $P_3$ . При этом

$$x(?) = S_3^\wedge, A_3, \mathbb{R}j + n(f) , \quad (4.11)$$

где

$$S_3(t, A_3, \&j = a \bullet \blacksquare \{ \#(l - /j) \} + a \bullet - m - t_d + a \blacksquare s[0(t - 2r - t_d)j$$

Теперь задачу определения количества колесных пар в тележке можно представить более наглядно - как задачу совместного обнаружения - различения сигналов  $S_Q(-)$ ,  $S_2(-)$ ,  $S_3(-)$  на фоне помех [136,144]. Приступим к синтезу алгоритмов и аппаратурных средств, обеспечиваю-

ших решение указанной задачи как в такой постановке, так и путем раздельного оценивания параметров/^-.

## 5) 2. Синтез субоптимального алгоритма работы многоканального устройства распознавания транспортных средств

Имеющиеся в нашем распоряжении исходные данные (см. предыдущий раздел) позволяют решить поставленную задачу на основе критерия максимума апостериорной вероятности (МАВ) [114]. В соответствии с этим критерием выносятся решения  $A_0, A_1, A_2, A_3$  соответственно об отсутствии или о присутствии одно-, двух- или трехосной тележки в зоне действия измерительной установки на интервале времени  $[T_1, T_2]$  согласно следующему алгоритму:

$$L = L_i, \text{ если } P_e^{-1} x | L_i > P_i \quad (4.13)$$

при всех  $i \in \mathcal{L}$ ,

где  $p(x|L_i, -)$  - функция правдоподобия сигнала  $x(t)$  по информационным параметрам.

В рамках принятой нами модели сигнал содержит как информационные параметры, представленные вектором  $L_i$ , так и мешающие параметры, представленные вектором  $\theta$ . Поэтому непосредственно из исходных данных можно записать только функцию правдоподобия  $p(x|L_i, \theta)$  сигнала  $x(t)$  по информационным параметрам и лишь затем можно рассчитать [136,145]

$$p(x|L_i) = \int p(x|L_i, \theta) p(\theta) d\theta, \quad (4.14)$$

где  $I \subset \mathbb{R}^n$  - область интегрирования;  $p(\theta)$  - априорная плотность вероятности вектора  $\theta$ .

Принятой нами модели помехи (4.5) соответствует, согласно [136], следующая функция правдоподобия:

$$p(x|\bar{\Lambda}_i, \bar{\Theta}) = \frac{1}{(2\pi F_n N_0)^{F_n} (T_2 - T_1)} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{N_0} \int_{T_1}^{T_2} [x(t) - s_i(t, \bar{\Lambda}_i, \bar{\Theta})]^2 dt\right\},$$

$$i = 0, 3. \quad (4.15)$$

Синтезируемое устройство работает в реальных условиях большого превышения сигнала над шумом, вследствие чего разность  $[x(t) - s_i(t)]$  весьма мала, весьма мал также показатель экспоненты в выражении (4.15). Поэтому данную экспоненту можно разложить в ряд Тейлора с удержанием лишь двух первых членов

$$\exp\left\{-\frac{1}{N_0} \int_{T_1}^{T_2} [x(t) - s_i(\cdot)]^2 dt\right\} \approx 1 - \frac{1}{N_0} \int_{T_1}^{T_2} [x(t) - s_i(\cdot)]^2 dt \quad (4.16)$$

Рассмотрим подробнее входящее в (4.16) подынтегральное выражение

$$[x(t) - s_i(t)]^2 = x^2(t) - 2x(t)s_i(t) + s_i^2(t). \quad (4.17)$$

Но на основании (4.6), (4.8), (4.10) и (4.12) можно записать, что

$$\int_{T_1}^{T_2} [x(t) - s_i(t)]^2 dt = \int_{T_1}^{T_2} x^2(t) dt - 2 \int_{T_1}^{T_2} x(t)s_i(t) dt + \int_{T_1}^{T_2} s_i^2(t) dt \quad (4.18)$$

поэтому

$$\int_{T_1}^{T_2} x^2(t) dt$$

$$= \int_{T_1}^{T_2} x^2(t) dt$$

$$\sum_{y=U=1}^{+ \xi z} X_j X_k a^2 s\{j\} - s\{-, k\}. \quad (4-19)$$

Но отклики датчика на различные колесные пары не перекрываются во времени, поэтому двойная сумма в (4.19) равна нулю. В итоге

$$s,^2(z, A, \otimes) = -i_1^{a^2 s^2} (j * >] ] = -! \text{Л} \quad (4.20)$$

0,  $i = 0$ .

Запишем выражение, аппроксимирующее функцию правдоподобия (4.15) путем использования результатов (4.16) - (4.20). Введем обозначение

$$H = \frac{1}{(2\pi F_n N_0)^{7 \wedge (72-71)}}. \quad (4.21)$$

и с его учетом подставим (4.16) в (4.15):

$$\text{---} \setminus H \quad \text{-----} \int [x(\tau) - s_i(\bullet)] dt. \quad (4.22)$$

$m_x$

Вычислив подынтегральный квадрат с учетом (4.17), (4.18) и (4.20), получим

$$\begin{aligned} \text{дХІЛІ, ©} \ll H \text{-----} \wedge x(t) dt + \\ 71 \\ + \text{T} \sim \text{I X O} \bullet \quad \text{-U - 1)r- } \wedge \} \quad dt - \\ \text{y}^v \text{o ?i L} \quad \text{J=1} \\ - \frac{r_j \wedge^2 i}{A_0 \text{ t i j=i}} \quad \text{---} (j \text{ --- } 1)r \text{ --- } t a \text{]} dt, i = \bar{1,3}; \end{aligned} \quad (4.23^i)$$

$$\wedge x | A_z, 0) \sim H \text{-----} \text{J} x^2 (t) dt \quad (4.23'')$$

?i

Поскольку интегрирование является линейной операцией, то в (4.23<sup>i</sup>) его можно поменять местами с суммированием

$$\begin{aligned}
 dx|A_{\Gamma}, 0) \sim H \int_0^T x^2(t) dt + \\
 + \sum_{j=1}^M \int_0^{T_j} \{ \Phi - U - i \} r - t dJ \}^{dt} - \\
 \sum_{j=1}^M \int_0^{T_j} \{ \dots \} \quad , \quad i = 1, 3 \quad (4-24)
 \end{aligned}$$

Правая часть выражения (4.23") совпадает с первыми двумя слагаемыми выражения (4.24). Она не зависит от оцениваемых и мешающих параметров и для конкретной реализации сигнала  $x(f)$  на интервале времени  $[0, T]$  является постоянной величиной

$$\#_{12} = \# \int_0^T x^2(t) dt \quad (4.25)$$

Основываясь на выражениях (4.14), (4.23"), (4.24) и (4.25), приступим к определению выражения для функции правдоподобия сигнала  $x(t')$  по информационным параметрам.

Проделаем выкладки для конкретных значений  $i$ .

1.  $i = 0$ . При этом  $S_j(\bullet) = 0$  и получаем

$$\int_0^T x|L_0, 0) = \int_0^T x|L_0) = \#_{12} \quad (4-26)$$

2.  $i = 1$ . При этом

$$\int_0^T x|L_1, 0) = \int_0^T x|L_0) + \int_0^T a \int_0^T x(O) [ \dots ] dt \quad (4.27)$$

Поскольку  $a$  и  $t_d$  - независимые случайные величины, то входящая в (4.14) априорная плотность вероятности  $p(\&)$  вектора  $\theta$  записывается как

$$p\{\&\} = P_i M - P a^{(a)} \cdot \quad (4-28)$$

В результате

$$\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} P(t,d) \cdot Pa(a) \cdot P(x|M^{ra} \cdot d)^{dt} d^{da} \quad (4.29)$$

Выполним поочередно усреднение каждого из слагаемых, образующих выражение (4.27). Для первого слагаемого имеем

$$\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} P(t,d) \cdot Pa(a) \cdot P(x|M^{ra} \cdot d)^{dt} d^{da} = H_n \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} p_a(a)^{da} \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} P(t < Jd)^{dt} d \quad (4.30)$$

Поскольку величина  $a$  имеет, по условию, малую дисперсию, то пределы интегрирования по  $a$  можно заменить на бесконечные. В итоге, с учетом (4.3), выражение (4.30) равно  $Y_{12}$

Усредняем второе слагаемое выражения (4.27):

$$2Y_{12} \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} Pa(a)^{da} \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} f(x|O-s[\wedge - td]) dt \cdot Pr^{d^d} \quad (4.31)$$

Интегрирование по амплитуде дает

$$\int_{a_{\min}}^{a_{\max}} p_a(a) da = \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} \frac{a}{\sqrt{2\pi\sigma_a}} \exp\left[-\dots\right] da$$

Замена пределов интегрирования на бесконечные сводит этот интеграл к табличному [146], в результате чего

$$\int_{a_{\min}}^{a_{\max}} p_a(a) da \sim \dots \quad (4.32)$$

и выражение (4.31) приобретает вид

$$\frac{2H-A}{N.42} \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} \dots \cdot \quad (4.33)$$

Дальнейшее усреднение требует конкретизации функции, описывающей сигнал  $S[\bullet]$ . Она, как отмечалось выше, является импульсной функцией единичной амплитуды. Примем в качестве таковой импульс гауссовой формы [147]:

$$s(r,0,0) = \exp - O^2(t - o)^2 \tag{4-34}$$

Подстановка последнего выражения в (4.33) с одновременной переменной порядка интегрирования и с учетом (4.3) дает

$$\frac{2 HA}{N \Delta t_d \sqrt{2}} \int_{T_1}^{T_2} x(t) \int_{t_{d \min}}^{t_{d \max}} \exp \left\{ - \left( O^2 t_d^2 - 2O^2 t t_d + O^2 t^2 \right) \right\} dt \tag{4.35}$$

Здесь  $At_d$   $O_{\max}$   $O_{\min}$  • (4.36)

Внутренний интеграл является табличным [146] и равен

$$\frac{OZJ}{ZC/\backslash} \quad , \quad \sim ^{7 \min} )^{-\text{erf} \sim O_{\max}} I' \quad 'i L' \quad 'i) \tag{4-37}$$

где

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt - \text{интеграл вероятности.}$$

Подставив (4.37) в (4.35), получим результат усреднения второго слагаемого выражения (4.27):

---


$$N \Delta t \text{ у } 2^* \quad d\{t - O_{\min}\}^{-\text{erf} \sim O_{\max}} \bullet \tag{4.38}$$

Теперь усредним по мешающим параметрам третье слагаемое выражения (4.27)

$$H \int_{\wedge_{\min}}^{\ll \max * \ll * \text{таx}} \int \left\{ a^2 \right\} > dadt_d$$

С учетом (4.28) получим

$$\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} p_a(a) \exp\{-2\pi f t_d \sqrt{a^2 + c^2}\} da dt \quad (4.39)$$

Интеграл по амплитуде после подстановки выражения (4.4) для  $p_a(a)$  сводится к табличному [146]

$$\int_{a_{\min}}^{a_{\max}} \exp\{-2\pi f t_d \sqrt{a^2 + c^2}\} da = I_n \quad (4.40)$$

Замена пределов интегрирования на бесконечные дает

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp\{-2\pi f t_d \sqrt{a^2 + c^2}\} da = I_n \quad (4.41)$$

Теперь возьмем интеграл, расположенный внутри фигурных скобок в выражении (4.39). С учетом (4.3), (4.34) и (4.36) получим

$$\int_{t_{\min}}^{t_{\max}} \exp\{-2\pi f t_d \sqrt{a^2 + c^2}\} dt = I_t \quad (4.42)$$

Интеграл является табличным [146] и в итоге

$$I_t = \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} \exp\{-2\pi f t_d \sqrt{a^2 + c^2}\} dt \quad (4.43)$$

Подстановка (4.42) и (4.43) в (4.39) дает

$$\int_{a_{\min}}^{a_{\max}} \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} \exp\{-2\pi f t_d \sqrt{a^2 + c^2}\} da dt = I_n I_t \quad (4.44)$$

Проинтегрируем поочередно каждое из слагаемых, расположенных в фигурных скобках. Выполним замену переменной  $t' = t - t_d$  для первого слагаемого, получим табличный [148] интеграл



$$\begin{aligned}
p(x|\mathcal{L}_2, \mathcal{C}) = & H_n + \int_{t_0}^{t_i} Jx(t) s[0(r - t_d)] dt + \\
& + \int_{t_0}^{t_i} \frac{9 u_n^2}{\Gamma} \frac{1}{x} (\varphi p(t - \tau - t_d)) dt - \int_{t_0}^{t_i} \frac{\dot{Y}^2}{\tau} [f_d] dt - \\
& T J_n^2 \int_{t_0}^{t_i} \dots
\end{aligned} \tag{4.49}$$

Усреднение  $\int_{t_0}^{t_i} Jx(t) s[0(r - t_d)] dt$  по мешающим параметрам сводится к усреднению по этим параметрам каждого из пяти слагаемых выражения (4.49) в отдельности.

Усреднение первого и второго слагаемых уже выполнено при рассмотрении случая, когда  $i = 1$ . Результаты равны соответственно  $J_{12}$  и выражению (4.38).

Результат усреднения третьего слагаемого выражения (4.49) получаем непосредственно из (4.38) заменой в нем  $t_{j_{\min}}$  на  $(\hat{t}_{\min} + \tau)$  и  $t_{d_{\max}}$  на  $t_{d_{\min}}$ .

$$N f l y \sim 2 \dots \sim t d \min \dots \sim t d \max \dots \tag{4.50}$$

Усреднение четвертого слагаемого выражения (4.49) также уже выполнено, т.к. оно равно третьему слагаемому выражения (4.27). Результат представлен выражением (4.47).

Наконец, результат усреднения пятого слагаемого выражения (4.49) получаем из (4.45), (4.46), (4.47) заменой  $Z_{j_{\min}}$  на  $t + \tau$  и  $\hat{t}_{\max}$  на  $t_{d_{\max}}$ .

$$\frac{J^H(2A^2 + \langle J^2 \rangle)}{8Y_0 A^0 \sqrt{21}} (C_{21} - C_{22}),_{227} \quad (4.51)$$

где

$$\begin{aligned} & d_{\min} & 2 \min \\ & Z_{\min} & d_{\min} \\ & \circ \quad (Z_{\min}^2)^{-0.5} & < \\ & \checkmark & < \end{aligned} \quad (4.52)$$

$$\begin{aligned} & > 2 - (\sqrt{2} t_{d\max}) \cdot \operatorname{erf}^y[20^{\wedge} T_2 t_{d\max} \\ & (\sqrt{1 - t_{d\max}} - \operatorname{erf}[\sqrt{2}^{\wedge} 7]) - \sqrt{\max} - + \\ & e^{-\sqrt{2} \sqrt{t_{d\max}}^2}, \quad e^{-\sqrt{1 - t_{d\max}}^2}, \end{aligned} \quad (4.53)$$

Таким образом, усредненная по мешающим параметрам функция правдоподобия  $\chi^2 | \mathcal{L}_2, \mathbb{R}$ ) записывается как

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \chi^2 | A_2 = Y_{12} - & \frac{4^{\wedge} H(1A^2 + c\Gamma^2)}{8Y_0 A^6} (C_{12} - C_{12} + C_{21} - C_{22}) \\ & + \frac{HA}{N_0 \Delta t_d \theta} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \int_{T_1}^{T_2} x(t) \left\{ \operatorname{erf} \left[ \theta(t - t_{d\min}) \right] + \operatorname{erf} \left[ \theta(t - t_{d\min} - \tau) \right] - \right. \\ & \left. - \operatorname{erf} \left[ \theta(t - t_{d\max}) \right] - \operatorname{erf} \left[ \theta(t - t_{d\max} - \tau) \right] \right\} dt . \end{aligned} \quad (4.54)$$

4.  $i = 3$  . При этом

$$\begin{aligned}
p(x|\vec{\Lambda}_3, \vec{\Theta}) = & H_{12} + \frac{2Ha}{N_0} \int_{t_d}^T dt + \\
& + \int_{t_d}^T \int_{t_d}^T |x(r)|^2 \exp(-2\tau - t_d) dt - \\
& - \frac{1}{N_0} \int_{t_d}^T J^2[0(r - t_d)] dt - \frac{1}{N_0} \int_{t_d}^T p^2[0(r - T - t_d)] dt - \\
& \sim \frac{Ha}{N_0} \int_{t_d}^T f_s^2[\Lambda - 2r - Z_{rf}] dr. \tag{4.55}
\end{aligned}$$

Усреднение  $p(\vec{\Lambda}_3, \vec{\Theta})$  по мешающим параметрам сводится к усреднению каждого из семи слагаемых выражения (4.55) в отдельности.

Усреднение первого и второго слагаемых уже выполнено при рассмотрении случая, когда  $i = 1$ . Результаты равны соответственно  $H_n$  и выражению (4.38).

Среднее по 0 выражение для третьего слагаемого найдено при рассмотрении случая  $i = 2$ . Результат - выражение (4.50).

Результат усреднения четвертого слагаемого выражения (4.55) получаем непосредственно из (4.50) заменой в нем  $t$  на  $2t$ . Средние по 0 выражения для пятого и шестого слагаемых уже вычислены при рассмотрении соответственно случаев  $i = 1$  и  $i = 2$ . Результаты - соответственно выражения (4.47) и (4.51).

Результат усреднения седьмого слагаемого выражения (4.55) получаем заменой в (4.51) - (4.53) параметра  $t$  на  $2t$ . Эта замена, будучи выполнена в (4.52), даст константу  $C_{31}$ , а будучи выполнена в (4.53) - константу  $C_{32}$ .

В итоге усредненная по мешающим параметрам функция правдо-

$$\begin{aligned}
& \frac{4LH(1A^2 + a^2)}{8N_o \& d_0} T_i \dots \left( C_i i \sim \wedge^{*12} \wedge^{21} \sim \wedge^{22} C_3 1 - \wedge^{32} / + \right. \\
& \left. + \text{erf} \left[ \frac{f_x \text{rf}}{JMQ \wedge t_d U N 2. T.} \right] \right) \left( C_i \min \right) + \text{erf} \wedge^{<7} \min + \\
& \left. \text{erf} G \wedge t_{dnjn} \right\} \left. \text{erf} \Psi I Id \max \right\} \\
& \left. \text{erf} 0 [ t t d_{max} \quad 2\tau ] \right\} \quad (4.56)
\end{aligned}$$

Таким образом, нами определены (выражены через априорные данные и выходной сигнал датчика) все составляющие алгоритма разрешения (4.6). Нетрудно заметить закономерности, позволяющие распространить сам алгоритм и его составляющие на случай произвольного количества  $i$  осей вагонной тележки.

### 4.3. Теоретические основы построения одноканальных распознающих систем

Блоки вычисления функций правдоподобия могут быть реализованы двумя способами. Во-первых, можно непосредственно реализовать математические операции над принятым сигналом в соответствии с выражениями (4.26), (4.48), (4.54) и (4.56), результатом чего будет корреляционный приемник [149]. Структурная схема такого устройства, в которой учтена повторяемость некоторых подынтегральных слагаемых в выражениях (4.48), (4.54) и (4.56), приведена на рис. 4.1. Во-вторых, операции перемножения принятого сигнала  $x(t)$  и опорных сигналов вида  $\$[\bullet]$  с последующим интегрированием, необходимые для вычисления функ-

цій правдоподобія, можуть бути замінені обробкою прийнятого сигналу согласованими фільтрами (С0) [145, 149].

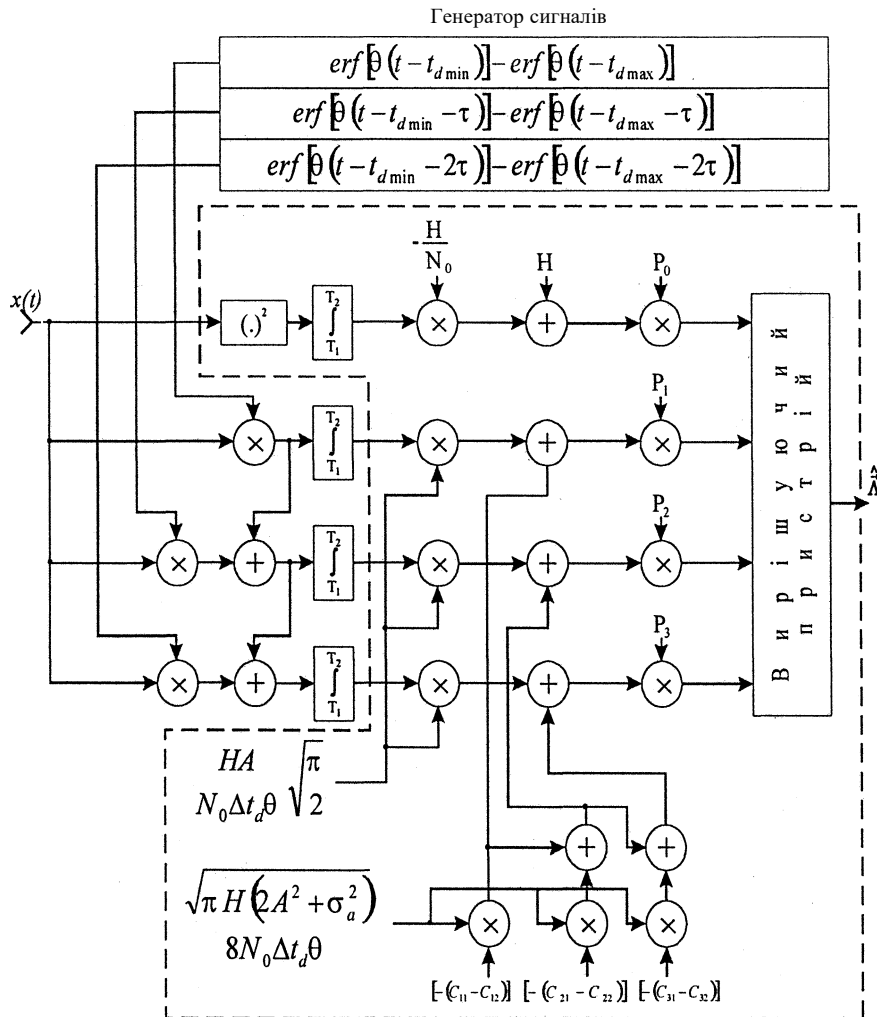


Рис. 4.1. Корреляционный приемник

Рассмотрим возможность реализации согласованных фильтров [68, 117]. Для этого определим их частотные характеристики. Как известно [145, 149], операции вычисления интеграла

$$z = \int_{T_x}^{T_2} x(t) u_c(t - T_Q) dt, \tag{4.57}$$

где  $u_c(t - t_0) \cdot j$  - опорный сигнал;  $t_0$  - некоторая константа, соответствует обработка сигнала  $x(t)$  фильтром с частотной характеристикой

$$K(\omega) = C \cdot G^*(\omega) \cdot \exp\{-j\omega t_0\}, \quad (4.58)$$

где  $C$  - некоторая произвольная константа;

$G^*(\omega)$  - комплексно-сопряженная спектральная плотность сигнала

$t_0$  - некоторая константа, причем  $t_0 > T_2$ .

Заметим, что опорные сигналы, входящие в соотношения (4.48), (4.54) и (4.56), состоят из слагаемых вида  $\text{erf}[t(t - u)]$ . Найдем спектральную плотность такой функции времени

$$C(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \text{erf}[t(t - u)] dt. \quad (4.59)$$

Выполнив замену переменной  $u = t - u$ , придем к выражению

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} j e^{-j\omega u} \text{erf}(u) du,$$

в котором интеграл является табличным [148] и приводится к виду

$$j e^{-j\omega u} \int_{-\infty}^{\infty} \text{erf}(u) du = \frac{\theta}{\omega} \cdot e^{-\frac{\theta^2}{\omega^2}} \cdot \text{erf}\left(\frac{\theta}{\omega}\right) \quad (4.60)$$

$$+ \frac{0}{j\omega} - \frac{e^{-\theta^2/\omega^2}}{\omega} + \frac{1}{\omega} \int_{-\infty}^{\infty} \text{erf}(u) du = \frac{1}{\omega} \int_{-\infty}^{\infty} \text{erf}(u) du$$

Известно [150], что

$$\text{erf}(x + iy) = \text{erf}(x) + \frac{2iy}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \frac{e^{-t^2}}{1 - \cos 2t \cdot \text{erf}(t)} dt + \dots$$

$$f_n(x,y) = 2x - 2x \cdot ch(ny) \cos(2xy) + n \cdot sh(ny) \sin(2xy); \quad (4.61)$$

где

$$f_n(x,y) = 2x - 2x \cdot ch(ny) \cos(2xy) + n \cdot sh(ny) \sin(2xy);$$

$$g_n(x,y) = 2x \cdot ch(ny) \sin(2xy) + n \cdot sh(ny) \cos(2xy);$$

$$|f(x,y)| \ll 10^{16} \cdot |erf(x + jy)|.$$

Поэтому при  $X \rightarrow \infty$  имеем  $erf(x + jy) \ll erf(x)$ , т.к. второе и третье слагаемые выражения (4.61) из-за наличия  $e^{-x}$  стремятся к нулю. В итоге (4.60) приобретает вид

$$G(\omega) = \frac{e^{-\omega^2} + e^{-4\omega^2}}{\omega} - \frac{j \sin \omega}{\omega^2} \quad (4.62)$$

Используем это выражение для вычисления спектральной плотности входящего в (4.48) опорного сигнала

$$-erf(\omega) \quad (\text{Она равна разности спектральных}$$

плотностей слагаемых, охваченных фигурными скобками, и имеет вид

$$\frac{2e^{-\omega^2}}{\omega} \quad (4.63)$$

Положив в (4.58)  $C = 1$ , после подстановки туда получим частотную характеристику соответствующего согласованного фильтра (для конкретности задано  $\Gamma_0 = T_2$ ):

$$K_{\text{ц}}(\omega) = 2 \cdot \frac{e^{-\omega^2}}{\omega} \quad (4.64)$$

Здесь первый сомножитель обуславливает наличие в структурной схеме фильтра усилителя с коэффициентом усиления по напряжению, равным 2; второй сомножитель соответствует идеальному интегратору; третий сомножитель соответствует некоторому фильтрующему каскаду; слагаемые в квадратных скобках соответствуют элементам задержки соответственно на время  $(t_2 - t_{j\max})$  и  $t_2 \sim t_{\min}$ .

Однако, идеальный интегратор, как и каскад с частотной характе-

ристикой  $e^{-\omega^2}$ , нереализуемы, т.к. их частотные характеристики не удовлетворяют критерию осуществимости Пэли-Винера [140], согласно которому для физически осуществимого фильтра должно выполняться соотношение

$$\left| \frac{1}{\omega} \frac{dX(\omega)}{d\omega} \right| \leq 1 + \frac{1}{\omega^2} \quad (4.65)$$

В этом случае интегратор выполняют в виде RC-цепи или на базе усилителя с обратной связью [140], а каскад с частотной характери-

стикой  $e^{-\omega^2}$  заменяют фильтром Баттерворта [140,152].

Поскольку в (4.54) опорный сигнал равен сумме опорного сигнала из (4.48) и сигнала  $e^{-\omega^2} \text{erf}\left[\frac{t - t_{d\max} - \tau}{\tau}\right]$  то соот-

ветствующий фильтр состоит из двух фильтров со схемами, выходы которых объединены сумматором. Поскольку в (4.56) опорный сигнал равен сумме трех компонентов: опорного сигнала из (4.41), сигнала

$$\left\{ \text{erf}\left[\frac{t - t_{d\min} - \tau}{\tau}\right] + \text{erf}\left[\frac{t - t_{d\max} - \tau}{\tau}\right] \right\}$$

и сигнала

$$\sqrt{\text{erf} \frac{\tau}{\tau_{\text{тах}}} - 2\tau - \text{erf} \frac{\tau}{\tau - 2m}},$$

то соответствующий фильтр состоит из трех фильтров со схемами, выходы которых объединены сумматором. При этом к фильтрам, используемым при реализации процесса обработки принятого сигнала в соответствии с выражением (4.54), добавляется еще один фильтр, отличающийся от каждого из них только элементами задержки. Таким образом, внутренняя структура согласованных фильтров СФ1, СФ2, СФ3 является такой, какая представлена на рис. 4.2.

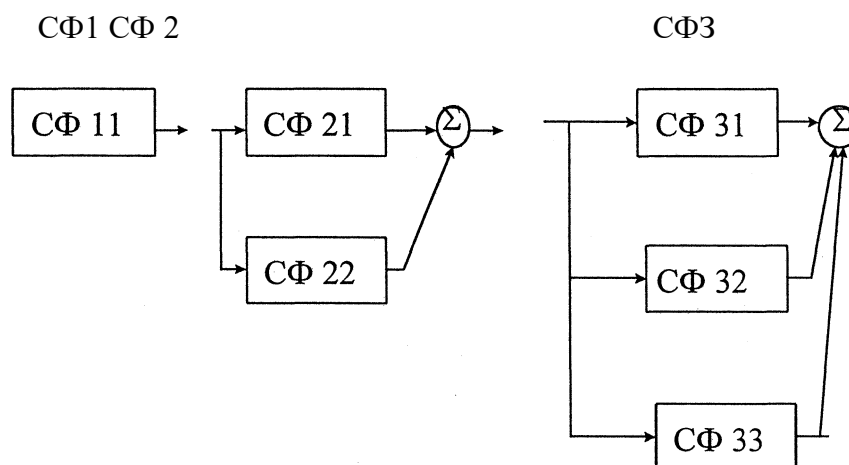


Рис. 4.2

Как уже отмечалось, фильтры СФ11, СФ21 и СФ31 идентичны, также как фильтры СФ22 и СФ32. Частотные характеристики первых трех фильтров определены выражением (4.64). Частотные характеристики СФ22 и СФ32 получены из этого же выражения посредством описанной выше замены

$$f_{\text{н}}(\omega) = \frac{\sqrt{\frac{\tau}{\tau - 2m}}}{\sqrt{1 - \frac{\tau}{\tau - 2m}}}, \quad C/\max @ J^{\wedge}V2 \quad (4.66)$$

Аналогичным образом частотная характеристика фильтра СФ33 приводится к виду

(4-67)

Поскольку  $|e^{j\theta}| = 1$ , то амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) всех изображенных на рис. 4.2 фильтров, начиная с СФ11 и заканчивая СФ33, одинаковы и равны

$$K_{11}(\omega) = 2 \frac{e^{-4\theta^2}}{\omega} \left| \cos[\omega(T_2 - t_{d\max})] - \cos[\omega(T_2 - t_{d\min})] + j \left\{ \sin[\omega(T_2 - t_{d\max})] + \sin[\omega(T_2 - t_{d\min})] \right\} \right| = 2\sqrt{2} \frac{e^{-\frac{\omega^2}{4\theta^2}}}{\omega} \sqrt{1 - \cos[\omega(t_{d\max} - t_{d\min})]} = (4.68)$$

Эффективная ширина полосы частот, соответствующая множителю  $e^{-\frac{\omega^2}{4\theta^2}}$ , составляет

$$\Delta\omega = 3\sqrt{2\theta^2}. \quad (4.69)$$

Аналогичная величина, рассчитанная по первым нулям последнего множителя выражения (4.68), составляет

$$A = \frac{2\pi t_{d\max} - 2\pi t_{d\min}}{2\pi} = \dots \quad (4.70)$$

Сравним величины  $A$  и  $\Delta\omega$ . При минимальной скорости вагона 10 км/ч, максимальной его скорости 100 км/ч и номинальной - 50 км/ч величина  $A$ , согласно (4.2), лежит в пределах от 0,2 до 2. Поэтому  $\Delta\omega$  лежит в пределах от 0,84 рад/с до 8,4 рад/с. Величина  $A = (t_{d\max} - t_{d\min})$  приблизительно равна временному интервалу между концом прохождения первой тележки вагона и началом прохождения его второй тележки. При номинальной скорости  $V_{ном} = 50$  км/ч и расстоянии между тележками

порядка 15 м имеем  $kt_d \ll 1$  с  $D_{\text{в}} \ll 6,28$  рад/с. Таким образом,  $D_{\text{в}}$  и  $D_{\text{в}} > 2$  - величины одного порядка. Для определенности примем

$$D_{\text{в}} = D_{\text{в}} < Y_2 = D_{\text{в}} < y = \frac{2\pi}{D}, \quad (4.71)$$

причем  $D_{\text{в}} < y < 2\pi - D$  (см. (4.5)). Соотношение (4.71) понадобится ниже при аппроксимации АЧХ (4.68).

На практике представляется важным оценить достоверность решений, выносимых синтезированным в п.п.4.1 - 4.2 устройством, т.е. в конечном счете, определить эффективность его работы. Наиболее общим, не зависящим от конкретного типа вагона, показателем такой эффективности является средняя вероятность ошибки [136]

$$P_{\text{ош.ср}} = \sum_{l=0}^3 P_l \cdot P_{\text{ош.}l},$$

где  $P_{\text{ош.}l}$  - вероятность того, что в обмеренной тележке было  $z$  колесных пар, а устройство дало другой ответ  $\hat{L}_j$ ,  $j \neq l$ .

То есть

$$P_{\text{ош.}l} = P(\hat{L}_j \neq l, | L = l). \quad (4.73)$$

Поскольку

$$\sum_{l=0}^3 P(\hat{L}_l | \bar{L} = \bar{L}_l) = 1$$

или

$$P(\hat{L}_l | \bar{L} = \bar{L}_l) + \sum_{\substack{l=0 \\ l \neq l}}^3 P(\hat{L}_l | \bar{L} = \bar{L}_l) = 1,$$

где первое слагаемое является вероятностью правильного решения, то

Применительно к схеме, приведенной на рис. 4.1, вероятность правильного решения является вероятностью того, что сигнал на  $i$ -м входе решающего устройства будет больше сигналов на других входах. Если обозначить сигнал на  $i$ -м входе решающего устройства как и совместную плотность вероятности входных сигналов решающего устройства как  $p(Y_0, Y_j, Y_2, F_j)$ , то (4.74) можно переписать как

$$\begin{matrix} \dots > 1 \Gamma, \Gamma / \\ \text{ШНМЛЛИЛЖ}; \\ \dots \end{matrix} \quad (4.75)$$

В общем аналитическом виде задача определения совместной плотности вероятности выходных сигналов многоканальной системы не решена [144]. Однако условия, очерчивающие рамки наших исследований, позволяют, как показано ниже, решить эту задачу при достаточно реалистических допущениях. А именно, положим, что любое количество колесных пар в тележке (от 0 до 3) априори равновероятно (это наивысшая степень априорной неопределенности), т.е. что  $P_i=0,25$  для всех значений  $i$ . С учетом этого рассмотрим выражения (4.26), (4.48), (4.54) и (4.56), в каждое из которых входит слагаемое  $H_{i2}$ . При всех  $P_i=0,25$  величина  $H_{i2}$  будет на всех входах решающего устройства присутствовать с одним и тем же весом 0,25. Это будет одинаковый для всех входов, хотя и разный от реализации к реализации, входной уровень. Поэтому его можно вычесть на всех входах, при этом на первом входе всегда будет нуль, а на всех остальных будут присутствовать сигналы, соответствующие оставшимся слагаемым выражений (4.48), (4.54) и (4.56) умноженным на 0,25. Кроме того, во всех оставшихся слагаемых содержится постоянный множитель  $H/(N_0 \& de)$ . Он также не влияет на результаты сравнения входных сигналов решающего устройства и поэтому будет нами опущен.

Введем следующие обозначения для опорных функций [115]:

$$\text{Re/1}(r) = \text{erf} \left[ \theta(t - t_{d\max}) \right] \quad (4.76)$$

$$\text{Re/2}(r) = \text{erf} \left[ \theta(t - t_{d\max} - \tau) \right] \quad (4.77)$$

$$\text{Re/3}0 = \text{erf} \left[ -\theta(t - t_{d\max} - 2\tau) \right] \quad (4.78)$$

С учетом введенных обозначений входные сигналы решающего устройства могут быть записаны в следующем виде:

$$Y_0 = 0; \quad (4.79)$$

$$\underline{M^{A^2 + \sigma_a^2}} (\Gamma) \quad (4.80)$$

$$Y_2 = -\frac{\sqrt{\pi}(A^2 + \sigma_a^2)}{\sigma \sqrt{\pi}} (C_{11} - C_{12} + C_{21} - C_{22}) + j^*0 [\text{Wi}0 + \text{Re/2}(\text{OK})] \quad (4.81)$$

$$Y_3 = -\frac{\sqrt{\pi}(A^2 + \sigma_a^2)}{\sigma \sqrt{\pi}} (C_{11} - C_{12} + C_{21} - C_{22} + C_{31} - C_{32}) + j^*2 \text{Jx}(/) [\text{Re/1}0 + \text{Re/2}0 + \text{Re/3}0] \text{cfr.} \quad (4.82)$$

Совокупность последних четырех выражений и выражений (4.84) и (4.75) позволяет порознь вычислить вероятности ошибок  $P_{\text{ошл}}$  при контроле одно-, двух- и трехосных тележек, а затем на основании (4.72) вычислить среднюю вероятность ошибки.

**Расчет  $P_{\text{ошл}}$**  В рассматриваемой ситуации мимо датчика проходит одноосная тележка, т.е., согласно (4.1), выходной сигнал датчика есть

$$x(f) = a \cdot \text{sp}^{\wedge} \text{-} \wedge \text{j} + zXr). \quad (4.83)$$

Подставив (4.34) в (4.83), а (4.83) в (4.80), получим

$$Y_1 = -\frac{\sqrt{\pi}(A^2 + \sigma_a^2)}{8\sqrt{2}}(C_{11} - C_{12}) + \frac{A\sqrt{\pi}}{4} \left[ \int_{T_1}^{T_2} a e^{-\text{Re} f_x(t)} dt + \right. \\ \left. + \text{Jn}(\cdot) - \text{Re} \right] \quad (4.84)$$

Сначала вычислим первый интеграл в квадратных скобках. Для этого рассмотрим поведение функции  $\text{Re} f_x(t)$ . В соответствии с (4.76) ее график имеет вид, представленный на рис. 4.3.

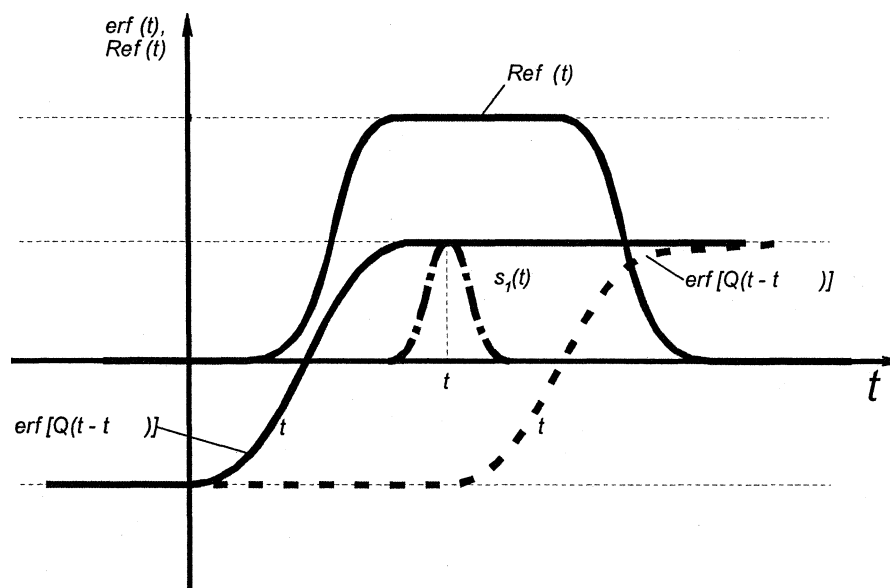


Рис. 4.3. График поведения функции  $\text{Re} f_x(t)$

Положим, что сигнальный импульс  $s_x(t) = \exp(-t^2)$  находится в интервале времени, где  $\text{Re} f_x(t) \ll 2$ . В результате искомый интеграл приобретает вид

$$2a \int_{T_1}^{T_2} e^{-t^2} dt = 2a e^{-t^2} \int_{T_1}^{T_2} e^{t^2} dt.$$

Последний интеграл является табличным [146]. В итоге

$$\int_{T_1}^{T_2} e^{-t^2} \cdot \text{Re} f_x(t) dt = \frac{2ay}{0} \quad (4.85)$$

Теперь рассмотрим второй интеграл в выражении (4.84). Как показано в п.4.2., эта математическая операция эквивалентна линейной фильтрации процесса  $n(t)$  фильтром с частотной характеристикой (4.64). Обозначим выходной процесс фильтра как  $n_a(t)$ . Его математическое ожидание равно 0 (как и у  $n(t)$ ), а дисперсия, как показано в [140], равна

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f_s(\omega)|^2 |f_n(\omega)|^2 d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} |f_s(\omega)|^2 |f_n(\omega)|^2 d\omega, \quad (4.86)$$

где  $f_s(\omega)$  определяется соотношениями (4.5), а  $|f_n(\omega)|$  - соотношением (4.68). С их учетом имеем

$$D_{n_a} = \int_{-\infty}^{\infty} |f_s(\omega)|^2 |f_n(\omega)|^2 d\omega \approx \int_{-\infty}^{\infty} |f_s(\omega)|^2 d\omega \approx C/\min$$

Обозримого представления для этого интеграла не существует, поэтому используем в выражении (4.86) аппроксимацию АЧХ фильтра постоянным значением в пределах активной полосы частот

$$\begin{aligned} |f_s(\omega)|^2 &\approx \begin{cases} A^2 & \text{ДБ} \\ 0 & \text{Дал} \end{cases} \\ & \text{где } A^2 = \frac{C}{2J} \end{aligned}$$

где  $A^2$  определена соотношением (4.71).

Получим

$$D_{n_a} = 8\pi A^2$$

Как будет показано в дальнейшем, знания соотношений (4.85) и (4.88) достаточно для расчета  $P_{\text{ош}}^2$ , в частности, нет необходимости вычислять вероятностные характеристики величины  $Y_7$  в целом.

Теперь рассмотрим величину  $K_2$  при наличии на выходе датчика сигнала (4.83). Подставив (4.34) в (4.83), а (4.83) - в (4.81), получим

$$Y_2 = -\frac{\pi(A^2 + \sigma_a^2)}{\sigma \sqrt{\pi}}(C_{11} - C_{12} + C_{21} - C_{22}) + \frac{A\sqrt{\pi}}{4} \int_{T_1}^{T_2} a \cdot e^{\{Re/(0 + Re/20)\} dt + |и0- \{Re/(r) + Re/20\}^\wedge} \quad (4.89)$$

Сначала вычислим первый интеграл в квадратных скобках. Для этого рассмотрим поведение суммы двух опорных функций, заключенной в фигурные скобки. График первой из них изображен на рис. 4.3, а  $Re/2(0$  имеет, как следует из (4.77), тот же вид, но сдвинута в сторону запаздывания на величину  $m$ . Аналогично построению графика  $Re/ДО$  для суммы  $\{Re/ДО + Re/ДО\}$  получим график, приведенный на рис. 4.4.

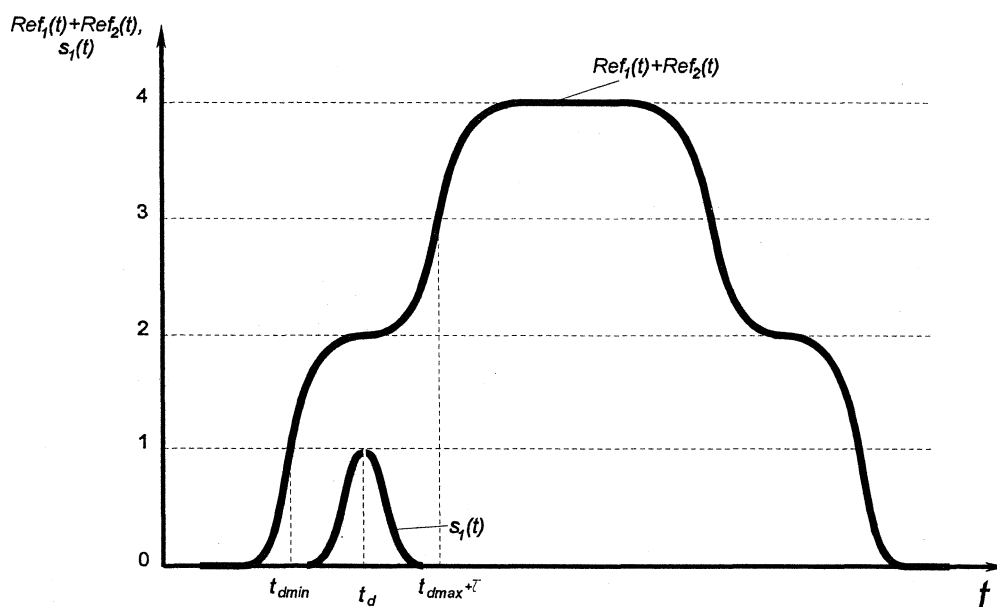


Рис. 4.4. График поведения функции  $\{Re/(0 + Re /2(0|$

Импульс полезного сигнала (0 короток и полностью располагается в интервале времени, где  $Re/ДО + Re /ДО \ll Re /(0 \ll 2$ , поэтому величина первого интеграла в выражении (4.89) практически равна величине первого интеграла в выражении (4.84)

То, что  $5] (\tau)$  и  $Re/2(\tau)$  практически не перекрываются во времени, означает, что в момент времени  $t = T_2$  полезного сигнала на выходе СФ 22 (рис. 4.2) нет.

Теперь рассмотрим второй интеграл в выражении (4.89). Как показано в п.4.2., эта математическая операция эквивалентна линейной фильтрации процесса  $n(t)$  фильтром СФ2 (см. рис. 4.5). Ввиду связи (4.66) между частотными характеристиками составляющих его фильтров СФ21 и СФ22 процесс  $i_2(t)$  на выходе СФ2 выражается через процесс  $i_1(t)$  на выходе СФ21 следующим образом:

$$n_2(t) = n^{\wedge} + n^{\wedge} + m). \quad (4.91)$$

Этот процесс имеет нулевое математическое ожидание, а его дисперсия равна

$$\begin{aligned} E\{i_2^2(\tau)\} &= E\{n^{\wedge}\{t + \tau\} + 2\# \{i\}(\tau) - n^{\wedge}t + \tau\}^2\} \\ &= 2E\{i_1^2(\tau)\} + 2E(T^2), \end{aligned} \quad (4.92)$$

где  $2^{\#}(\tau)$  - значение корреляционной функции процесса при сдвиге  $\tau$ , равном межосевой задержке. Согласно [136]

$$R(r) = N_0 F_n \frac{\sin 2\pi - F_n T}{2n F_n r} \quad (4.93)$$

При межосевом расстоянии порядка 1,5 м и  $K_{\text{доп}} = 50$  км/ч получен  $m \gg 0,108$  с. В то же время граничная частота спектра помехи имеет величину порядка сотен герц, поэтому  $R(\tau) \ll 0$ . Таким образом, зафиксированные в один и тот же момент времени (например,  $t = T_2$ ) значения процессов на выходах СФ21 и СФ22 не коррелированы, а так как они гауссовские - то и независимы. Величина  $E\{i_2^2(\tau)\}$  - это дисперсия помехи на

выходе СФ21, а она, ввиду идентичности АЧХ всех фильтров (от СФ11 до СФ33), совпадает с дисперсией процесса  $n_A(t)$  на выходе СФ11, поэтому

$$E\{n^2(t)\} = 2cr^2_A = 16N^2 t_d. \quad (4.94)$$

Ввиду той же идентичности АЧХ субфильтров, дисперсии процессов на выходах СФ21 и СФ22 одинаковы и равны соответственно

$$a^2 = 0,5E\{I_2^2\} = 8W_0 A_{rf}; \quad (4.95)$$

$$= \sigma_A^2 = 8N_0 M_d. \quad (4.96)$$

Знания соотношений (4.90), (4.95) и (4.96), как будет показано ниже, достаточно для расчета  $P_{out}$ .

Теперь рассмотрим величину  $Y_3$  при наличии на выходе датчика сигнала (4.83). Подставив (4.34) в (4.83), а (4.83) в (4.82), получим

$$Y_3 = -\frac{\sqrt{\pi}(A^2 + \sigma_a^2)}{8\sqrt{2}}(C_{11} - C_{12} + C_{21} - C_{22} + C_{31} - C_{32}) + \quad (4.97)$$

$$+ \frac{A\sqrt{\pi}}{4} \left[ \int_{T_1}^{T_2} a \cdot e^{-\theta^2(t-t_d)^2} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^3 \operatorname{Re} f_i(t) \right\} dt + \int_{T_1}^{T_2} n(t) \cdot \left\{ \sum_{i=1}^3 \operatorname{Re} f_i(t) \right\} dt \right].$$

Сначала вычислим первый интеграл в квадратных скобках. Для этого рассмотрим поведение суммы опорных функций, заключенной в фигурные скобки. Чтобы получить график ее зависимости от времени, необходимо к графику, изображенному на рис. 4.7, прибавить опорную функцию вида, представленного на рис. 4.6, смещенную на  $2m$  в сторону запаздывания. Импульс полезного сигнала короток и располагается в интервале времени, в течение которого  $(\tau) \ll Re \ll 2$ , т.е. не перекрывается  $Re/2(\tau)$  и  $Re/3(\tau)$ . Поэтому величина первого интеграла в (4.97) практически равна величине первого интеграла в выражении (4.84)

$$\text{Re}/,(<)p< = \wedge. \quad (4.98)$$

Отмеченное выше отсутствие перекрытия 5Д/) с  $\text{Re } f_2(t)$  и  $\text{Re}/_3(z)$  означает, что в момент времени  $t = T_2$  полезного сигнала на выходах СФ32 и СФ33 (рис. 4.5) нет.

Теперь рассмотрим второй интеграл в выражении (4.97). Как показано в п. 4.2., эта математическая операция эквивалентна линейной фильтрации процесса  $n(t)$  фильтром СФЗ (см. рис. 4.2). Аналогично тому, как это было сделано при рассмотрении  $Y_2$ , можно показать, что случайные величины  $n_{Aи} n_c(m_2^\wedge$  независимы и что дисперсия процессов  $n_A(t)$ ,  $n_B(t)$  и  $n_c(t)$  на выходах субфильтров соответственно СФ31, СФ32 и СФ33 равна

$$\wedge_l = \wedge^2 \sigma = \wedge^2 c = \quad . \quad (4.99)$$

Знания соотношений (4.98) и (4.99) также достаточно для расчета  
*P*  
*\* ош.г*

Итак, найдены некоторые из вероятностных характеристик процессов в каналах рассматриваемого устройства. При этом выяснено, что значения поисковых процессов на выходах субфильтров (с СФ11 по СФ33), зафиксированные в один и тот же момент времени, независимы, имеют нулевое математическое ожидание и одинаковую дисперсию. Сигнальные же составляющие в момент окончания наблюдения  $t = T_2$  присутствуют только на выходах СФ11, СФ21 и СФ31 (они также равны между собой). Их величины являются математическими ожиданиями суммарных процессов на выходах каждого из субфильтров. С учетом вновь полученных результатов конкретизируем выражение для входящей в базовую формулу (4.75) совместной плотности вероятности  $p|y_o, \wedge, Y_2, K_31$ .

Прежде всего отметим, что ввиду соблюдения условия (4.79)  $Y_0 = 0$ , искомую плотность вероятности можно переписать как

$$p(r_0, Y_1, Y_2, Y_3) = s(Y_1) \cdot p(Y_1, Y_2, Y_3), \quad (4.100)$$

где  $\delta(x)$  - дельта-функция Дирака.

Теперь необходимо найти выражение, описывающее совместную плотность  $p(Y_1, Y_2, Y_3)$ . Сразу отметим, что случайные величины  $Y_1, Y_2$  и  $Y_3$  зависимы, хотя бы потому, что содержат в качестве слагаемого одни и те же значения случайного процесса  $n_A(t)$ , действующего на выходах СФ11, СФ21 и СФ31. Таким образом, хотя все случайные компоненты величин  $Y_1, Y_2$  и  $Y_3$  являются гауссовскими и, следовательно, сами  $Y_1, Y_2$  и  $Y_3$  - тоже гауссовские, априорно утверждать, что и  $p(Y_1, Y_2, Y_3)$  является трехмерной гауссовской плотностью вероятности нельзя [8,133]. Выражение для  $p(Y_1, Y_2, Y_3)$  следует получить формальным путем. Для этого поступим следующим образом. Обозначим мгновенные значения выходных сигналов субфильтров СФП, СФ21, СФ31 (напомним, что эти субфильтры полностью идентичны) в момент  $t = T_2$  как  $z_A$ :

$$z_A = \dots \quad (4.101)$$

Обозначим также мгновенные значения выходных сигналов субфильтров СФ22 и СФ3 2 (они также полностью идентичны) в момент  $t = T_2$  как  $z_B$ :

$$z_B = n_{22}(T_2). \quad (4.102)$$

Наконец, мгновенное значение выходного сигнала СФ33 в момент  $t = T_2$  обозначим как  $z_C$ :

$$z_C = \dots \quad (4.103)$$

Как показано выше, значения  $n_A(t)$ ,  $n_B(t)$  и  $n_C(t)$  - независимые гауссовские случайные величины, поэтому  $z_A$ ,  $z_B$  и  $z_C$  также независимые гауссовские случайные величины, которым соответствуют следующие плотности вероятности:

$$p_{z_A}(z_A) = \frac{1}{\sigma_A \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{z_A^2}{2\sigma_A^2}\right\} \quad (4.104)$$

$$p_{z_B}(z_B) = \frac{1}{\sigma_B \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{z_B^2}{2\sigma_B^2}\right\} \quad (4.105)$$

Ввиду независимости  $z_A$ ,  $z_B$  и  $z_C$ , их совместная плотность вероятности такова:

$$p_{z_A z_B z_C}(z_A, z_B, z_C) = p_{z_A}(z_A) \cdot p_{z_B}(z_B) \cdot p_{z_C}(z_C). \quad (4.106)$$

В момент  $t = T_2$  выходной сигнал СФ1 есть  $z_A$ , выходной сигнал СФ2 есть  $z_A + z_B$ , а выходной сигнал СФ3 есть  $z_A + z_B + z_C$ . В результате получим

$$Y_1 = \frac{A\sqrt{\pi}}{4} \cdot Z_A + \frac{\sqrt{\pi}(A^2 + \sigma_a^2)}{8\sqrt{2}} (C_{11} - C_{12}). \quad (4.107)$$

Введем обозначения:

$$d_1 = \frac{A\sqrt{\pi}}{4}; \quad (4.108)$$

$$g = \frac{4\pi(A^2 + \sigma_a^2)}{8\sqrt{2}} \quad (4.109)$$

С их учетом,

$$Y_1 = d_1 z_A + g. \quad (4.110)$$

Аналогичным образом

$$\Gamma_T = \dots + z_{,,}) - A_s^{\wedge a o} (C_n - C_{II} + C_{2i} - C_H) = d_{iZ_A} + d_{iZ_B} - g_{,,} \quad (4.1\Pi)$$

где

$$g_2 = \frac{\sqrt{\pi}(A^2 + \sigma_a^2)}{\sigma \sqrt{\pi}} (C_{11} - C_{12} + C_{21} - C_{22}). \quad (4.112)$$

Наконец,

$$Y_3 = \frac{A\sqrt{\pi}}{4} (z_A + z_B + z_C) - \frac{\sqrt{\pi}(A^2 + \sigma_a^2)}{8\sqrt{2}} (C_{11} - C_{12} + C_{21} - C_{22} + C_{31} - C_{32}) = \quad (4.1\Pi 3)$$

$$- d_{iZ_A} + t_{Zj} Zg_H - d_{iZ_C} s$$

где

$$g_3 = \frac{\sqrt{\pi}(A^2 + \sigma_a^2)}{8\sqrt{2}} (C_{11} - C_{12} + C_{21} - C_{22} + C_{31} - C_{32}). \quad (4.114)$$

Имея целью найти выражение для  $t^?(^, Y_2, Y_3)$ , мы пришли к задаче: известна совместная плотность вероятности  $f_z(z^A, z^B, z^C)$ , необходимо найти совместную плотность вероятности случайных величин  $Y_1, Y_2$  и  $Y_3$ , если они связаны с  $z_A, z_B$  и  $z_C$  соотношениями (4.110), (4.111) и (4.113).

Для решения этой задачи применим теоретический аппарат расчета плотности вероятности при функциональных преобразованиях случайных величин [16]. Перепишем (4.110), (4.111) и (4.113) в таком виде:

$$z_A = \dots \quad (4.115)$$

$$z_A z_B = (\dots)^2 \quad (4.116)$$

$$z_A + z_C = (\dots) \quad (4.117)$$

Находим обратные функции, выражающие  $z_A, z_B$  и  $z_C$  через  $Y_1, Y_2, Y_3$ . Первой из этих функций является выражение (4.115). Затем, подставив (4.115) в (4.116), получаем

<4.118)

Из (4.117) получаем

$$z_c + z_B) = -\frac{1}{d_1} Y_2 + \frac{1}{d_1} Y_3 + \frac{g_3 - g_2}{d_x} \quad (4.119)$$

Вычисляем элементы якобиана преобразования переменных:

$$\begin{aligned} \frac{dY_x}{dY_2} &= \frac{1}{d_x}, \quad \frac{dY_2}{dY_3} = 0, \quad \frac{dY_3}{dY_x} = 0, \\ \frac{dz_K}{dY_2} &= \frac{1}{d_x}, \quad \frac{dz_R}{dY_3} = 0, \quad \frac{dz_r}{dY_x} = 0, \\ \frac{dz_Q}{dY_3} &= \frac{1}{d_x} \end{aligned}$$

Якобиан преобразования переменных равен

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{d_x} & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{1}{d_x} \end{vmatrix} = \frac{1}{d_x} \quad (4.120)$$

Тогда, согласно [16], искомая плотность вероятности получается

$$p_{Y^1}(\mathbf{r}, \mathbf{g}) = \left( -\frac{1}{d_1} Y_1 + \frac{1}{d_1} Y_2 + \frac{g_2 - g_1}{d_1} Y_3 + \frac{g_3 - g_2}{d_x} \right) \quad (4.121)$$

В силу соотношения (4.106) получаем

$$p(Y_1, Y_2, Y_3) = \frac{1}{d_1^3} \cdot p_{ZA} \left( \frac{Y_1}{d_1} + \frac{g_1}{d_1} \right) \cdot p_{ZB} \left( -\frac{1}{d_1} Y_1 + \frac{1}{d_1} Y_2 + \frac{g_2 - g_1}{d_1} Y_3 + \frac{g_3 - g_2}{d_x} \right) \quad (4.122)$$

Подстановка обратной функции (4.115) в выражение (4.104) для плотности вероятности  $p_u(z_A)$  дает

$$P_{ZA} \left( \frac{Y_1}{d_1} + \frac{g_1}{d_1} \right) \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_A} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_A^2} \left( \frac{4a\sqrt{\pi}}{\theta d_1} \right) Y_1 + \frac{2a4\pi'}{\theta d_1} \right\} \quad (4.123)$$

Аналогичная подстановка (4.118) в (4.105) дает

$$P_{ZB} \left( -\frac{1}{d_1} Y_1 + \frac{1}{d_1} Y_2 + \frac{g_2 - g_1}{d_1} \right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_A} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_A^2} \left[ \frac{Y_1^2}{d_1^2} + \frac{Y_2^2}{d_1^2} + \frac{(g_2 - g_1)^2}{d_1^2} - \frac{2}{d_1^2} Y_1 Y_2 + \frac{2(g_2 - g_1)}{d_1^2} Y_2 - \frac{2(g_2 - g_1)}{d_1^2} Y_1 \right] \right\} \quad (4.124)$$

Наконец, подстановка (4.119) в (4.105) дает

$$P_{ZC} \left( \frac{Y_1}{d_1} + \frac{g_1}{d_1} \right) \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_A} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_A^2} \left[ \frac{Y_1^2}{d_1^2} + \frac{Y_2^2}{d_1^2} + \frac{(g_2 - g_1)^2}{d_1^2} - \frac{2}{d_1^2} Y_1 Y_2 + \frac{2(g_2 - g_1)}{d_1^2} Y_2 - \frac{2(g_2 - g_1)}{d_1^2} Y_1 \right] \right\} \quad (4.125)$$

После объединения трех последних выражений в соответствии с соотношением (4.122) и приведения подобных членов в показателе экспоненты получим искомую совместную плотность вероятности

$$P_{ZAC} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_A} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_A^2} \left[ \frac{Y_1^2}{d_1^2} + \frac{Y_2^2}{d_1^2} + \frac{(g_2 - g_1)^2}{d_1^2} - \frac{2}{d_1^2} Y_1 Y_2 + \frac{2(g_2 - g_1)}{d_1^2} Y_2 - \frac{2(g_2 - g_1)}{d_1^2} Y_1 \right] \right\} \quad (4.126)$$

Теперь вернемся к расчетному соотношению (4.75) с учетом соотношения (4.100):

$$P_{ZAC} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_A} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_A^2} \left[ \frac{Y_1^2}{d_1^2} + \frac{Y_2^2}{d_1^2} + \frac{(g_2 - g_1)^2}{d_1^2} - \frac{2}{d_1^2} Y_1 Y_2 + \frac{2(g_2 - g_1)}{d_1^2} Y_2 - \frac{2(g_2 - g_1)}{d_1^2} Y_1 \right] \right\} \quad (4.127)$$

Если  $Y_j < 0$ , то, с учетом свойств  $\hat{\Lambda}$ -функции, имеем  $\lim_{y_0 \rightarrow -\infty} j(y_0) = 0$  и, как следствие,  $P_{оул} = 1$ . В этом случае на входе решающего устройства имеется, по крайней мере, один сигнал ( $Y_0 = 0$ ) больший, чем  $\sigma$ , хотя заранее известно, что наблюдается тележка с одной колесной парой. В результате решающее устройство обязательно вынесет решение  $L_0$  при заранее известном правильном решении  $L$ . В силу этих соображений в выражении (4.127) следует исключить из области интегрирования по полуось  $(-\infty, 0)$ :

$$P_{оул} = 1 - \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} p(Y_1, Y_2, Y_3) dY_2 dY_1 \quad (4.128)$$

Подстановка сюда выражения (4.126) для  $p(i; \Gamma_2, Y_3)$  дает искомую формулу для вычисления  $P_{оул}$ . Однако аналитическое интегрирование плотности вероятности (4.126) не приводит к обозримым результатам, поэтому в дальнейшем расчетах следует прибегнуть к численному интегрированию.

**Расчет  $P_{оул 2}$ .** В рассматриваемой ситуации мимо датчика проходит двухосная тележка, т.е., согласно (4.1), выходной сигнал датчика есть

$$x(t) = a - s_2(t) + n(t) = a - e^{-\sigma t} + a - e^{-\sigma t} + n(t) \quad (4.129)$$

Подставив (4.34) в (4.129), а (4.129) в (4.80), получим

$$Y_1 = -\frac{\sqrt{\pi}(A^2 + \sigma_a^2)}{8\sqrt{2}}(C_{11} - C_{12}) + \frac{A\sqrt{\pi}}{4} \frac{ae^{-\sigma t}}{m} - \operatorname{Re} \int_0^{\infty} \frac{f_x(t)}{J_2} dt + J_2 \operatorname{Re} \int_0^{\infty} \dots \quad (4.130)$$

Рис. 4.5 иллюстрирует взаимное положение полезного сигнала  $s_2(t)$  и опорной функции  $Ref_1(t)$ . Видно, что каждый из первых двух интегралов выражения (4.130) совпадает по величине с интегралом (4.85). Поэтому

$$J a e^{-\epsilon^2 \Lambda^2} + \dots = \dots \quad (4.131)$$

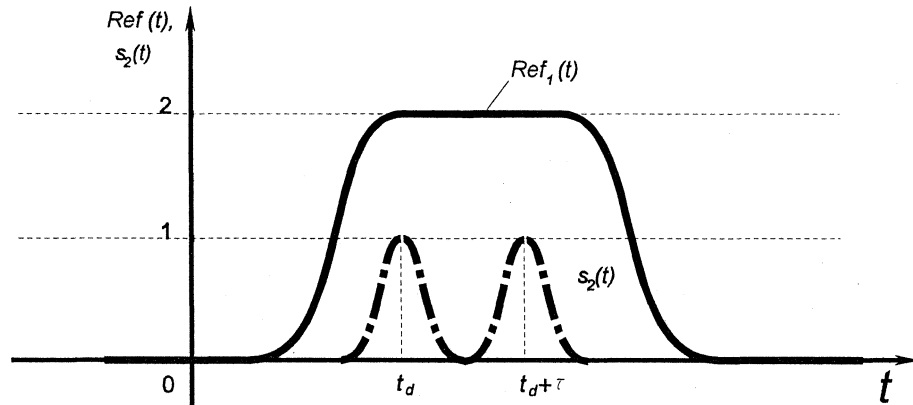


Рис. 4.5. Взаимное положение полезного сигнала  $s_2(z)$  и функции  $Ref_1(t)$

В то же время, последнее слагаемое в квадратных скобках выражения (4.130) совпадает с последним слагаемым выражения (4.84). Оно является гауссовской случайной величиной с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, определяемой соотношением (4.88).

Обозначим, как и при расчете  $P_{0И(1)}$ , величину выражения в квадратных скобках формулы (4.130) как  $z_A$ . Это результат прохождения сигнала (4.129) через субфильтр СФ11, составляющий согласованный фильтр СФ1 (рис. 4.2). Случайная величина  $z_A$  гауссовская, она имеет, согласно (4.131), математическое ожидание

$$- 4a > \Gamma_{\pi} / \epsilon \quad (4.132)$$

и, согласно (4.88), дисперсию

$$= SN_0 \& d. \tag{4.133}$$

Теперь рассмотрим величину  $Y_2$  при наличии на выходе датчика сигнала (4.129). Подставив (4.34) в (4.129), а (4.129) в (4.81), получим

$$\begin{aligned}
 Y_2 = & -\frac{\sqrt{\pi}(A^2 + \sigma_a^2)}{\sigma \sqrt{\pi}} (C_{11} - C_{12} + C_{21} - C_{22}) + \\
 & + \frac{A\sqrt{\pi}}{4} \left[ \int_{T_1}^{T_2} a \quad \{ \text{Re } f_1(t) + \text{Re } f_2(t) \} dt + \right. \\
 & \left. + J_n \cdot \int_{T_1}^{T_2} \{ \text{Re } f_1(t) + \text{Re } f_2(t) \} dt \right]
 \end{aligned} \tag{4.134}$$

Рис. 4.6 иллюстрирует взаимное положение полезного сигнала  $s_2(t)$  и суммы  $\{ \text{Re } f_1(t) + \text{Re } f_2(t) \}$  опорных функций. Напомним, что наличие в выражении (4.134) этой суммы означает, что в частотной области обработка производится субфильтрами СФ21 и СФ22.

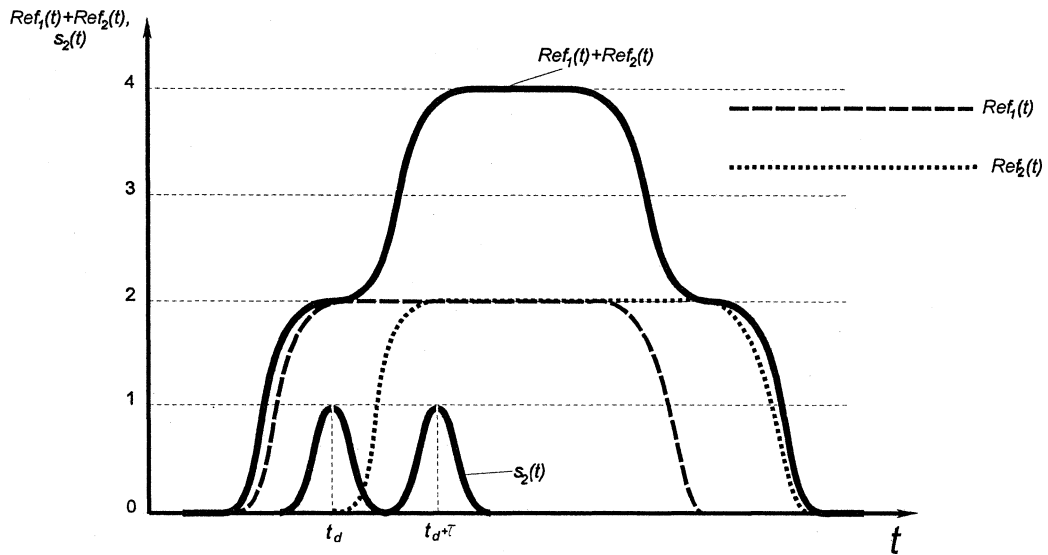


Рис. 4.6. Взаимное положение полезного сигнала  $s_2(t)$  и суммы  $\{ \text{Re } f_1(t) + \text{Re } f_2(t) \}$  опорных функций

Первый интеграл в квадратных скобках выражения (4.134) связан с первым импульсом сигнала  $s_2(t)$ , полностью совпадает с выражением (4.90) и поэтому равен  $\sigma^2 / \epsilon$ . Второй интеграл - это результат интегрирования функции  $\exp - \epsilon^l (t - t_d - \Gamma)^2$  находящейся в области, где  $\{ \text{Re} f_2(\Gamma) + \text{Re} f_2(\Gamma) \} \gg 4$ , поэтому второй интеграл в два раза больше первого и равен  $2\sigma^2 / \epsilon$ . В итоге первые два слагаемых в квадратных скобках выражения (4.134) дают величину

$$Q_{ii} \approx \frac{6\sigma^2 \epsilon}{\epsilon} \quad (4.135)$$

В то же время последнее слагаемое выражения (4.134) полностью совпадает с последним слагаемым выражения (4.89). Оно является гауссовской случайной величиной с нулевым математическим ожиданием и с дисперсией, определяемой выражением (4.94). Обозначим, как и при расчете  $P_{\text{ош1}}$ , величину суммы в квадратных скобках выражения (4.134) как  $(z_A + z_B)$ . Она есть результат прохождения сигнала (4.129) через фильтр СФ2 (рис. 4.2), зафиксированный при  $t = T_2$ . Случайная величина  $(z_A + z_B)$  - гауссовская, она имеет, согласно (4.135), математическое ожидание

$$m_{zAB} \approx \frac{6\sigma^2 \epsilon}{\epsilon} / 0 \quad (4.136)$$

и, согласно (4.94), дисперсию

$$\sigma_{zAB}^2 = 167 \sigma^2 \epsilon \Gamma^2. \quad (4.137)$$

Как распределены эти суммарные математическое ожидание и дисперсия между выходами  $z_A$  субфильтра СФ21 и  $z_B$  субфильтра СФ22? Как уже было показано, значение помехи  $n_A(m_2)$  и  $n_B(T_2)$  на выхо-



$$\begin{aligned}
 Y_3 = & -\frac{\sqrt{\pi}(A^2 + \sigma_a^2)}{\sigma \sqrt{\pi}} (C_{11} - C_{12} + C_{21} - C_{22} + C_{31} - C_{32}) + \\
 & + \frac{A\sqrt{\pi}}{4} \int_{t_1}^{t_2} a \cdot e^{\dots} \left\{ \sum_{i=1}^3 \operatorname{Re} f_i(t) \right\} dt \tag{4.143}
 \end{aligned}$$

Рис. 4.7 иллюстрирует взаимное положение полезного сигнала

$s_2(t)$  и суммы  $\sum_{i=1}^3 \operatorname{Re} f_i(t)$  опорных функций. Поскольку импульсы полезного сигнала практически полностью расположены на участках, где  $\operatorname{Re} f_i(t) = 0$ , то наличие этой опорной функции в общей сумме практически не оказывает влияния на величину суммы первых двух слагаемых в квадратных скобках выражения (4.143). Эта сумма не отличается от той, что получена при расчете  $Y_2$ , т.е. совпадает с выражением (4.136)

$$\text{и } -022 - \text{ба-Тіт} / \sigma. \tag{4.144}$$

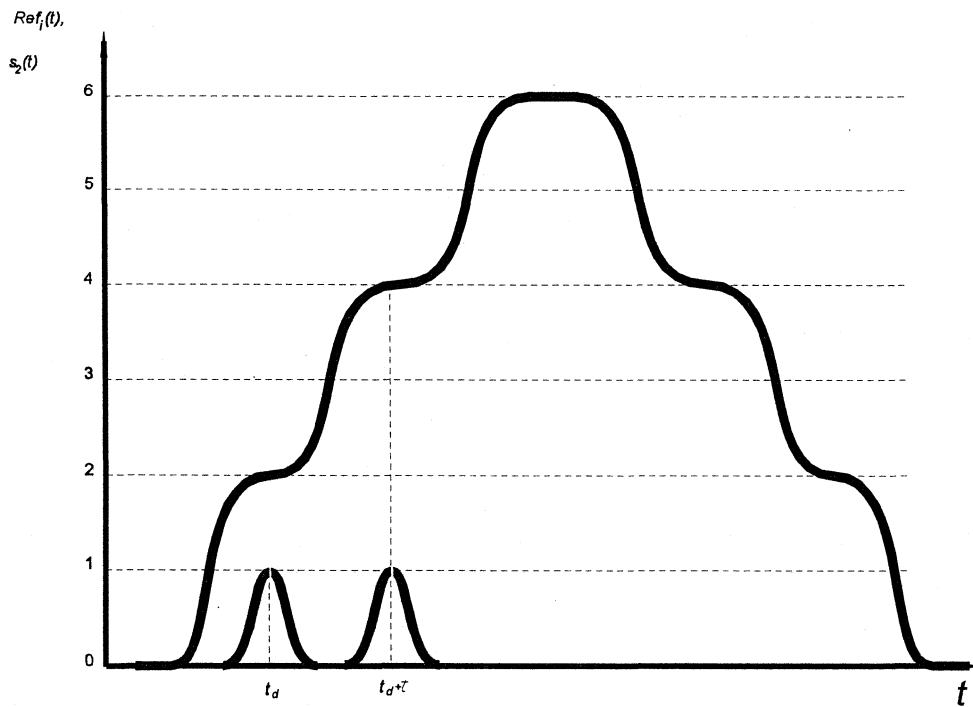


Рис. 4.7. График суммы  $\sum_{i=1}^3 \operatorname{Re} f_i(t)$  опорных функций

В то же время, последнее слагаемое в квадратных скобках выражения (4.143) полностью совпадает с последним слагаемым выражения (4.97). Оно является гауссовской случайной величиной с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, равной утроенной дисперсии величины  $n_A(m_2)$ . Обозначим, как и при расчете  $P_{out}$ , величину суммы в квадратных скобках выражения (4.143) как  $(z_A + z_B + z_C)$ . Она есть результат прохождения сигнала (4.129) через фильтр СФЗ, зафиксированный при  $t = T_2$ . Случайная величина  $(z_A + z_B + z_C)$  - гауссовская, она имеет математическое ожидание

$$M_{z_{ABC}} = 0 \quad (4.145)$$

и дисперсию

$$\sigma_{z^2} = 3\sigma_j^2 = 24N_0 \quad (4.146)$$

Как распределены эти суммарные математическое ожидание и дисперсия между выходными величинами  $z_A$  субфильтра СФЗ 1,  $z_B$  субфильтра СФЗ 2 и  $z_C$  субфильтра СФЗ3? При расчете  $P_{out}$  уже показано, что значения помех  $n_A(m_2)$ , и  $p_c(t_2)$  на выходах этих субфильтров независимы, а потому, в силу идентичности АЧХ всех субфильтров, дисперсии этих помех, а значит и величин  $z_A$ ,  $z_B$  и  $z_C$ , одинаковы

$$\sigma_{z_A}^2 = \sigma_{z_B}^2 = \sigma_{z_C}^2 = 8V_0 \quad (4.147)$$

Найдем математические ожидания сигналов на выходах фильтров СФЗ1, СФЗ2 и СФЗ3 при  $t = T_2$ . Так как с  $Re/3(r)$  не перекрывается ни один из импульсов сигнала  $s_2(t)$ , то ситуация сводится к уже рассмотренной для СФЗ2, при этом на выходе субфильтра СФЗ3 при  $t = T_2$  имеет место только помеха

$$z_C = n_c(t_2), \quad (4.148)$$

а  $z_A$  и  $z_B$  описываются соответственно соотношениями (4.141) и (4.142).

Поэтому плотности вероятности величин  $z_A$ ,  $z_B$  и  $z_C$  записываются следующим образом:

(4.149)

$$p_{z_B}(z_B) = \frac{1}{L/2L'c\Gamma_L} \exp\left\{-\frac{z_B^2}{2\sigma_A^2}\right\} \quad (4.150)$$

$$p_{z_C}(z_C) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_A} \exp\left\{-\frac{z_C^2}{2\sigma_A^2}\right\} \quad (4.151)$$

Чтобы получить аналитическое описание трехмерной плотности вероятности  $p(z_A, z_B, z_C)$ , подставим (4.149)-(4.151) в выражение (4.122) и, после простых алгебраических преобразований, придем к искомому выражению

$$p(z_A, z_B, z_C) = \frac{1}{(\sigma_A d_1 \sqrt{2\pi})^3} \exp\left\{-\frac{z_A^2 + z_B^2 + z_C^2}{2\sigma_A^2}\right\} \exp\left\{-\frac{2a\sqrt{\pi}}{\theta} z_A z_B\right\} \exp\left\{-\frac{2a\sqrt{\pi}}{\theta} z_B z_C\right\} \exp\left\{-\frac{2a\sqrt{\pi}}{\theta} z_A z_C\right\} \quad (4.152)$$

Теперь вернемся к расчетному соотношению (4.75) с учетом соотношения (4.100)

$$I \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(z_A, z_B, z_C) dz_A dz_B dz_C,$$

По тем же соображениям, что и при выводе выражения (4.128), последнее выражение преобразуется к виду

$$\int_{-\infty}^{\infty} Y_2 U_{pfy} \cdot y \cdot y^{\wedge} dy, \quad (4.153)$$

Подстановка сюда выражения (4.152) дает искомую формулу для вычисления  $P_{ош 2}$ . Однако, аналитическое интегрирование плотности вероятности (4.152) не приводит к обозримым результатам, поэтому в дальнейших расчетах следует прибегнуть к численному интегрированию.

**Расчет  $P_{ош 3}$ .** В рассматриваемой ситуации мимо датчика проходит трехосная тележка, т.е., согласно (4.1), выходной сигнал датчика есть

$$x(t) = a \cdot s_3(t) + n(t) = a \cdot e^{-\varepsilon \wedge^{\wedge} d \wedge} + a \cdot e^{-\varepsilon} + a \cdot e^{s \wedge^{\wedge} 2m \wedge} + n(t). \quad (4.154)$$

Подставив (4.154) в (4.151) а (4.154) в (4.80) получим

$$Y_1 = -\frac{\sqrt{\pi}(A^2 + \sigma_a^2)}{8\sqrt{2}}(C_{11} - C_{12}) + \frac{A\sqrt{\pi}}{4} \left[ \int_{T_1}^{T_2} a \cdot e^{-\varepsilon} \cdot e^{-\varepsilon} \cdot e^{-\varepsilon} dt + \int_{T_1}^{T_2} a \cdot e^{-\varepsilon} \cdot e^{-\varepsilon} \cdot e^{-\varepsilon} dt + \int_{T_1}^{T_2} a \cdot e^{-\varepsilon} \cdot e^{-\varepsilon} \cdot e^{-\varepsilon} dt \right] + \int_{T_1}^{T_2} j \langle (f) - Re /_1(r) j / . \quad (4.155)$$

Рис. 4.8 иллюстрирует взаимное положение полезного сигнала и опорной функции  $Re /_3 (\gamma)$ . Поскольку эта опорная функция перекрывается во времени со всеми тремя импульсами полезного сигнала, то каждый из первых трех интегралов в (4.155) равен, как и при выводе (4.85), величине  $/_6$ . Тогда сумма этих трех интегралов есть

$$\langle 2_{31} = 6a4l /_6. \quad (4.156)$$

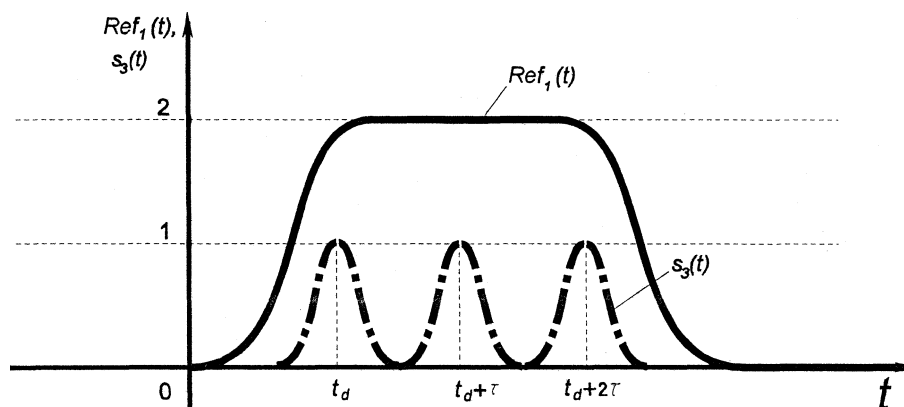


Рис. 4.8. Графики полезного сигнала и опорной функции Ре/Дг)

В то же время последний интеграл в выражении (4.155) совпадает с последним интегралом выражения (4.84). Его числовое значение представляет собой гауссовскую случайную величину с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, определяемой соотношением (4.88).

Обозначим, как и при расчете  $P_{outA}$ , величину выражения в квадратных скобках формулы (4.155) как  $z_A$ . Это результат прохождения сигнала (4.154) через фильтр СФ1. Случайная величина  $z_A$  - гауссовская, она имеет, согласно (4.156), математическое ожидание

$$7w_{zA} = 6aV^{\wedge} / \# \quad (4.157)$$

и, согласно (4.88), дисперсию

$$\wedge = 87U_0L^{\wedge}. \quad (4.158)$$

Теперь рассмотрим величину  $U_2$  при наличии на выходе датчика сигнала вида (4.154). Подставив (4.34) в (4.154), а (4.154) в (4.81), получим

$$\begin{aligned}
 & 4 \int_{L_1}^T a \cdot e^{-61t' - A2} \{Re / \} (0 + Re /_2 (t)) dt + \\
 & + fa \cdot \{Re \text{ Л } 0 + Re /_2 (t)\} dt + \\
 & + p \cdot e^{m \cdot 2(\dots) \sim 2r)2} \cdot \{Re /_1 0 + Re /_2 0 H + j \ll 0 - \{Re /_i (O + Re /_2 0)\}^m \}^{\wedge}
 \end{aligned}
 \tag{4.159}$$

Рис. 4.9 иллюстрирует взаимное положение опорного сигнала  $s_3(t)$  и суммы  $\{Re /_1(t) + Re /_2(t)\}$  опорных функций. Наличие в выражении (4.159) этой суммы означает, что в частотной области эквивалент интегрирования представляет собой обработку сигнала  $x(t)$  согласованным фильтром СФ2 (рис. 4.2).

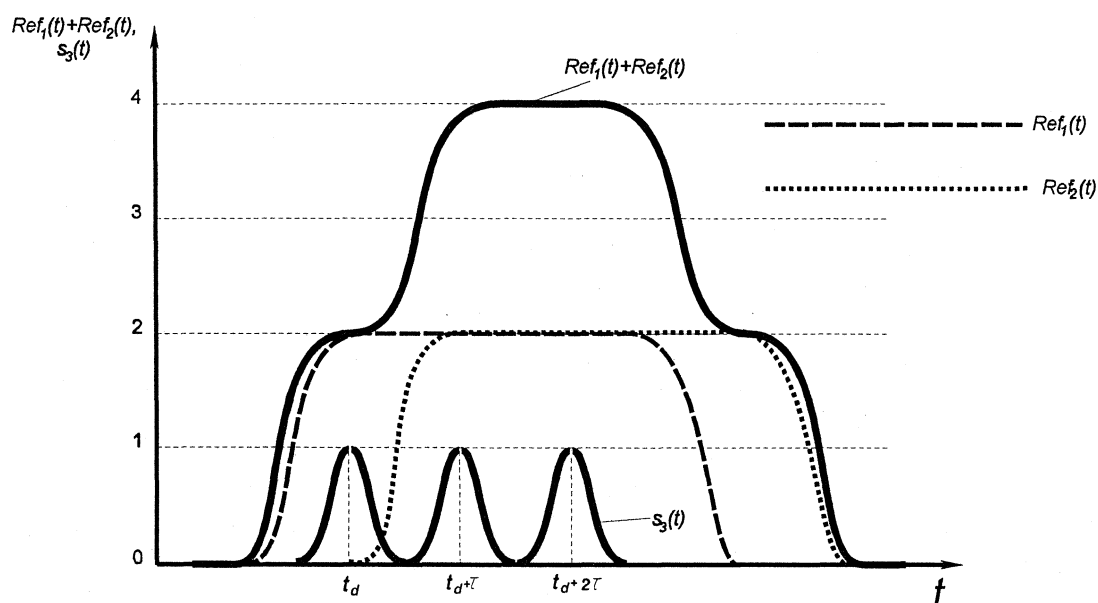


Рис. 4.9. Графики опорного сигнала  $s_3(t)$  и суммы  $\{Re /_1(t) + Re /_2(t)\}$

Первые два интеграла в квадратных скобках выражения (4.159) полностью совпадают с первыми двумя интегралами выражения (4.134)

и поэтому их сумма равна величине  $Q_{22}$ , определенной соотношением (4.135). Третье слагаемое - это результат интегрирования функции  $\exp[-\theta^2(t-t_d - 2\tau)]$ , расположенной в области, где  $\{Re/](r) + Re/2(r)\} \ll 4$ . Поэтому этот результат будет в два раза больше, чем (4.85) и равен  $4a4л / <9$ . В итоге первые три слагаемые в квадратных скобках выражения (4.159) дают

$$Q_{32} = iOaJn I в. \quad (4.160)$$

Последнее слагаемое выражения (4.159) полностью совпадает с последним слагаемым выражения (4.89). Оно является гауссовской случайной величиной с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, определяемой соотношением (4.94). Обозначим, как и при расчете  $P_{ошA}$ , величину суммы в квадратных скобках выражения (4.159) как  $(z_A + z_B)$ . Она представляет собой зафиксированный в момент  $t = T_2$  результат прохождения сигнала (4.154) через согласованный фильтр СФ2. Случайная величина  $(z_A + z_B)$  - гауссовская с математическим ожиданием

$$m_{ZAB} \sim Q_{32} = \quad / 0 \quad (4.161)$$

и дисперсией

$$a^2 = 16N_0 \wedge t_d. \quad (4.162)$$

Как распределены эти суммарные математическое ожидание и дисперсия между выходными величинами  $z_A$  субфильтра СФ21 и  $z_B$  субфильтра СФ22? Как уже показано, значения помехи  $n_A(m_2)$  и  $n_B(m_2)$  на выходах этих субфильтров при  $t = T_2$  независимы, поэтому, ввиду идентичности АЧХ этих субфильтров, дисперсии этих помех одинаковы

$$(m_A = crj = c2 / 2 = 8N_0At_d. \quad (4.163)$$

Найдем математические ожидания сигналов на выходах субфильтров СФ21 и СФ22 при  $t = T_2$ . Так как обработке в СФ21 соответствует в выражении (159) интегрирование произведения сигнала  $s_3(t)$  с опорной функцией  $\text{Re}/!(0$  и с этой функцией перекрываются все три импульса (см. рис. 4.9), то в момент  $t = T_2$  на выходе СФ21 имеем

$$\text{Re}/_301 = 6aV^{\wedge}/0. \quad (4.163)$$

Обработке в СФ22 соответствует в выражении (4.159) интегрирование произведения сигнала  $s_3(t)$  с опорной функцией  $\text{Re}/_2(/)$ , а с этой функцией перекрывается только второй и третий импульсы этого сигнала. Поэтому в момент  $t = T_2$  на выходе СФ22 имеем

$$j e^{\varepsilon} \cdot \text{Re} f_2(t) + e^{\varepsilon \wedge \sim a^{2r}} \cdot \text{Re}/_20]^{\wedge} = 4a7\text{тг}/\varepsilon. \quad (4.164)$$

В результате, в указанный момент времени имеют место следующие равенства:

$$6<\text{Яд}/\text{я} \quad + n_A (\wedge 2 ) > \quad (4.165)$$

$$+ n_{\varepsilon} \{ \wedge 1 \} \quad (4.166)$$

где  $n_A(m_2)$  и  $n_{\varepsilon}(m_2)$  взаимно независимы, имеют нулевые математические ожидания и дисперсии, определяемые соотношением (4.163).

Теперь рассмотрим величину  $Y_3$  при наличии на выходе датчика сигнала (4.154). Подставив (4.34) в (4.154), а (4.154) в (4.82), получим

$$\begin{aligned}
Y_3 = & -\frac{\sqrt{\pi}(A^2 + \sigma_a^2)}{\sigma \sqrt{\pi}} (C_{11} - C_{12} + C_{21} - C_{22} + C_{31} - C_{32}) + \\
& \frac{A\sqrt{\pi}}{4} \left[ \int_{T_1}^{T_2} a \cdot e^{-\theta^2(t-t_d)^2} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^3 \operatorname{Re} f_i(t) \right\} dt \right. \\
& \int_a^{T_2} \left\{ \sum_{i=1}^3 \operatorname{Re} f_i(t) \right\} dt \quad \left. \int_{-1}^3 \operatorname{Re} Z(dk' + \right.
\end{aligned} \tag{4.167}$$

Рис. 4.10 иллюстрирует взаимное положение полезного сигнала  $s_3(t)$  и суммы  $\sum_{i=1}^3 \operatorname{Re} f_i(t)$  опорных функций. Первый импульс сигнала  $s_3(t)$  практически полностью расположен на участке, где  $2L\operatorname{Re}/0 \ll 2$ , второй - на участке, где  $\wedge \operatorname{Re}/(r) \ll 4$ , а третий - на участке, где  $\wedge \operatorname{Re}/XO \gg 6$ .

Поэтому сумма первых трех интегралов в выражении (4.167) равна

(4.168)

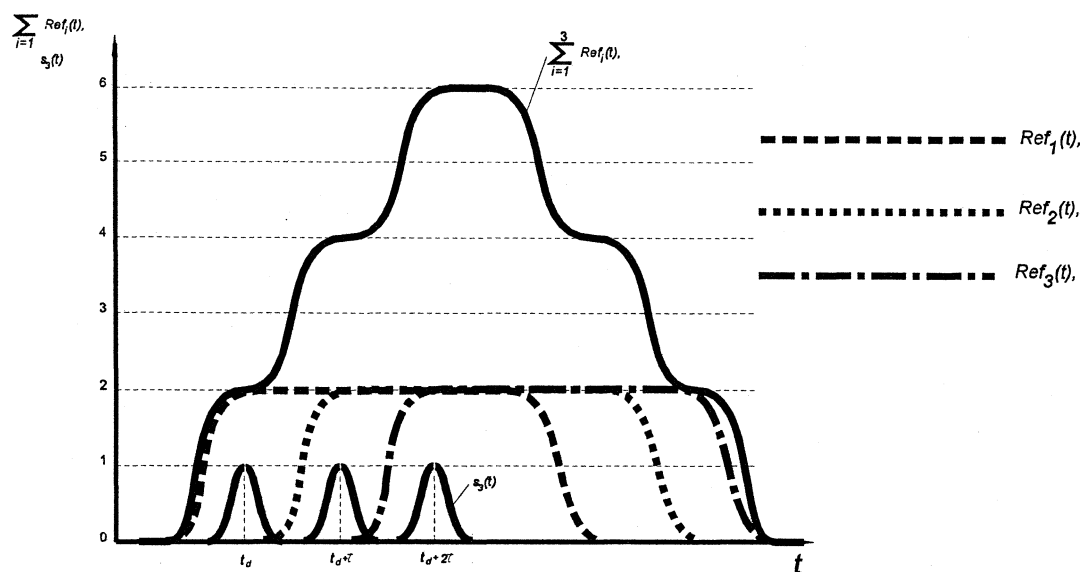


Рис. 4.10. Графики полезного сигнала  $s_3(t)$  и суммы

Последнее слагаемое в квадратных скобках в выражении (4.167) полностью совпадает с последним слагаемым выражения (4.97). Оно является гауссовской случайной величиной с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, определяемой соотношением (4.146). Обозначим, как и при расчете  $P_{out}$ , величину суммы в квадратных скобках выражения (4.167) как  $(z_A + z_B + z_C)$ . Она представляет собой зафиксированный в момент  $t = T_2$  результат прохождения сигнала (4.154) через согласованный фильтр СФЗ (рис. 4.2). Случайная величина  $(z_x + z_B + z_C)$  - гауссовская с математическим ожиданием

$$m_{zABC} = N_0 C_1 \sqrt{T} / \epsilon \quad (4.169)$$

и дисперсией

$$\langle T_3^2 \rangle = 24 N_0 M_d. \quad (4.170)$$

Как распределены эти суммарные математическое ожидание и дисперсия между выходными величинами  $z_A$  субфильтра СФЗ1,  $z_B$  субфильтра СФЗ2 и  $z_C$  субфильтра СФЗ3? При расчете  $P_{out}$ . Как уже показано, значения помех  $n_A^{HВ}(\wedge >)$  и  $i_c(\Gamma_2)$  на выходах соответственно субфильтров СФЗ1, СФЗ2 и СФЗ3 при  $t = T_2$  независимы, поэтому, ввиду идентичности АЧХ этих субфильтров, дисперсии указанных помех одинаковы

$$\sigma_j^2 = \sigma_T^2 = \sigma_{T_3}^2 / 3 = 8 N_0 A r_d. \quad (4.171)$$

Каковы математические ожидания сигналов на выходах СФЗ1, СФЗ2 и СФЗ3 в момент времени  $t = T_2$ ? Так как обработке в СФЗ1 соответствует в выражении (4.167) интегрирование произведения  $l_3(l)$  с опорной функцией  $\text{Re } f_x(t)$  и с этой функцией перекрывается все три импульса (см. рис. 4.10), то в момент  $t = T_2$  на выходе СФЗ 1 имеем



(4.178)

$$p_{z_B}(z_B) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_A} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_A^2}\left(z_B - \frac{4a\sqrt{\pi}}{\theta}\right)^2\right\}, \quad (4.179)$$

$$\text{vfc}^{\text{exp}} < \frac{1}{2^{\wedge}1} z_c \frac{2aV^{\wedge}-}{c \theta} \quad (4.180)$$

Чтобы получить аналитическое описание трехмерной плотности вероятности  $p(\wedge, Y_2, \Gamma_3)$ , подставим маргинальные плотности (4.178)-(4.180) в выражение (4.122) и, после простых алгебраических преобразований, придем к искомому выражению

$$p(Y_1, Y_2, Y) = \frac{1}{(\sigma_A d_1 \sqrt{2\pi})^3} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{\sigma_A^2 d_1^2} Y_1^2 - \frac{1}{2\sigma_A^2 d_1^2} Y_2^2 - \frac{1}{2\sigma_A^2 d_1^2} Y^2\right\} \cdot \frac{2a\sqrt{\pi}}{\theta} \exp\left\{-\frac{2a\sqrt{\pi}}{\theta} Y\right\} \quad (4.181)$$

Теперь вернемся к расчетному соотношению (4.75) с учетом соотношения (4.100)

$$\wedge, 3=1- \text{IdY, J f p}>(Y_0)X1\ddot{\text{Л}}^{\wedge} \text{H} . \quad (4.182)$$

По тем же соображениям, что и при выводе выражения (4.128), величина  $P_{\text{out } 3}$  представляется в виде

$$L_{\infty} = 1 - pK; \quad (4.183)$$

Подстановка сюда выражения (4.181) дает искомую формулу для вычисления  $P_{оиз}$ . Однако, аналитическое интегрирование плотности вероятности (4.181) не приводит к обозримым результатам, поэтому в дальнейших расчетах следует прибегнуть к численному интегрированию.

**Расчет  $P_{оиз}$ .** В соответствии с общими соотношениями (4.75) и (4.79) имеем

$$L_{\infty} = 1 - \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \dots \quad (4.184)$$

С учетом стробирующего свойства  $\xi$ -функции последнее выражение преобразуется к окончательному виду

$$L_{\infty} = 1 - \text{ГШи.Жл.} \quad (4.185)$$

Для получения аналитического описания  $p(\hat{Y}_2, K_3)$  нет необходимости проделывать все выкладки заново. Достаточно в любом из выражений (4.126), (4.152) или (4.181) положить  $a = 0$ :

$$p(Y_1, Y_2, Y) = \frac{1}{(\sigma_A d_1 \sqrt{2\pi})^3} \cdot \exp \left\{ -\frac{y^2}{2a^2} - \frac{y^2}{2} - \frac{y^2}{0^{\wedge-2} \tau^2} \right\} \quad (4.186)$$

$$\frac{1}{2 < r} \left( \frac{g_3 - g_2}{t/j} \right)$$

И в этом случае для получения численных значений величины  $P_{оиз}$  рационально прибегнуть к численному интегрированию.

Таким образом, в разделе 4.3 получен полный набор соотношений, позволяющих рассчитать важный для практики показатель - вероятность

ошибки определения количества колесных пар в вагонной тележке. Эти результаты будут использованы ниже при сравнительном анализе схем.

#### **4.4. Сравнительные характеристики качества функционирования синтезированных устройств обнаружения и распознавания идентифицируемых объектов**

В отличие от процедуры обработки, рассмотренной в разделе 4.2, каждую колесную пару можно также обнаруживать по отдельности, а количество колесных пар в тележке определять на этапе вторичной логической обработки. Рассмотрим простой в реализации алгоритм обнаружителя колесной пары. Пороговое устройство выносит решение  $L = 1$  (“наличие колесной пары”) если выходной сигнал ФНЧ превышает пороговый уровень  $z_0$ , и решение  $L_0 = 0$  (“отсутствие колесной пары”) в противоположном случае [105].

В низкочастотных устройствах автоматики предпочтительно применять в качестве ФНЧ RC-фильтры. Пусть в рассматриваемой схеме использован однозвенный ФНЧ с амплитудно-частотной характеристикой

$$K_{\phi}(co) = \frac{1}{y\omega + o)^2 R^2 C^2}, \quad (4.184)$$

Входное сопротивление ПУ полагается высоким, так что АЧХ (4.184) не искажена его влиянием. Частота среза такого ФНЧ

$$a_{>v} = 1/(RC). \quad (4.185)$$

Обычно ее выбирают равной верхней граничной частоте спектра полезного сигнала, при этом данный ФНЧ практически без искажений пропускает сигнал (имеет при  $0 < \omega < \omega_{cp} K(\omega) \ll 1$ ), но подавляет помехи с частотами выше верхней граничной частоты спектра полезного сигнала. В результате на входе ПУ имеем сигнал, индуцированный одной колесной парой, в виде

$$y(t) = a \cdot s(t, 0, t_d) + n_y(t), \quad (4.186)$$

где  $s(t, 0, t_d)$  - сигнал вида (4.34);

$n_y(t)$  - входная помеха ПУ.

Поскольку, согласно модели, описанной в разделе 4.2, входная помеха ФНЧ - гауссовская с нулевым математическим ожиданием, то и  $n_y(t)$  - тоже гауссовская с нулевым математическим ожиданием. Ее дисперсия рассчитывается из соотношения [140]

$$\sigma_y^2 = 2 \Phi \left( 2 \sqrt{1 + a^2 R^2 C^2} \right) 2RC \quad (4.187)$$

По аналогии со случаем согласованной фильтрации рассмотрим вероятностные свойства напряжения на входе ПУ в момент  $t = t_d$  (т.е. при максимуме полезного сигнала). Поскольку, в соответствии с (4.34),  $\max |s(t, 0, t_d)| = 1$ , то рассматриваемое напряжение является гауссовской случайной величиной с математическим ожиданием  $a$  и дисперсией  $\sigma^2$ . Соответствующая плотность вероятности есть

$$P_y(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left\{-\frac{(y-a)^2}{2\sigma_y^2}\right\}. \quad (4.188)$$

В отсутствии полезного сигнала на вход ПУ действует только помеха с плотностью вероятности

$$P_{1W} = P_{y(y + a)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp - \left( \frac{y - z_0}{\sigma_y} \right)^2 \quad (4.189)$$

Получим выражение для условий вероятности правильного обнаружения колесной пары как вероятности вынесения решения при действительном наличии колесной пары перед датчиком

$$A = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp - \left( \frac{a - z_0}{\sigma_y} \right)^2 \quad (4.190)$$

Теперь получим выражение для условной вероятности правильной идентификации отсутствия колесной пары перед датчиком

$$D_i = P(\text{Л} \gg \text{1Л} \gg) = \frac{z_0}{J_{\text{exp}}} = 0,5 \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{z_0}{\sqrt{2}\sigma_y} \right) \right] \quad (4.191)$$

Величины  $D$  и  $D_{ij}$  будут необходимы для расчета показателя эффективности работы устройства определения количества колесных пар. Пусть алгоритм его работы таков: на интервале времени длительностью  $Zt$  (где  $m$ , как и в подразделе 4.2 - временное расстояние между сигналами, инициированными соседними колесными парами) подсчитывается количество решений  $L_{15}$  причем на интервале времени  $m$  (“ $m$ -ячейках”) такое решение аппаратно фиксируется не более одного раза (т.е. второе и прочие решения  $L$ ], если они выносятся, отбраковываются). Обратим внимание на то, что величина  $m$ , как уже показано в разделе 2, составляет порядка 0,1 с., тогда как граничная частота спектра сигнала имеет величину порядка сотен герц и, следовательно, частота среза ФНЧ  $f_{CP} = Qp / (2^{\wedge})$  имеет такую же величину. Поэтому мгновенные значения

помехи на выходе ФНЧ, разделенные интервалами  $t$ , не коррелированы, а т.к. помехи гауссовские - то и независимы. С учетом этого будем вести дальнейший анализ.

Как и в подразделе 4.2, в качестве показателя эффективности работы устройства примем среднюю вероятность ошибки  $P_{ош\text{ ср}}$ , определяемую соотношением (4.72). Определим необходимые, в соответствии с этим соотношением, величины вероятностей  $P_{ош i}$ . При этом, решение относительно количества колесных пар в тележке в целом будем, как и ранее, обозначать,  $L_0$ ,  $L_1 L_2$  и  $L_3$ . В соответствии с (4.74), вероятность ошибки при вынесении каждого конкретного решения

$$P_{ош i} = 1 - P_{A,л} = 1 - p_{л,л} \quad (4.192)$$

Итак, пусть в течение интервала наблюдения тележка мимо датчика не проходила вообще. При этом вероятность  $P(L_0)$  является вероятностью того, что во всех трех “г-ячейках” вынесены решения  $L_0$ . Так как эти решения выносятся независимо, то

$$P_{ош\text{ ср}} = 1 - 0^3 \quad (4.193)$$

Теперь пусть в течение интервала наблюдения мимо датчика прошла одноосная тележка. Колесная пара может оказаться в любой из трех “г-ячеек” с вероятностью  $1/3$ , поэтому вероятность ее обнаружения в целом

$$P(\hat{A}_1 | \bar{A}_1) = \frac{1}{2} D_1 D_0^2 + \frac{1}{2} D_1 D_0^2 + \frac{1}{2} D_1 D_0^2 = D_1 D_0^2$$

$$L_{ил} = i - a d^2 \quad (4.194)$$

Аналогичным образом получаем

$$P_{ош2} = 1 - D^3 \quad (4.195)$$

Вероятность ЛЛ<sub>3</sub>Л<sub>3</sub>1 правильной идентификации трехосной тележки - ЭТО вероятность вынесения решения Л] во всех “Г-ячейках” при условии действительного прохождения мимо датчика трехосной тележки

$$P(Л_3Л_3) = D^3 \quad \wedge_{.3}=1-A^3 \quad (4.196)$$

Среднюю вероятность ошибки будем искать для наихудшего случая полной априорной неопределенности относительно истинного количества колесных пар в наблюдаемой тележке. При этом

$$p_0 = p_x = p_2 = p_3 = 0,25 \quad (4.197)$$

и

$$\begin{aligned} L_{.,.} &= 0,25[1 - D^3 + 1 - O_0 + 1 - D^3 + 1 - P_0^3] = \\ &= 1 - 0,25(D_1 + D_0) / (D^3 + D^2). \end{aligned} \quad (4.198)$$

Представляет интерес сравнение эффективности совокупного определения количества колесных пар, рассмотренное в подразделе 4.3, и индивидуального определения, рассмотренное в настоящем разделе. Пусть амплитуда полезного сигнала равна 1В, эффективное напряжение помехи  $a_y$  в трех разных случаях принимает значения 0,1В, 0,2В, 0,3В, а порог  $z_0 = 3a_y$ . Расчет  $P_{ош\text{ ср}}$  для индивидуального определения по формулам (4.190), (4.191) и (4.198) дает  $P_{ош1\text{ ср}}=0,002$  при  $\wedge=0,1В$ ,  $P_{ош<y} = 0,036$  при  $\sigma_{y'}=0,2В$  и  $P_{ош.с/} = 0,44$  при  $\langle_T = 0,3В$ .

Для расчета  $P_{ош\text{ ср}}$  при совокупном определении количества колесных пар, как уже отмечалось, следует применить численное интегрирование выражения (4.126) в соответствии со (4.128), выражения (4.152) в

соответствии с (4.153), выражения (4.181) в соответствии с (4.183) и выражения (4.186) в соответствии с (4.185). Кроме того, при моделировании совокупного определителя количества колесных пар необходимо задать большее, чем для индивидуального определителя, количество параметров модели. При проведенном автором расчете были заданы следующие значения: априорное математическое ожидание амплитуды  $L=1\text{В}$ , априорная дисперсия амплитуды  $\langle \tau_0^2 \rangle = 0,01\text{В}^2$ ; амплитуда сигнала  $\langle \tau \rangle = 1\text{В}$ ; ширина полосы частот помехи  $C_p = 1\text{кГц}$ ; минимальное время задержки  $f_{\text{rfmin}} = 0$ ; максимальное время задержки  $t_{\text{dmax}} = 1\text{с}$ ; границы интервала наблюдения  $\tau_1 = 0$ ,  $T_2 = 2\text{с}$ ; временной масштабный множитель  $\theta = 1$ ; временное расстояние между импульсами сигнала от соседних колесных пар  $\tau = 0,1\text{с}$ . Варьируемым параметром являлась спектральная плотность помехи  $N_0$ . Связь этого параметра с параметрами сигнала при индивидуальном определении обеспечивалась путем пересчета принятых в последнем случае значений в  $N_0$  по формуле (4.187). При этом величина произведения  $RC$  была найдена из соотношения (4.185):

$$\langle \tau_{cp} \rangle = \lambda_{cp} = 1/U_c, \text{ но } U = 1000 \text{ Гц, поэтому } RC = \dots \sim_{\text{пз}} \text{ с. В}$$

$$2.л/_{cp} 2ТГ-10$$

итоге, для сопоставимых, насколько это возможно, с индивидуальным определением ситуаций были получены значения  $P_{\text{ошср}} = 0,0012$ ;  $0,022$  и  $0,39$ , что ненамного лучше, чем при индивидуальном определении.

. . .

В настоящей работе синтезировано оптимальное по критерию максимума апостериорной вероятности устройство определения количества колесных пар в вагонной тележке по результатам обработки выходного

сигнала магнитного датчика на интервале времени  $[T_1, T_2]$  - устройство совокупного определения количества колесных пар. Хотя максимальное количество колесных пар полагалось равным трем, использованная в данной работе методика синтеза позволяет решить задачу для произвольного количества пар.

Оценена эффективность работы синтезированного устройства по критерию средней вероятности ошибки, для чего выведены соответствующие расчетные соотношения.

В работе также рассмотрена эффективность определения количества колесных пар путем индивидуального обнаружения каждой пары. Устройство, реализующее такой способ, оказывается существенно более простым, чем оптимальное. Хотя преимуществом последнего является более низкая средняя вероятность ошибки, однако, как показано в подразделе 4.4, она ненамного (не более чем в 2 раза при слабой помехе) меньше, чем при индивидуальном определении. Кроме того, оптимальное устройство требует априорного знания либо экспериментального определения в ходе своей работы ряда дополнительных параметров сигнала, чего для работы устройства индивидуального определения не требуется. Поэтому с практической точки зрения рационально в дальнейших разработках использовать процедуру и устройство индивидуального определения количества колесных пар в вагонной тележке.

## РАЗДЕЛ 5

### МЕТОДОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

#### **5.1. Решение технологических задач идентификации поездов для регионов и направлений дороги**

В настоящее время на всех подразделениях дороги действует информационная технология за счет функционирующих подсистем АСУЖТ. Сортировочные станции сетевого значения работают на базе данных автоматизированной системы сортировочных станций (АСУСС), сортировочные и участковые - в режиме комплексной автоматизированной системы рабочих мест персонала (КСАРМ), стыковые - на базе автоматизированной системы стыкового пункта (АСУСП), грузовые - на данных автоматизированной системы грузовой станции (АСУГС), контейнерного терминала (АСУКП), опорные промежуточные и информационный центр региона для сбора данных с неоснащенных станций - как пользователи дорожной автоматизированной системы оперативного управления перевозками (АСОУП).

Указанные системы практически не удовлетворяют требованиям единой технологии управления перевозками на всех уровнях и решают лишь локальные задачи по функциям управления.

Поэтому основным принципом новой информационной технологии становится автоматизация регистрации информации о каждой единице подвижного состава.

Основные свойства информационно-технологического процесса по названным логистическим цепям на железных дорогах представляются следующими.

1. Система автоматической записи и считывания информации с подвижного состава (АСЗСИ) обеспечивает идентификацию всех видов подвижного состава различных государств и форм собственности - тягового, вагонов + механизмов, вагонов пассажирского и грузового парка общего пользования и различных транспортных компаний при нахождении на международных коридорах сети железных дорог соответствующего государства, передачи между промышленным и государственным транспортом. Идентификация расположения и соответствующих технологических операций с подвижным составом осуществляется в реальном масштабе времени для подвижного состава как рабочего так и нерабочего парка.

2. По каждой единице подвижного состава идентифицируется условный номер, который в компьютерной сети связан с инвентарным номером согласно "Единой системе нумерации подвижного состава сети железных дорог"; кодом государства - собственника, объектом выполнения идентификации. Номер единицы подвижного состава - восьмизначный, код государства-собственника с отметкой о виде подшипников - трехзначный, объект выполнения идентификации - четырехзначный согласно единой сетевой разметке станций, вагонных депо, локомотивных депо, других объектов железных дорог с учетом соглашений стран СНГ по железнодорожному транспорту. Одновременно с регистрацией в АССИ объекта идентификации информации автоматически учитываются технологические операции типа: прием с другого государства на пункте межгосударственного перехода; сдача

другому государству (то же); прием с другой дороги сети дорог государства; сдача другой дороге; прием с подъездного пути (от клиента); сдача на подъездной путь (клиенту); внутростанционные операции (согласно типовому технологическому процессу станции - сортировочной, участковой, грузовой, пассажирской, специальной); перечисление из рабочего парка в нерабочий, из нерабочего парка в рабочий; операции по техническому обслуживанию и ремонту подвижного состава.

3. Идентификация объектов и единиц подвижного состава позволяет наиболее полно и достоверно сформировать и сопровождать ведение базы данных автоматизированной системы управления перевозочным процессом (АСУШ1) на дорожном и сетевом уровнях и автоматизированных систем технологического управления - АСУ сортировочных, в т.ч. передаточных станций (АСУСС), АСУ грузовых станций (АСУГС), АСУ железнодорожных узлов (АСУЖУ), АСУ пунктов технического обслуживания вагонов (АСУПТО), локомотивов (АСУЛО), АСУ горочного комплекса станции (АСУГК), КСАРМ центров управления перевозками (ЦУП), комплексного транспортного обслуживания (ЦКТО), пассажирского сервиса (ЦПС), специального подвижного состава (ЦСПС).

4. Кодовая идентификация подвижного состава и оборудование напольных записывающих и считывающих позиций осуществляется поэтапно на отдельных регионах сети с последующим объединением региональных АССИ в общую систему государства и содружества государств. Система кодовой идентификации подвижного состава должна отвечать требованиям технической, технологической, экономической целесообразности.

5. Целесообразность установки напольных записывающих и

тывающих позиций определяется технологическими факторами - на стыковых и передаточных станциях - при приемке и отправлении поездов соответственно на участке приближения и участке удаления станции; на сортировочных, участковых, грузовых, пассажирских станциях и депо: вместо постов списывания вагонов на участках приближения станции, на горбу сортировочных горок, на сортировочных путях, на выставочных путях объектов грузовой работы, технического обслуживания и ремонта подвижного состава; на участках удаления станций по каждому пути отправления; на пассажирских станциях - при приеме и отправлении поездов, выставка пассажирских составов на пассажирскую техническую станцию; на ремонтных заводах и депо - на приемо-отправочных (выставочных путях) соответственно по моменту приема и сдачи подвижного состава.

6. АСЗСИ обеспечивает автоматизированное ведение базы данных поездов, локомотивов, отправок, специального подвижного состава и машинное формирование соответствующих технологических документов в электронном исполнении, объединяя в них данные различных файлов при:

погрузке - данные номеров вагонов объединяются с данными соответствующих повагонных и маршрутных отправок по электронной накладной и дорожной ведомости;

выгрузке - данные номеров вагонов объединяются с данными, сопровождающими порожние вагоны (электронная пересверочная ведомость, вагонный лист);

расформировании - данные номеров (единиц подвижного состава) в объеме строки технологического документа пересылаются в файл соответствующих путей сортировочного парка;

перестановке вагонов - к данным номеров (единиц ПС) добавляются их сведения из электронного технологического документа на расформирование (перестановку на горках) или накопления на подачу (перестановка на пути ремонта или осуществление грузовых операций);

формировании - к данным электронной накопительной ведомости добавляются номера единиц ПС, зафиксированные при перестановке группы вагонов или переставляемого состава на вытяжных путях (горках) с установлением идентичности накопительной ведомости фактическому расположению вагонов;

отправлении - данные номеров объединяются со сведениями об отправлениях из электронного технологического документа с установлением идентичности номеров в ЭТГНЛ фактическому расположению номеров единиц ПС на считывающей позиции;

обработке в станционных парках - данные о результатах обработки состава учитываются в АСЗСИ аналогично действующим АСУТП станций для разработки электронных технологических документов: размеченная телеграмма - натурный лист, сортировочный листок, накопительная ведомость, комплект грузовых перевозочных документов, учетно-отчетные формуляры.

#### 7. Применение АСЗСИ обеспечивает:

для регионов железных дорог - управление на базе модели региона процессами выполнения технологических операций с грузовыми вагонами (транзит груженых вагонов, транзит порожних вагонов, ввоз груженых, ввоз порожних, выгрузка, передача под погрузку, погрузка, вывоз груженых, вывоз порожних, сдача груженых, сдача порожних, передача в ремонт, передача из ремонта), взаимодействию рабочего и нерабочего парков, прогнозированием и учетом прибыли отдельных подраз-

делений и региона в целом;

для подразделений - прежде всего, станционно-технологическое управление операциями на базе наибольшей информационной вооруженности оперативного и инженерно-технического персонала, обеспечивая расчет и учет времени нахождения вагонов (других единиц ПС) на горочных сортировочных комплексах, погрузочно-разгрузочных путях общего пользования, подъездных путях, проведения расчетов за время нахождения вагонов у клиентуры и других работ;

для объектов внутри станций - анализ загрузки элементов, контроль работы персонала по обеспечению технологического процесса и требований нормативных документов по безопасности поездной, маневровой работы, труда и личной дисциплины работников.

8. Новое информационное обеспечение позволяет моделировать и принимать к реализации планы эксплуатационной работы повышенного качества, исходя из интересов подразделений, стимулирования дополнительного приращения прибыли, поощрения исполнителей за конкретные достижения в работе (поездные диспетчеры, станционные и маневровые диспетчеры, дежурные по станциям, депо, дистанциям и др.).

9. За счет применения считывающего оборудования необходимо обеспечить:

повышение скорости приема поездов на станции из-за устранения визуального считывания номеров операторами постов списывания, что даст возможность сократить задержки на подходах, увеличить пропускную способность примыкающих перегонов, ускорить продвижение поездов по внутриузловым ходам;

обеспечение полного контроля нахождения вагонов на станции, грузовых и ремонтных пунктах в режиме реального времени и решения ак-

туальных задач совершенствования технологии работы звеньев станций; обеспечение применения робототехнических систем на горках-авторасцепщиков в режиме, учитывающем число вагонов, вес вагонов, скорость надвига в зоне расцепления и точках отрыва отцепов.

## **5.2. Информационно - технологические модели комплексной переработки вагонов на сортировочных станциях**

Решение технологических задач целесообразно для станций локального контура сети — узлов. Необходимо скоординировать информационное обеспечение станций и других предприятий узла. Оно базируется на динамической модели (ДМ) текущего состояния объектов узла, базе данных о локомотивных и вагонных парках, клиентуре и грузовых пунктах, базе данных нормативно-справочной информации. Узлы также оснащаются информационными сетями ЦКТО, ЦПС, ЦСПС и др. Поэтому ДМ включает: базу данных для моделирования, прогноз подвода поездов в узел, модель работы сортировочной, грузовой, пассажирской станции и узла, модель внутриузлового передаточного движения, модель работы транспортно-складских комплексов, грузовых пунктов, подъездных путей, архив данных.

В состав базы данных первого этапа должны входить файл ТГНЛ, поездов, файлы вагонов на объектах узла, локомотивов передаточного движения.

На основе ДМ решаются технологические задачи:

- сопровождения технологического процесса обработки грузов, вагонов, поездов;
- оптимального планирования и управления станционными операциями

(составления плана эксплуатационной работы, плана подборки конкретных многогруппных составов, очередности подачи-уборки и ДР.);

- ведения учета и отчетности;
- анализа и нормирования станционных операций;
- информационно-справочного обслуживания персонала и клиентуры.

Важнейшим для узла является взаимосвязь информационных потоков центров дорожного уровня с информационно-технологическими объектами узла. Автоматическая регистрация подвижного состава на записывающих и считывающих позициях станций должна быть увязана с работой АРМ персонала. Обеспечение работы с клиентурой и товарно-складскими комплексами осуществляется агентством комплексного транспортного обслуживания ЦКТО и предприятиями узла. Посредством серверов узла и станций осуществляется информационно-технологическое взаимодействие АРМ персонала с центрами управления и транспортными компаниями.

На базе данных ИПСУ узла возможно комплексно использовать информационный поток грузовых отправок и объектов, на которых осуществляется их обработка и прохождение.

Учитывая большие возможности получения детализированной информации необходимо использовать современные методики решения эксплуатационных задач.

Новые подходы к управлению должны поддерживаться информационными средствами еще до осуществления перевозки, на стадии производственных и складских операций. Благодаря этому база данных ТСК должна стать информационной средой оформления перевозки.

Организационное обеспечение перевозки осуществляется агентством комплексного транспортного обслуживания. Она строится на прин-

ципе полного решения вопросов отгрузки и вывоза продукции с каждым получателем только в одном месте - в отделе погрузки АКТО. Железнодорожные станции выполняют функции перевозчика на начальном и конечном этапах перевозочного процесса.

Следовательно, регистрация объекта перевозки - вагона должна быть: на подъездных путях - для постоянных грузоотправителей с использованием технических средств записи данных и АРМ персонала АКТО; для непостоянных грузоотправителей - на АРМ отдела погрузки АКТО; на станциях - со считывающих позиций АСЗСИ.

В течение года в связи с постоянным изменением корреспонденции вагонопотоков необходимо разрабатывать ряд вариантов графика передаточного движения грузовых, а в связи с неравномерностью пассажиропотока, и пригородных поездов на: летний, зимний, переходные периоды года. Система АСЗСИ позволяет следить за составами и временем следования передаточных локомотивов и поездов, а по пригородным поездам - за изменением населенности электро- и дизель-поездов.

Оптимальные нормы массы и составов передаточных поездов ведутся отдельно между сортировочной и каждой из грузовых станций узла в зависимости от суточного вагонопотока по каждой градации его изменения в течение года.

Выбор схемы прокладки электропоездов и дизель-поездов, построение графика и его корректировка может осуществляться по данным информации (СИ) об изменении населенности поездов. В системе АСЗСИ средствами записи (СЗ) наносятся на подвижной состав соответствующие условные номера подвижных единиц. СЗ установлены в моторвагонном депо, а СИ на зонных станциях оборота и головной

станции участка.

Предлагаемая методология построения устройств распознавания транспортных средств позволяет существующими средствами АРМ производить оформление полного комплекта перевозочных документов и формирование электронного документа по грузоотправителям.

Таким образом, по станциям реализуется составная часть новой информационной технологии, что дает возможность развивать ее на полигоне железных дорог Украины. При создании аналогичных систем на всех железных дорогах Украины и взаимодействии ДСЭПД ИВЦ железных дорог с государственным сервером электронных перевозочных документов (ГСЭПД) Главного информационно-вычислительного центра, открывается возможность реализации новой концепции построения вагонной модели перевозочного процесса, новой технологии обработки перевозочных документов, решения задачи взаиморасчетов с грузовладельцами в реальном режиме времени, оперативного осуществления и распределения доходов от грузовых перевозок в пределах Государственной администрации железных дорог Украины.

Построение и реализация описанных систем основывается на автоматизации документооборота, в частности автоматизации оформления операций с поездами.

На полигоне предусмотрены: записывающие позиции условных номеров - на сортировочных станциях, имеющих локомотивное и вагонное депо, на стыковых станциях АЗСИ с другими железнодорожными линиями; считывающие позиции условных номеров - на стыковых станциях дорог, на технических станциях, ограничивающих поездочный участок.

Каждая из указанных станций оснащается сервером системы, ко-

торый заменяет ранее действовавший сервер АСУЖС различного назначения и подключается к ИВЦ дороги.

Вся остальная периферия и система межмашинного обмена данными, система АРМ сохраняется без изменений.

### **5.3. Методология информационного обеспечения пассажирских перевозок метрополитенов**

Проблема определения структуры АСУ производственным объектом метрополитена состоит, прежде всего, в определении количества и функций образующих эту АСУ иерархических подсистем, а также в определении характера, объемов и временных параметров информации, циркулирующей между этими подсистемами. В то же время, при разработке АСУ производственным объектом с уже сложившейся организационной структурой и структурой производственного процесса (а именно таким объектом является метрополитен) структура и функции этой АСУ должны быть к ним адаптированы. Обратное влияние носит ограниченный характер и заключается главным образом, в том, что АСУ принимает на себя ряд функций служб, подразделений и должностных лиц и тем самым в ряде случаев приводит к укрупнению элементов организационной структуры.

Анализ управления структурой произведенного процесса метрополитена показывает, что ряд служб, отделов и подразделений не принимают непосредственное участие в оперативном руководстве метрополитеном: они либо решают задачи регулирования его деятельности в долго- или среднесрочном временном масштабе (экономические, юридические службы, проектно-конструкторское бюро, отдел кадров и др.), либо их деятельность носит вспомогательный характер (медико-

санитарные учреждения, жилищно-бытовой сектор и др.) Вертикаль оперативного управления проходит по линии “начальник метрополитена - заместитель - службы - линейные участки и дистанции служб, депо”. Информационно-аналитическую поддержку функционирования этой вертикали обеспечивают отдел статистического учета и отчетности и вычислительный центр. Очевидно, что в систему оперативного управления следует включить также отдел пожарной охраны (или, в более общем плане - службу безопасности метрополитена). Следовательно, АСУ метрополитена должна представлять собой совокупность двух относительно автономных подсистем: подсистема управления технологическими процессами (АСУ ТП) и организационно-административной подсистемой (АСУ ОА).

Как показал, опыт наиболее эффективная работа метрополитена достигается при оперативной координации деятельности на уровне линейных участков и дистанций его служб. На этом иерархическом уровне наиболее высока интенсивность обмена информацией и управляющими командами (под управляющими командами здесь понимают команды, оказывающие непосредственное воздействие на технологические объекты метрополитена). Оперативность и интенсивность информационного - управляющего взаимодействия между этим уровнем и следующим вышележащим уровнем служб, а также на уровне служб существенным образом зависят от количества и протяженности линий метрополитена и от степени их взаимосвязи (корреспонденция пассажиропотоков, интенсивность перегона составов и др.). Следовательно, на двух указанных уровнях примерно в равной мере реализуются как управляющие, так и информационные функции АСУ.

Взаимодействие между уровнем служб и вышележащими уровня-

ми АСУ носит преимущественно информационный характер и состоит (за исключением чрезвычайных ситуаций) в предоставлении снизу сводных данных для учета, отчетности и планирования и в осуществлении директивного воздействия сверху; при этом структура информационных связей может быть охарактеризована как слаборазветвленная вертикальная.

Таким образом, наибольшая функциональная нагрузка приходится на АСУ линейных участков и дистанций служб. Именно на них возлагается контроль наиболее динамичных элементов производственного процесса метрополитена - движения поездов и пассажиропотоков - и управление ими, что требует их реализации в виде высокопроизводительных систем. Известны три варианта построения таких систем [24,28]:

- 1) системы с полностью централизованной структурой, образованной центральным пунктом управления (ЦПУ) и периферийными участками. В таких системах алгоритм работы ЦПУ сложен, быстродействие ЦПУ велико и, кроме того, необходимо использование каналов связи с высокой пропускной способностью;

- 2) системы с частично децентрализованной структурой, в которых все или некоторые периферийные устройства наделены рядом автономно выполняемых функций и максимально приближены к объектам управления. В таких системах предъявляются умеренные требования к сложности алгоритма работы ЦПУ, к быстродействию ЦПУ и к пропускной способности каналов связи;

- 3) системы с полностью децентрализованной (распределенной) структурой, в которых все периферийные устройства полностью автономны. Трудность применения таких систем состоит в сложности обес-

печения их согласованной работы.

Помимо чисто технических причин, на выбор структуры АСУ метрополитена оказывает сильное влияние и экономический фактор, находящий свое отражение в требовании, во-первых, минимизации затрат на адаптацию системы к особенностям работы каждого метрополитена, во-вторых, минимизации затрат на адаптацию дорогостоящих установок и капитальных сооружений метрополитена к вводимой в эксплуатацию системы или ее составных частей (оборудования, алгоритмов) при видоизменении технологических процессов и (или) структуры каждого метрополитена.

Анализ перечисленных факторов показывает, что в настоящее время и в обозримой перспективе наиболее приемлемыми являются АСУ линейных участков и дистанций служб с частично децентрализованной структурой. Количество входящих в нее иерархических уровней определяется сложностью решаемой технологической задачи. Так, системы управления электроснабжением и электромеханическими установками могут быть построены по двухуровневой схеме. При этом на нижнем уровне осуществляется контроль состояния технологического оборудования и параметров технологических процессов (нагрузки, уровня изоляции, напряжений на линиях распределительных устройств и т.д.), а на верхнем уровне осуществляется анализ данных, поступивших с нижнего уровня, и принятие решений по управлению технологическим оборудованием в запланированных и в аварийных ситуациях.

В системах автоматического управления движением поездов признана целесообразной трехуровневая иерархия управления и контроля [24,28]. Нижний уровень иерархии образуют поездные устройства (ПУ), средний уровень - станционные устройства (СУ), верхний уровень -

ЦПУ. Ядром последнего является управляющий вычислительный комплекс, хранящий информацию о плановом графике движения поездов, определяющий рассогласование планового и исполненного графиков движения поездов, рассчитывающий время стоянки и отправления поездов, время хода по перегону и передающий эту информацию на станции.

СУ по командам с ЦПУ формирует сигналы управления поездом, ретранслирует в обоих направлениях информацию, которой обмениваются ЦПУ и поезд, управляют работой устройств диспетчерской централизации и устройств информирования пассажиров на станции.

ПУ представляет собой специализированное вычислительно-управляющее устройство. Оно непосредственно управляет временем хода поезда и прицельным торможением, контролирует величину рассогласования заданных ЦПУ и фактических параметров движения поезда, контролирует техническое состояние поездных устройств и выполняет ряд вспомогательных функций. ПУ допускает параллельное управление машинистом, однако реализует команды, соответствующие более безопасному режиму движения.

Циркулирующие в системах автоматического управления движением поездов потоки информации весьма велики, поэтому для их передачи (прежде всего между ЦПУ и СУ) линии связи должны иметь высокую пропускную способность. Такую пропускную способность могут обеспечить кабельные и волоконно-оптические линии связи. Важной характеристикой канала связи является также его помехоустойчивость. Метрополитен является объектом со сложной электромагнитной обстановкой. Источниками помех являются устройства автоматики, электроустановки, тяговые двигатели поездов и др.; интенсивность помех снижается до приемлемого уровня только в диапазоне сверхвысоких частот.

Этим, наряду с требованием обеспечения высокой пропускной способности, обусловлен выбор радиочастотных и оптических кабелей в качестве основы линий связи между ЦПУ и СУ. Однако этой меры зачастую недостаточно для обеспечения требуемой достоверности передачи информации, поэтому в каналах связи на метрополитене применяют модемы, обеспечивающие помехоустойчивое кодирование и декодирование сигналов. При этом повышение достоверности передаваемой информации достигается применением более сложных кодов, что ведет к уменьшению скорости передачи информации (при ограниченной пропускной способности канала) и может привести к неосуществимости функций управления в реальном масштабе времени. Можно, для сохранения высокой помехоустойчивости передачи, уменьшить объем информации, циркулирующей между ЦПУ и периферийными устройствами, так перераспределив функции системы управления движением поездов. Однако реализация такой системы, характеризуемой высокой степенью децентрализации управления, встречает серьезные затруднения.

Анализируя совокупность рассмотренных в данном параграфе требований к структуре и организации работ АСУ метрополитена, можно сделать вывод, что она должна представлять собой совокупность двух относительно автономных подсистем - организационно-административной и управления технологическим процессами. При этом первая из них допускает построение в виде полностью централизованной структуры, а вторая - в виде частично централизованной структуры с развитой децентрализацией на уровне линейных участков и служб.

#### 5.4. Техничко-экономическое обоснование эффективности внедрения новых информационных технологий на железнодорожном транспорте

Экономическая целесообразность разработки системы идентификации подвижного состава:

$$ЛЭ_T = Э_{2T} - Э_{1T} \quad (5-1)$$

где  $ЛЭ_T$  - прирост экономического эффекта при использовании системы за расчетный период  $T$ ;

$Э_{1T}$  - экономический эффект без применения системы за расчетный период;

$Э_{2T}$  - экономический эффект, получаемый при условии использования системы за расчетный период.

Расчет экономического эффекта определялся в соответствии с “Методическими рекомендациями по комплексной оценке эффективности мероприятий, направленных на ускорение научно-технического прогресса” (1988 г.) и “Методическими рекомендациями по определению экономической эффективности мероприятий научно-технического прогресса на железнодорожном транспорте” (1991 г.) и был подробно рассмотрен в диссертационной работе на соискание ученой степени кандидата технических наук О.Ф. Демченко «Разработка средств идентификации электропоездов метрополитена», 1998 г. (научный руководитель М.М. Бабаев).

Суммарные за годы расчетного периода экономические эффекты ( $Э_{T1}$ ,  $Э_{T2}$ ) определяются как превышение суммарных стоимостных оценок результатов перевозочной работы за расчетный период над стоимо-

ятия без использования системы ( $\Theta_{1T}$ ) и в условиях ее функционирования

$$C^{2T} = A_T \sim A_T = \sum_{r=1}^n I E I (A_r - Z_r) a_r \quad (5.2.)$$

$$\Theta_{1T} = \sum_{r=1}^n (P_{r2t} - Z_{r2t}) a_r \quad (5.3)$$

где  $P_{j2t}$  - совокупная выручка от перевозочной работы за расчетный период без применения системы и с учетом ее работы;

$Z_{j2t}$  - совокупные затраты на работу предприятия за расчетный период без применения системы и с учетом её работы;

$P_{j2t}$  - выручка от перевозочной работы в году  $t$  расчетного периода без применения системы и с учетом её работы;

$Z_{j2t}$  - совокупные затраты на работу предприятия в году  $t$  расчетного периода без применения системы и с учетом ее работы;

$a_t$  - коэффициент приведения затрат и результатов года  $t$  (экономического эффекта года  $t$ ) к расчетному году.

Выручка от перевозочной работы в году  $t$  ( $P_{1;2t}$ ) без применения системы и с учетом ее работы определяется по формуле:

$$P_{1;2t} = C_{1;2t} \cdot A_{1;2t} \quad (6-4)$$

где  $C_{1;2t}$  - тариф на перевозки в году  $t$  без применения системы и с учетом ее работы;

$A_{1;2t}$  - объем перевозок в году  $t$  без применения системы и с учетом ее работы.

Совокупные затраты определяются по формуле

$$Z_{1;2t} = K_{i2t} + I_{i2t} - L_{i>2t} \quad (5-5)$$

где  $K_{ij2t}$  - единовременные затраты на разработку и изготовление системы идентификации в году  $t$  расчетного периода в сопоставляемых вариантах;

$I_{i2t}$  - текущие издержки на эксплуатацию в году  $t$  расчетного периода (без учета амортизационных отчислений на систему) в сопоставляемых вариантах;

$A_{1>2t}$  - остаточная стоимость системы идентификации в году  $t$  расчетного периода в сопоставляемых условиях;

$L_{12}$  - ликвидационное сальдо после окончания срока службы ( $L_{1,2}=0$ ).

Оснащение вагонного парка устройством идентификации позволяет ввести достоверный индивидуальный учет пробега вагонов, что обеспечивает условия своевременного ремонта вагонов в соответствии с графиком ремонтов.

Исходя из этого, общие затраты на эксплуатацию предприятия в году  $t$  ( $H_{12t}$ ) можно разделить на две части:

- затраты на все виды ремонта подвижного состава в году  $t$
- остальные (все другие) затраты, связанные с эксплуатацией вагонного парка в году  $t$  ( $Y_{2t}$ ).

Следовательно:

$$L_{9t} = I[(y_t + Y_{2t}) - (y'_t + Y_{2t} + L_{1,2})]a, \quad (5.6)$$

Поскольку использование системы влияет только на изменение затрат, связанных с ремонтом подвижного состава ( $MP_{1>2t}$ ), то оставшаяся часть затрат по эксплуатации предприятия не зависит от наличия и ис-

пользования системы идентификации и при прочих равных условиях остается неизменной, т.е.  $I^o = I^o$ .

Поэтому:

$$D\Delta_{\Gamma} = \sum_{i=1}^n \Delta_i a_i - u_i; - \kappa_2, a \quad (5.7)$$

где  $I_{iy}$  - ожидаемые затраты на все виды ремонта инвентарного парка вагонов без использования системы в году  $t$ ;

- ожидаемые затраты на все виды ремонта инвентарного парка вагонов с использованием системы в году  $t$ .

С целью определения удорожания ремонтных работ в электродепо Харьковского метрополитена из-за отсутствия достоверных данных о пробеге вагонов было произведено сопоставление фактической стоимости ремонтов вагонов ( $\Delta^{фак}$ ) за ряд отчетных лет с расчетной стоимостью ремонтов за тот же период и определение влияния системы идентификации подвижного состава на снижение удельных затрат на ремонтные работы.

Стоимости ремонтов определяются по следующим формулам:

$$(5-8)$$

где  $K^{фак}$  - фактическое количество ремонтов разных видов в отчетном году  $t$ ;

$\Delta_{em}$  - стоимость ремонта  $i$  вида по данным Харьковского метрополитена (калькуляционная стоимость).

$f=n$

$$\frac{-\Delta_{em}}{\text{меж рем}}, \quad (5.9)$$



где  $l_i$  - норма пробега между  $i$  видами ремонта;

$\sum_{i=1}^2 K_i$  - расчетное количество предыдущих видов ремонта.

Усредненное количество ремонтов в межремонтном цикле в зависимости от типов вагонов метрополитена и определяется в соответствии с удельным весом соответствующих типов вагонов в инвентарном парке (табл. 5.2).

Таблица 5.2

Прогнозируемая величина вагонного парка Харьковского метрополитена.

| Годы реализации системы | Инвентарный парк вагонов, ед. |
|-------------------------|-------------------------------|
| 1                       | 5                             |
| 1998                    | 303                           |
| 1999                    | 306                           |
| 2000                    | 309                           |
| 2001                    | 320                           |
| 2002                    | 320                           |
| 2003                    | 334                           |
| 2004                    | 338                           |
| 2005                    | 350                           |
| 2006                    | 355                           |
| 2007                    | 367                           |
| 2008                    | 372                           |
| 2009                    | 377                           |
| 2010                    | 395                           |

Для Харьковского метрополитена расчетный экономический эффект от внедрения системы идентификации (1430 тыс. грн.) получен за счет сокращения расходов на техническое обслуживание и ремонт подвижного состава благодаря учету реального пробега вагона.

### 5.5. Выводы по разделу 5

1. Разработанная методология построения информационного обеспечения перевозочного процесса в системах управления перевозками для регионов и направлений железной дороги, сортировочных станций, метрополитенов основана на структурной интеграции устройств идентификации в действующие подсистемы управления железнодорожного транспорта.
2. Выполнен анализ оптимальных мест размещения считывающих устройств в различных подразделениях дороги с целью достижения максимальной эффективности использования системы распознавания транспортных средств.
3. Внедрение предлагаемой методологии позволит автоматизировать работу центров управления перевозочным процессом и создать систему учета сервисного обслуживания подвижного состава, совершенствующую эксплуатацию железнодорожного состава.
4. Результаты научных исследований, полученные в диссертационной работе, использованы при внедрении системы идентификации вагонов на Салтовской линии Харьковского метрополитена.

## ВЫВОДЫ

В диссертационной работе сделано теоретическое обобщение и решена научная проблема комплексного совершенствования методов и средств получения данных о подвижных единицах, которое обеспечивает дополнительной и достоверной информацией железнодорожные перевозки. На базе методов распознавания, которые не требуют использования специальных датчиков на подвижном составе, разработаны теоретические и методологические основы построения устройств идентификации образов объектов, что дает возможность повысить эффективность эксплуатации железнодорожного транспорта.

При этом получены следующие результаты.

1. Анализ существующих устройств идентификации железнодорожных транспортных средств показал, что для магистрального транспорта Украины наиболее приемлемыми являются методы распознавания, реализованные на технических решениях, которые не требуют переоборудования контролируемых объектов. Это дает возможность решить проблему автоматизации процессов информационного обеспечения грузовых и пассажирских перевозок на магистральном транспорте Украины на основе интеграции в существующие структуры управления эксплуатационной работой разработанных в диссертации методов распознавания транспортных средств. Разработанная методология построения автоматизированных систем распознавания подвижных объектов не требует изменения существующей системы управления перевозками, что позволяет организовать локальные подсистемы контроля с возможностью их дальнейшего объединения в единую информационную сеть.

2. Разработаны теоретические основы магнитного маркирования железнодорожных вагонов с целью формирования информации об об-

разах объектов, которая необходима для систем управления процессом перевозок. Новой особенностью данной методики является то, что на колеса подвижного состава не ставятся магнитные метки, а осуществляется их полное перемагничивание. Это позволяет создавать простые по конструкции и надежные намагничиватели, а также существенно упрощает процесс считывания сигналов, поскольку информационные сообщения несет колесная пара, тележка или вагон в зависимости от принятой системе кодирования. При этом идентификация транспортного средства осуществляется не только по количеству осей в вагонных тележках, но и по уровню их остаточных магнитных полей. Проведены экспериментальные исследования и физическое моделирование уровней остаточных магнитных полей колесных пар вагонов. Полученные результаты использованы при разработке активных элементов функциональных намагничивателей и как выходные данные (уровни внешних магнитных полей) для синтеза адаптивных путевых преобразователей.

3. С целью повышения эффективности эксплуатации железнодорожного транспорта разработаны алгоритмы работы и синтезированы адаптивные путевые преобразователи для считывания информационных сигналов, которые необходимы для обеспечения функционирования динамичных моделей управления перевозками. Отличительной особенностью этих устройств является их ориентация на работу в сложных условиях, а именно:

начальным рабочим состоянием считывающих устройств является обработка электромагнитных и атмосферных препятствий и учет их в результатах измерений;

измерение осуществляется только во время нахождения объекта в зоне контроля, при этом нулевым уровнем отсчета

является уровень сигнала, который создается суммарным препятствием;

чувствительность датчиков позволяет устанавливать их в местах, не доступных для механических повреждений (размещать под землей, разнести от головки рельса на расстояние 0,25 - 1 м в зависимости от регулирования приемников);

возможность реакции на массу вагона.

Это позволяет создавать устройства распознавания длиннобазных вагонов, контроля заполнения путей подгорочных парков сортировочных горок без применения рельсовых цепей, выявления «окон» в системах контроля заполнения путей и др. Испытания путевых преобразователей при считывании информационных сигналов с колесных пар электропоездов на Харьковском метрополитене показали принципиальную возможность применения их для диагностики надежности функционирования тяговых двигателей по распределению уровней внешних магнитных полей.

4. Решена задача получения достоверных данных о подвижном составе без нарушений технологического процесса перевозок за счет повышения надежности распознавания путем определения общей плотности вероятности выходных сигналов многомерной системы для случая идентификации вагонных тележек. Возможность решения поставленной задачи обусловлена введением допущения, что любое количество колесных пар в тележке (от 0 до 3) априори равновероятна, т.е.  $P_i = 0,25$ .

На основании такого подхода получены аналитические выражения для расчета ошибки определения количества колесных пар и проведено сравнение характеристик качества функционирования синтезированных устройств.

5. Разработаны математические модели процесса распознавания, вероятностные модели идентификации вагонных тележек и методика расчета вероятности ошибки определения объекта. Если принять значение разброса величин вероятностей превышающими  $10^3$ , то при  $q^*_{2} < 320$  характеристики определения в значительной степени зависят от априорных вероятностей наличия и отсутствия объекта.

Рост параметра группировки  $A$  ведет к повышению качества определения. С увеличением величины  $q_{2}$  влияние априорной информации (величин  $A$ ,  $P(L_0)$  и  $P(d)$ ) на характеристики определения становится менее существенным. При большой величине  $P(d)$  большое значение вероятности правильного определения возможно даже при небольших значениях  $q^*_{2}$  и  $A$ , однако при этом величина  $P_{n\text{сер}}$  может быть недопустимо большой для ряда практических приложений.

Если интерпретировать объект, определяемый как единичный импульс, принадлежащий некоторому двоичному коду конечной длины, нанесенному на некоторый неидеальный, с точки зрения помех, носитель, то на основе приведенных результатов, можно утверждать следующее: если заданы допустимое минимальное значение  $P_{\text{min}}$  и максимальное значение  $P_{\text{max}}$ , то варьируя вид и длину кода (т.е. величины  $P(L_0)$  и  $P(d)$ ) и вид носителя (т.е. величину  $A$  и допустимое значение  $d_{12}$ ), можно оптимизировать как требования к коду, так и требования к характеристикам носителя кода, что обеспечивает автоматизацию определения дислокации поездов в процессе перевозок на полигонах железных дорог.

6. Разработаны теоретические основы построения информационных систем на основе многоканальных устройств идентификации подвижных составов. Синтезирован субоптимальный алгоритм работы

многоканального устройства распознавания транспортных средств, которое имеет, как показала сравнительная характеристика, наилучшее значение вероятности качества функционирования.

7. Разработанная методология построения информационного обеспечения перевозочного процесса в системах управления перевозками для регионов и направлений железной дороги, сортировочных станций, метрополитенов основана на структурной интеграции устройств идентификации в действующие подсистемы управления железнодорожного транспорта. При этом выполнен анализ оптимальных мест размещения считывающих устройств в различных подразделениях дороги с целью достижения максимальной эффективности использования системы распознавания транспортных средств. Внедрение предлагаемой методологии позволит автоматизировать работу центров управления перевозочным процессом и создать систему учета сервисного обслуживания подвижного состава, совершенствующую эксплуатацию железнодорожного состава.

8. Выполнено технико-экономическое обоснование эффективности внедрения устройств распознавания транспортных средств. Для Харьковского метрополитена расчетный экономический эффект от внедрения системы идентификации (1430 тыс. грн.) получен за счет сокращения расходов на техническое обслуживание и ремонт подвижного состава благодаря учету реального пробега вагона. Результаты научных исследований, полученные в диссертационной работе, использованы при внедрении системы идентификации вагонов на Салтовской линии Харьковского метрополитена.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ источников

1. Концепція та програма реструктуризації на залізничному транспорті України. - К.: НАЕЛА, 1998. - 145 с. - Офіційне видання
2. Бергер Р. Средства автоматической идентификации подвижного состава в многофункциональных системах управления // Железные дороги мира. - 1992. - №10. - С. 54-56.
3. Гук В.И., Левтеров А.И., Ковалев В.И. Устройства считывания номера транспортного средства // Автоматика, телемеханика и связь. - 1990. - №17.-С. 12-13.
4. Системы автоматического и телемеханического управления электроподвижным составом / Л.А. Баранов, Е.В. Ерофеев, В.И. Астрахан и др.; Под. Ред. Л.А. Баранова. - М.: Транспорт, 1984. - 312 с.
5. ETCS - European Train Control System/ Kollannsberger F.// Signal + Draht. -1992. - 84, №12. - P. 393-396.
6. ATCS, ARES. Les chemins de fer du 21e siecle/ Pore Jacques// Rail. - 1990. - №19.-P. 39-41.
7. Буянов В.А., Тишкин Е.М., Шаров В.А. На пути к информационным технологиям перевозочного процесса // Вестник ВНИИЖТ. - 1998. - № 3. - С. 10-15.
8. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. - М.: Радио и связь, 1989. - 656 с.
9. Bastin A. Telematikunterstutzte Informationssysteme fur den schienengebundenen Verkehr // Eisenbahningenieur. - 1996. - 47, № 1. - P. 30-33.
10. Kanadische Nationalbahnen eroffhетен Betriebsfuehrungsrentrale// ETR: Eisenbahntechn. Rdsch. - 1991. - 40, №2. - P. 834.
11. Министерство путей сообщения Российской Федерации. ОСТ 32.112

ки. Эксплуатационно-технические требования к системам диспетчерской централизации. - Санкт-Петербург, 1998. - 30с. - Издание официальное

12. Белобородов Ю.Н., Тиличенко А.Г. Как повысить эффективность автоматизированных систем оперативного управления *И* Железнодорожный транспорт. - 1996. - № 2. - С. 8-11.

13. Catelani P. I treni e l'evoluzione del loro distanziamento// Techn. Prof. - 1994. - 1, № 11.-P. 19-26.

14. Vantuono W.C. Where we are, where we're going// Railway Age. - 1995. - 196. - № 7. - P.41-42, 44,46-47.

15. Blending GIS and GPS with advanced train control// Railway Age. - 1995.- 196.- №3.-P. 46.

16. Болдырев В.И., Шарафетдинов И.Г., Васекин А.И. АСУ "Магистраль"// Железнодорожный транспорт. - 1997. - № 12. - С. 8-11.

17. Новая система диспетчерской централизации/ В.В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д.В. Гавзов, А.Б. Никитин// Железнодорожный транспорт. - 1998. - №3. - С. 15-21.

18. Zugnummemmldesystem ZNS 801/ Christopf Herbert, Reissner Franz // Signal+Draht. - 1989. - 81, № 1-2. - P.8-13.

19. Перспективные системы управления движением поездов // Железные дороги мира. - 1996. - № 3. - С. 3-5.

20. Автоматизация грузовых перевозок // Железные дороги мира. - 1996.-№6.-С. 5-9.

21. Поддавашкин Э.С., Кутыркин А.В., Шевцов Б.В. Концепция информатизации железнодорожного транспорта// Железнодорожный транспорт. - 1996. - №6. - С. 20-27.

22. Шафиркин В.Б., Шумская О.А. Безбумажная технология в управлении перевозками *И* Железнодорожный транспорт. - 1998. - №10. - С. 4-11.

23. Теория обнаружения сигналов/ Под ред П.А. Бакута. - М.: Радио и связь, 1984. - 440 с.
24. Организация движения поездов и работа станций метрополитена / А.С. Бакулин, В.А. Пронин, Е.А. Федоров, К.И. Кудринская. - М.: Транспорт, 1981.-230 с.
25. Пат. 2102267 РФ, МКИ В 61 Н 7/12, В 60 Т 17/22. Путьевой индуктивный датчик/ М.М. Бабаев, О.Ф. Демченко, Л.А. Исаев, А.А. Прилипко, Ю.В. Соболев (Украина). - № 95113387/28; Заявл. 27.07.95; Оpubл. 20.01.98, Бюл. № 2. - 5с.:2 ил.
26. Aids for rail car side - door observation // TCRP Report. - 1995. - №4. - P.1-129.
27. Холщевников В.В., Бакулин С.А., Хетчиков А.И. Методика выбора числа эскалаторов для станций метрополитена // Вестник ВНИИЖТ. - 1986. - №2. - С. 49-52.
28. Якушкин И.М. Пассажирские перевозки на метрополитенах. - М.: Транспорт, 1982. -176 с.
29. Грунтов П.С., Захаров В.А., Ярошевич В.П. Расчет и анализ транспортных потоков: Учебное пособие. Часть 1. - Гомель: БелИИЖТ, 1983.
30. Акулиничев В.М., Кудрявцев В.А., Корешков А.Н. Математические методы в эксплуатации железных дорог: Учебное пособие для вузов ж.-д. трансп./ Под ред. В.М. Акулиничева. - М.: Транспорт, 1981. - 223 с.
31. Автоматизированные диспетчерские центры управления эксплуатационной работой железных дорог / Под ред. П.С. Грунтова. - М.: Транспорт, 1990. - 287 с.
32. Буянов В.А., Ратин Г.С. Автоматизированные информационные системы на железнодорожном транспорте. - М.: Транспорт, 1984. - 240 с.

33. Пат. 2110430 РФ, МКИ В 61 L 1/16. Устройство для обнаружения движущегося по рельсам объекта/ М.М. Бабаев, О.Ф. Демченко, Л.А. Исаев, С.В. Кошевой, А.А. Прилипко, Ю.В. Соболев (Украина). - № 95112436/28; Заявл. 18.07.95, Опубл. 10.05.98, Бюл. № 13. - 5с.: 2 ил.

34. А.с. 1696334 СССР, МКИ В 61 L 23/16. Рельсовая цепь/ Ю.В. Соболев, М.М. Бабаев, В.П. Мороз, С.В. Кошевой (СССР). - № 4726180/11; Заявлено 08.08.89; Опубл. 07.12.91, Бюл. № 45. - 6с.: 5 ил.

35. Лисенков В.М., Лодыгин Г.С., Бестемьянов П.Ф. Двухканальная микроэлектронная система АРС для обеспечения безопасности движения поездов метрополитена // Единый ряд систем управления движением поездов: Межвуз. сб. науч. тр./ МИИТ. - М.: МИИТ, 1990. - С. 68 - 78.

36. Баранов Л.А. Структура автоматизированной системы управления движением поездов метрополитена // Автоматизация управления поездами магистральных железных дорог и метрополитенов / Межвуз. сб. науч. тр./ МИИТ. - М.: МИИТ, 1989. - Вып. 811. - С.4 - 10.

37. Горбунов В.А., Ежов В.А. Перспективы устройств автоматического считывания подвижного состава/ Железнодорожный транспорт, 1997. - №3. - С.7-9.

38. Информационная система для управления перевозочным процессом/ Под ред. А.П. Писарева. - М.: Транспорт, 1989.

39. Автоматизация управления на Римском метрополитене И Железнодорожный транспорт. - 1988. - №10. - С. 76-78.

40. Система комплексной автоматизации линии метрополитена в Лос-Анджелесе // Железные дороги мира. - 1993. -№ 10.-С.75-76.

41. Strass H. U-Bahn F ahrt Bus //Production. - 1995. - №28. - Р. 9.

42. Иловайский Н.Д., Король В.А. Маркетинг в перевозке грузов. - М.: Мир, 1995.-248 с.

43. Крючков О.М., Пуртова Л.П. Проблемы информационного обеспечения перевозочного процесса на полигоне железной дороги / Залізничний транспорт України. - 1998. - № 1. - С. 4-6.
44. Betriebsführungssystem der U-Bahn München/ Lenz H.// Signal+Draht. - 1990. - 82, №7-8. - P.145-149.
45. Филиппович В.П., Жуков А.И. Опыт эксплуатации АСДУ - МРЦ // Автоматика, телемеханика и связь. - 1991. - №9. - С. 25 - 26.
46. Le metro le plus moderne du monde/ Masse Jean-Paul// Vie rail. - 1992. - №2364.-P. 17-20.
47. Maggaly: un grand metro qui roule tout seul// Vie rail.- 1992.- №2360.- P.21-22.
48. Vereinigte Staaten von America: Der Betriebsablauf der U-Bahn in San Francisco//Elec. Bahnen. - 1993. - 91, №3. - P.101.
49. Development of a new train ID system //Techno Jap. -1995.- 28, №6. - P.76.
50. Per Funk alles im Griff //Logist heute. - 1993. - 15, №9. - P. 87,90.
51. Tracking, Identification and Control: Proc. 1-st Int. Conf., London, 2-3 Nov., 1988 /Ed. Hollier R.H. - Kempston: IFS Publ., Berlin: Springer, 1988. - 206 p.
52. Lancien D., Gouzgoillon D., Rouvier C. L'identification automatique des vehicules //Revue general des chemins de fer. -1991. - 1110, №11. - P.5-12.
53. Yamamoto T. Development of train number reading device in combination with radio //Japan Railway Engineering. - 1993. - №123. - P.7-11.
54. Smith J/ Headway control for Toronto subway // Electrotechnology. - 1993.-Т.4, №2. - P. 14-17.
55. Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте / Под ред. П.С. Грунтова. - М.: Транспорт,

56. Тишкин Е.М. Автоматизация разработки графика движения поездов. - М.: Транспорт, 1974. - 134 с.

57. Танаев В. С., Шкураба В.В. Введение в теорию расписаний. - М.: Наука, 1975. - 256 с.

58. Попов Б.А., Теслер Г.С. Вычисление функций на ЭВМ. Справочник. - Киев: Наукова думка, 1984. - 600 с.

59. Типовой технологический процесс работы сортировочной станции. - М.: Транспорт, 1988.

60. Введение в кибернетическую технику. Обработка физической информации/ Под ред. Б.Н. Малиновского. - Киев: Наукова думка, 1979. - 254с.

61. Breusegem V.Van., Campion G, Bastin G. Traffic modeling and state feedback control for metro lines // IEEE Transactions on Automatic Control. - 1991. - Т. 36, №1. - Р. 770-784.

62. А.с. 1630946 СССР, МКИ В 61 L 23/16. Устройство для контроля заполнения пути сортировочного парка/ Ю.В. Соболев, В.П. Мороз, В.И. Светличный, М.М. Бабаев, В.М. Соколов (СССР). - № 4630874/11; Заявлено 03.01.89; Опубл. 28.02.91, Бюл. № 8. - бс.: 2ил.

63. Информационное обеспечение систем управления предприятиями железнодорожного транспорта/ Под ред. Н.А. Карагодина. - М.: Транспорт, 1980.-С. 86-102.

64. Астраханов В.И Алгоритмы временного интервального регулирования движения метрополитена // Системы и устройства автоматики и телемеханики для железных дорог и метрополитенов: Сб. науч. тр. /ВНИИЖТ. - М.: Транспорт, 1992. - С. 54 - 60.

65. Путевая блокировка и авторегулировка / Н.Ф. Котляренко, А.В. Шишляков, Ю.В. Соболев и др.; Под. Ред. Н.Ф. Котляренко. - М.: Транспорт, 1983.-408 с.

66. Hill R/J/ Electric railway traction. Part 4 Signalling and interlockings *H Power Engineering Journal*. - 1995. - Т.9, №4. - Р. 201 - 206.
67. Аветикян М.А., Полукаров А.Ф., Фефелов А.М. Станционный технологический центр. - М.: Транспорт, 1994. - С. 27-51.
68. Соболев Ю.В., Бабаев М.М., Давиденко М.Г. Совместная плотность вероятности сигналов на выходах структурно-связанных трансверсальных фильтров // Межвуз. сб. науч, тр./ ХарГАЖТ, 1997. - Вып. 28. - С. 82-85.
69. Hohre Ltist sfahigkeit der Bahnenergieversorgung bei modernen Stadt - und U-Bahnen // Elektrische Bahnen. - 1993. - Т.91, №11. - Р. 359 - 369.
70. Прибытков Н.Д. Система электроснабжения и автоматизации //Локомотив. - 1995. -№11. - С. 40 - 41.
71. Bianchi A., Caron C., Meneghini C. Nei Tunnel della citta *I Autom.oggi*. - 1991. - Т.9. - №100. - Р. 147 - 153.
72. Schom W. Licht - und Kraftstromversorgung der U-Bahn Wien // Elektrische Bahnen. - 1993. - Т.91. - №9. - Р. 288 - 294.
73. Феофилов А.Н. Автоматизация составления графика оборота составов метрополитена // Вестник ВНИИЖТ. - 1992. - №1. - С. 26 - 29.
74. Барзилов Е.Ю., Каштанов В.А. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем. - М.: Сов. радио, 1971. - 272 с.
75. Степанов С.В. Профилактические работы и сроки их проведения. - М.: Сов. радио, 1972. - 136 с.
76. Черновыи А.А., Лукьященко В.И., Котин Л.В. Надежность сложных систем. - М.: Машиностроение, 1976. - 288 с.
77. Эксплуатация и ремонт подвижного состава электрических железных дорог / О.Ф. Горнов, Н.В. Максимов, А.В.Мейендорф и др. - М.: Транспорт, 1968. - 344 с.

78. Бабаев М.М., Демченко О.Ф., Прилипко А.А. Применение методов декомпозиции и абстрагирования при создании комплекса программ системы “идентификации подвижного состава” // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. - 1996. - №3,4- - С. 34-36.

79. Harper E.L. AEI no longer an idea for the future // Int. Shipp. - 1995. - 30.-№1.-Р.42.

80. Бабаев М.М. Синтез устройств распознавания кодов для пассажирской автоматики метрополитенов // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. - 1996. - №6. - С. 49-53.

81. Исаев Л.А., Соболев Ю.В. Пути повышения эффективности технологического обслуживания вагонного парка метрополитена. Часть 1 Формализация задачи // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. - 1996. - №3, 4. - С. 29-33.

82. Лаврик В.В. Электрическая централизация стрелок и сигналов метрополитена. - М.: Транспорт, 1984. - 240 с.

83. Шелухин В.И. Датчики измерения и контроля устройств железнодорожного транспорта. - М.: Транспорт, 1990 - 120 с.

84. Нога А.А., Щербина Р.С. Состояние грузовых перевозок на железных дорогах мира// 36. наук. пр./КИЗТ. - К: КИЗТ, 1998. - Т.1, № 1. - С. 165-172.

85. Бухгольц В.П., Красовский Г.А., Штанке А.Э. Путевые датчики контроля подвижного состава на рельсовом транспорте. - М.: Транспорт, 1976.-96 с.

86. Дёмина А.К., Шара С.Н. Состояние и тенденции развития пассажирских перевозок в странах Центральной и Западной Европы //36. наук, пр./КИЗТ. - К: КИЗТ, 1998.-Т.1, № 1. - С.173-185.

87. Бартель А.В. Путь датчик счёта осей системы ГАЦ (АСУ МД) // Автоматизация управления маршрутами движения на сортировочных горках/ Сб науч. тр. ВНИИЖТ. - М.: Транспорт, 1984. - С. 96-102.
88. Development of a new train ID system // Techno Jap. - 1995. - 28, №6. - P. 76.
89. Применение транспондеров на железнодорожном транспорте Японии // RRR: Railway Researches Review. - 1990. - 47, №12. - С.21-22.
90. Ерухимов Б.Л. Простое приближение функции ошибок // Радиотехника. - 1983. - № 2. - С. 82 - 83.
91. Чанцев К.А. Электронные автоматы для опознавания вагонов и грузов. - М.: Транспорт, 1971. - 128 с.
92. Перспективы автоматической идентификации подвижного состава // Железные дороги мира. - 1987. - №3. - С. 72-73.
93. А.с. 1024339 СССР МКИ В 61L 1/16. Устройства для определения типа вагонов /А.В.Есин, А.В.Соловьев, В.З.Юдилевич (СССР).- №3402853/27-11; Заявл. 25.02.82; Опубл. 1983, Бюл. № 23.
94. Соболев Ю.В., Бабаев М.М., Давиденко М.Г. Распознавание двоичной кодовой комбинации в условиях априорной неопределенности // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 1997. - №1. - С.71-73.
95. Армстронг Дж. Развитие систем считывания номеров вагонов // Железные дороги мира. - 1985. - №6. - С. 16-19.
96. Системы автоматической идентификации подвижного состава на железных дорогах Северной Америки // Железные дороги мира. - 1993. - №9. - С. 36-41.
97. Система магнитной маркировки подвижного состава /Баньшин И.А., Чирков А.Г., Гуськов А.Н. и др. // Сб. науч. тр. / МИИТ. - М.: МИИТ, 1993. -

98. Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы. - Л.: Энергоатомиздат, 1986.- 188 с.

99. Бабаев М.М., Демченко О.Ф., Соболев Ю.В. Структурные схемы устройств идентификации *И* Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 1997. - №3. — С.46-48.

100. Бабаев М.М., Придубков П.Я., Соболев Ю.В. Концепция новой технологии передачи данных подвижными составами железных дорог. Часть 2. Реализация постоянного магнитного поля, формирующего заданную намагниченность носителя информации // Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 1997. - №4. - С.57-61.

101. Соколов В.М., Бабаев М.М., Золочевский Л.Н., Пилипенко В.В. Исследование магнитных характеристик колесной стали для хранения информации в системе записи инвентарных номеров вагонов // Межвуз. сб. науч. тр./ ХарГАЖТ. - Харьков: ХарГАЖТ, 1986. - Вып.1. - С. 91-93.

102. Бабаев М.М., Кошевой С.В., Демченко О.Ф. Система распознавания подвижных составов метрополитена *И* Межвуз. сб. науч, тр./ ХарГАЖТ. - Харьков: ХарГАЖТ, 1994. - Вып.25. - С. 45-52.

103. Бабаев М.М. Субоптимальная процедура распознавания образов в системах управления подвижным составом метрополитена // Межвуз. сб. науч. тр./ ХарГАЖТ. - Харьков: ХарГАЖТ, 1995. - Вып. 27. - С. 68-70.

104. Бабаев М.М. Синтез двухдатчикового устройства контроля зоны *И* Межвуз. сб. науч, тр./ ХарГАЖТ. - Харьков: ХарГАЖТ, 1997. - Вып. 28. - С. 85-88.

105. Бабаев М.М. Вероятностные характеристики процесса распознавания колесных пар подвижных объектов железнодорожного транспорта *И* Міжвуз.

106. Бабаев М.М., Демченко О.Ф., Кошевой С.В. Моделирование поездного положения в электродепо метрополитенаУ/Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. - 1996. - №3,4. - С. 37-40.

107. Бабаев М.М. Оптимизация преобразователей сигналов от магнитомодуляционных чувствительных элементов // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. - 1996. - №6. - С. 54-56.

108. Соболев Ю.В., Бабаев М.М., Придубков П.Я. Концепция новой технологии передачи данных подвижными составами железных дорог *И* Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 1997. - №1. - С.74-78.

109. Бабаев М.М., Давиденко М.Г., Соболев Ю.В. Эффективность контроля зоны двухдатчиковым устройством // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 1997. - №2. - С.12-14.

ПО. Бабаев М.М., Демченко О.Ф., Соболев Ю.В. Идентификация подвижного состава на основе использования время-импульсного кодирования *И* Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 1997. - №3. - С.49-53.

111. Бабаев М.М. Синтез помехоустойчивых приемников сигналов от точечных датчиков // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 1997. - №4. - С.62-64.

112. Бабаев М.М., Соболев Ю.В., Придубков П.Я. Концепция новой технологии передачи данных подвижными составами железных дорог. Часть 3. Кодирование магнитных состояний колесных пар // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 1998. - №5. - С.83-85.

113. Бабаев М.М., Придубков П.Я., Соболев Ю.В. Концепция новой технологии передачи данных подвижными составами железных дорог. Про-

блемы распознавания железнодорожных вагонов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 1998. - №6. - С.64-67.

114. Бабаев М.М. Методология построения устройств распознавания образов подвижных объектов железнодорожного транспорта. Часть 1. Алгоритм обнаружения наличия колесных пар в зоне контроля // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 1999. - №1. - С.93-97.

115. Бабаев М.М. Оцінка достовірності прийняття рішень пристроями розпізнавання транспортних засобів // Міжвуз. зб. наук. пр. / ХарДАЗТ. - Харків: ХарДАЗТ, 1999. - Вип.35. - С. 126-131.

116. Соколов Ю.В., Бабаев М.М. Уравнения состояния электромагнитного поля первичных путевых элементов системы идентификации подвижного состава // Вісник Східноукраїнського державного університету. - 1999. - №2.-С.68-75.

117. Бабаев М.М. Методология построения устройств распознавания образов подвижных объектов железнодорожного транспорта. Часть 2. Структурные схемы помехоустойчивых приемников информационных сигналов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 1999. - №4.-С.65-68.

118. А.с. 1671507 СССР, МКИ В 61 L 25/02. Устройство для передачи информации на подвижной состав/ М.М. Бабаев, О.Ф. Демченко, С.В. Кошевой, П.Я. Придубков, Ю.В. Соколов (СССР). - № 4720708/11; Заявлено 19.07.89; Опубл. 23.08.91, Бюл. №31. - 4с.: 1 ил.

119. Пат. 13411 Україна, МКІ<sup>6</sup> В61L1/16. Пристрій для знаходження об'єкта, який рухається по рейках / М.М. Бабаев, О.Ф. Демченко, Л.О. Ісаєв, С.В. Кошовий, А.А. Прилипко, Ю.В. Соколов (Україна). - № 95010319; Заявл. 23.01.95; Опубл. 31.08.98. Бюл. № 4. - 3с.: іл. 2.

120. Пат. 21240 А Україна, МКІ<sup>6</sup> G 06 K 7/08, G 06 C 7/09. Пристрій безконтактного зчитування інформації з рухомих магнітних носіїв / М.М. Бабаєв, О.Ф. Демченко, Л.О. Ісаєв, С.В. Кошовий, Ю.В. Соколов (Україна). - № 94086586; Заявл. 08.08.94; Опубл. 27.02.98. Бюл. № 1. - 9с.: іл. 6.

121. Расчет электрических цепей и электромагнитных полей на ЭВМ /Под. ред. Л.В.Данилова. - М.: Радио и связь, 1983. - 344 с.

122. Гаспарян А.С., Новик Я.А. Численный расчет трехмерных магнитных полей методом конечных элементов с учетом насыщения стали //Изв. АН Латв. ССР. Сер. «Физические и технические науки». - 1983. - №6 - С.108-114.

123. Иванов-Смоленский А.В. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах. - М.: Энергоатомиздат, 1986.-215 с.

124. Halle H. Numerische Feldberechnung - ein modernes Instrument der Berechnung elektrischer Maschinen //Elektrie, 7, 38. - Berlin, 1984. - P.245-248.

125. Тетельбаум И.М., Тетельбаум Я.М. Модели прямой аналогии. - М.: Наука, 1979.-384 с.

126. Шило В.Л. Линейные интегральные схемы. - М: Сов. радио, 1979.-378 с.

127. Kunze W. Methoden zur Bestimmung elektromagnetischer Felder in elektrischen Maschinen //Wissenschaftlich Zeitschrift der Technischen Universität Dresden - 5. - 29. - 1980. - P. 1033-1039.

128. Williamson S., Smith A.S. Field analysis for rotating induction machines and its relationship to the equivalent - circuit method // IEEE Proceedings - 2.-127.- 1980.-P. 941-950.

129. Enokizono M., Kagawa R., Nakamura T. Nonlinear Analysis of Magnetic Field by Boundary Element Method Taking Account of External Power

Sours //Boundary Element VIII Conferens, Tokio, Sept., 1986 - Vol. 1. - Berlin e.a. - 1986.-P. 369-380.

130. Золочевский Л.Н., Бабаев М.М. Устройство для моделирования поля нелинейной ферромагнитной среды /Тезисы докл. на республ. конференции //Перспективы развития машиностроения на Украине. - 4.2. - Харьков, 1983.-С. 29.

131. Mulukutla S. Sarma. Potential Funktions in Elektromagnetic Field Problems //IEEE Transactions on Magnetics - №9. - 12970. - P.513-518.

132. Gatti E., Sampietro M. Optimum filters for detector charge measurement // Nuclear Instruments and Method in Physics Research. - 1990. - A287. - P. 513-520.

133. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Т.2.-М.: Мир, 1984.- 752 с.

134. Репин В.Г., Тартаковский Т.П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. - М.: Сов. радио, 1977. - 432 с.

135. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. - М.: Мир, 1976. - 512 с.

136. Фалькович С.Е., Хомяков Э.Н. Статистическая теория измерительных радиосистем. - М.: Радио и связь, 1981. - 288 с.

137. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. - М.: Радио и связь, 1991.- 608 с.

138. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. - М.: Наука, 1978. - 832 с.

139. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т.1. - М.: Сов. радио, 1972. - 744 с.

140. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. - М.: Сов. радио, 1977. - 608 с.
141. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. - М.: Наука, 1979. - 496с.
142. Будников В.Ф. Основные положения теоретической электротехники СЦБ. - М.: ВЗИИТ, 1986. - 90 с.
143. Шелухин О.И. Радиосистемы ближнего действия. - М.: Радио и связь, 1989. - 238 с.
144. Трифонов А.П., Шинаков Ю.С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. - М.: Радио и связь, 1986, - 264 с.
145. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. - М.: Радио и связь, 1981. - 416 с.
146. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды. Элементарные функции. - М.: Наука, 1981. - 800 с.
147. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. - М.: Радио и связь, 1983.-320 с.
148. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды. Специальные функции. - М.: Наука, 1983. - 752 с.
149. Радиотехнические системы /Под ред. Ю.М. Казаринова. - М.: Сов. радио, 1968. - 496 с.
150. Справочник по специальным функциям /Под ред. М. Абрамовича и И.Стиган. - М.: Наука, 1979.-832 с.
151. Коломбет Е.А. Микроэлектронные средства обработки аналоговых сигналов. - М.: Радио и связь, 1991. - 376 с.
152. Сиберт У.М. Цепи, сигналы, системы: В 2-х частях. 4.1. - М.: Мир, 1988.-336 с.

153. А.с. 1507633 СССР, МКИ В 61L25/02, 1/16. Устройство для автоматической маркировки железнодорожных единиц подвижного состава / Ю.В.Соболев, В.М.Соколов, Л.Н.Золочевский, М.М.Бабаев, В.И.Светличный, А.А.Прилипко, А.Ф.Майборода, С.В.Кошевой, В.Н.Гриднев (СССР). - №4340163/27-11; Заяв. 07.12.87; Оpubл. 15.09.89, Бюл. №34.-10с.: 6 ил.

154. Пospelов Д.А. Введение в теорию вычислительных систем. -М.: Сов. радио, 1972. — 280с.

155. Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я.Д. Ширмана. - М.: Сов. радио, 1970. - 560 с.

156. Metro, RER: la panorlie des controles de vitesse/ Ph. H.// Vie rail. - 1993.-№ 2383.-P. 31.

157. Automatic train supervision and driverless operation of automated guideway transit system/ Sgawa Hitoschi, Tomonaga Hiroshi// KOBELCO Technol. Rev. - 1992. - 13. - P. 17-20.

158. Бабаев М.М., Кошевой С.В., Соболев Ю.В., Демченко О.Ф. Синтез устройств учета пассажиропотоков на железнодорожном транспорте и метрополитене // Межвуз. сб. науч, тр./ ХарГАЖТ. - Харьков: ХарГАЖТ, 1994. -Вып. 25.-С. 57-61.

159. Бабаев М.М. Синтез локальных подсистем управления технологическими процессами метрополитена И Межвуз. сб. науч, тр./ ХарГАЖТ, 1995.-Вып. 27.-С. 9-13.

160. А.с. 1432596 СССР, МКИ G 11 В 5/00. Устройство для магнитной записи на ферромагнитном колесе подвижной единицы/ Ю.В. Соболев, В.М. Соколов, Л.А. Домницкий, М.М. Бабаев, А.Ф. Майборода, Л.Н. Золочевский, В.И. Светличный, С.В. Кошевой, А.А. Прилипко, В.Н. Гриднев (СССР). - № 4221587/24-10; Заявлено 02.04.87; Оpubл. 23.10.88, Бюл. № 39. - 5с.: 3 ил.

161. А.с. 1439012 СССР, МКИ В 61 L 25/02. Устройство для нанесения магнитных меток на колесную пару транспортного средства/ Ю.В. Соколов, В.М. Соколов, Л.А. Домницкий, А.Ф. Майборода, Л.Н. Золочевский, М.М. Бабаев, В.И. Светличный, В.В. Пилипенко (СССР). - № 4186021/27-11; Заявлено 28.01.87; Оpubл. 23.11.88, Бюл. № 43.-3с.: 3 ил.

162. А.с. 1477611 СССР, МКИ В 61 L 1/16. Устройство для обнаружения движущегося по рельсам объекта/ Ю.В. Соколов, В.М. Соколов, М.М. Бабаев, В.И. Борченко (СССР). - № 4162315/27-11; Заявлено 15.12.86; Оpubл. 07.05.89, Бюл. № 17. - 3с.: 2 ил.

163. А.с. 1479963 СССР, МКИ Н 01 F 13/00. Способ размагничивания колесных пар железнодорожных объектов/ Ю.В. Соколов, В.М. Соколов, Л.А. Домницкий, М.М. Бабаев, А.Ф. Майборода, Л.Н. Золочевский, В.И. Светличный, С.В. Кошевой, А.А. Прилипко, В.Н. Гриднев (СССР). - №4281568/24-07; Заявлено 23.04.87; Оpubл. 15.05.89, Бюл. № 18. - 3с.: 2 ил.

164. А.с. 1498660 СССР, МКИ В 61 L 25/02, G 06 K 7/08. Способ нанесения магнитных меток на колесо железнодорожного транспортного средства/ Ю.В. Соколов, В.М. Соколов, Л.А. Домницкий, М.М. Бабаев, А.Ф. Майборода, Л.Н. Золочевский, В.И. Светличный, С.В. Кошевой, А.А. Прилипко, В.Н. Гриднев (СССР). - № 4336977/27-11; Заявлено 30.11.87; Оpubл. 07.08.89, Бюл. № 29. - 4с.: 3 ил.

165. А.с. 1523446 СССР, МКИ В 61 L 1/08, 1/16. Путьевой индуктивный датчик/ Ю.В. Соколов, В.М. Соколов, М.М. Бабаев, Л.Н. Золочевский, А.А. Прилипко, А.Ф. Майборода, С.В. Кошевой, В.Н. Гриднев (СССР). - №4321934/27-11; Заявлено 30.10.87; Оpubл. 23.11.89, Бюл. № 43. -4с.: 3 ил.

166. А.с. 1545249 СССР, МКИ G 11 В 5/00. Устройство для воспроизведения магнитной записи/ Ю.В. Соколов, М.М. Бабаев, В.Н. Гриднев, П.Я.

Придубков, В.М. Соколов, Н.М. Федышина (СССР). - № 4463637/24-10; Заявлено 20.07.88; Оpubл. 23.02.90, Бюл. № 7. - Зс.: 1 ил.

167.А.с. 1546325 СССР, МКИ В 61 L 25/00. Устройство для нанесения магнитных меток на колесо транспортного средства/ Ю.В. Соболев, В.М.Соколов, М.М. Бабаев, А.Ф. Майборода, А.Н. Прогонный (СССР). - №4425597/27-11; Заявлено 17.05.88; Оpubл. 28.02.90, Бюл. № 8. - бс.: 5 ил.

168.А.с. 1569873 СССР, МКИ G 11 В 5/00. Устройство для считывания магнитной записи/ Ю.В. Соболев, В.М. Соколов, М.М. Бабаев, П.Я. Придубков, В.Н. Гриднев (СССР). - № 4447978/24-10; Заявлено 28.06.88; Оpubл. 07.06.90, Бюл. № 21. - Зс.: 1 ил.

169.А.с. 1571650 СССР, МКИ G11 В 5/00. Устройство для записи сигналов на колеса железнодорожных транспортных средств/ Ю.В. Соболев, В.М. Соколов, Л.А. Домницкий, В.З. Рахматов, А.Ф. Майборода, Л.Н. Золочевский, И.П. Вербицкий, М.М. Бабаев, В.И. Светличный, П.Ф. Поляков (СССР). - № 4138760/27-10; Заявлено 28.10.86; Оpubл. 15.06.90, Бюл. № 22. - 4с.: 4 ил.

170.А.с. 1588617 СССР, МКИ В 61 L 25/02. Устройство для съёма информации с ферромагнитного колеса железнодорожного транспортного средства/ Ю.В. Соболев, В.М. Соколов, М.М. Бабаев, С.В. Кошевой, В.Н. Гриднев (СССР). - № 4486744/27-11; Заявлено 26.09.88; Оpubл. 30.08.90, Бюл. № 32. - 8с.: 5 ил.

171.А.с. 1594043 СССР, МКИ В 61 L 25/02, Н 01 F 13/00. Устройство для обработки магнитным полем колесных пар вагонов/ Ю.В. Соболев, В.М. Соколов, Л.А. Домницкий, М.М. Бабаев, А.Ф. Майборода, Л.Н.Золочевский, В.И. Светличный, С.В. Кошевой, А.А. Прилипко, В.Н. Гриднев (СССР). - № 4265978/27-11; Заявлено 11.05.87; Оpubл.23.09.90, Бюл. № 35. - Зс.: 3 ил.

172.А.с. 1609719 СССР, МКИ В 61 L 25/02, G 06 K 7/08. Устройство считывания информации с колес транспортного средства/ Ю.В. Соболев, В.М. Соколов, М.М. Бабаев, П.Я. Придубков, Н.П. Савинов, В.Н. Гриднев (СССР). - № 4419059/27-11; Заявлено 03.05.88; Оpubл. 30.11.90, Бюл. №44. - 4с.: 2 ил.

173.А.с. 1615009 СССР, МКИ В 61 L 1/08, 1/16. Устройство для контроля проследования колеса железнодорожного транспортного средства/ Ю.В. Соболев, В.М. Соколов, М.М. Бабаев, А.А. Прилипко, В.Н. Гриднев (СССР). - № 4458176/27-11; Заявлено 11.07.88; Оpubл. 23.12.90, Бюл. № 47. - 2с.: 1ил.

174.А.с. 1615014 СССР, МКИ В 61 L 25/02. Устройство для записи информации на колесо транспортного средства/ Ю.В. Соболев, В.М. Соколов, М.М. Бабаев, П.Я. Придубков (СССР). - № 4416156/27-11; Заявлено 03.05.88; Оpubл. 23.12.90, Бюл. № 47. - 4с.: 1ил.

175.А.с. 1615016 СССР, МКИ В 61 L 25/04. Устройство для опознавания рельсовых транспортных средств/ Ю.В. Соболев, В.М. Соколов, М.М.Бабаев, П.Я. Придубков, Е.В. Анциферов, В.М.Крашенинников, Ю.Д. Левичев, Н.П. Савинов (СССР). - № 4458126/27-11; Заявлено 11.07.88; Оpubл. 23.12.90, Бюл. № 47. - 3с.: 1 ил.

176.А.с. 1632851 СССР, МКИ В 61 L 25/02. Устройство для опознавания рельсовых транспортных средств/ Ю.В. Соболев, В.М. Соколов, М.М.Бабаев, П.Я. Придубков, В.М. Фокин (СССР). - № 4484737/11; Заявлено 21.09.88; Оpubл. 07.03.91, Бюл. № 9. -3с.:1 ил.

177.А.с. 1643271 СССР, МКИ В 61 L 1/16. Устройство для автоматического регулирования скорости скатывания отцепов/ М.М. Бабаев, В.Н. Гриднев, Л.Н.Золочевский, А.Ф. Майборода, П.Я. Придубков, Ю.В. Соболев,

В.М. Соколов (СССР). - № 4622090/11; Заявлено 21.11.88; Оpubл. 23.04.91, Бюл. № 15. - 5с.: 2 ил.

178. А.с. 1643280 СССР, МКИ В 61 L 25/02. Способ определения наличия носителя информации на подвижном составе/ Ю.В. Соболев, М.М. Бабаев, В.Н. Гриднев, Л.Н. Золочевский, П.Я. Придубков, Н.П. Савинов, В.И. Светличный, В.М. Соколов (СССР). - № 4411993/11; Заявлено 18.04.88; Оpubл. 23.04.91, Бюл. № 15. - 3с.: 2ил.

179. А.с. 1650508 СССР, МКИ В 61 L 25/02. Устройство для передачи информации о подвижном составе железных дорог/ П.Я. Придубков, М.М. Бабаев, О.Ф. Демченко, Ю.В. Соболев, В.М. Соколов (СССР). - № 4678594/11; Заявлено 18.04.89; Оpubл. 23.05.91, Бюл. № 19. - 3с.: 1 ил.

180. А.с. 1660033 СССР, МКИ G И В 5/00. Способ определения направления магнитного потока носителя информации/ Ю.В. Соболев, В.М. Соколов, М.М. Бабаев, П.Я. Придубков, Л.Н. Золочевский, А.Ф. Майборода, В.Н. Гриднев (СССР). - № 4420433/10; Заявлено 03.05.88; Оpubл. 30.06.91, Бюл. № 24. - 3с.: 1 ил.

181. А.с. 1682229 СССР, МКИ В 61 L 1/16. Путевой датчик/ Ю.В. Соболев, В.М. Соколов, М.М. Бабаев, А.А. Прилипко, В.Н. Гриднев (СССР). - № 4607798/11; Заявлено 22.11.88; Оpubл. 07.10.91, Бюл. № 37. - 2с.: 1ил.

182. А.с. 1695378 СССР, МКИ G 11 В 5/00. Устройство для записи информации на колеса транспортного средства/ М.М. Бабаев, О.Ф. Демченко, П.Я. Придубков, Ю.В. Соболев (СССР). - № 4753422/10; Заявлено 24.07.89; Оpubл. 30.11.91, Бюл. № 44. - 5с.: 1 ил.

183. А.с. 1705167 СССР, МКИ В 61 L 25/02. Способ нанесения магнитных меток на колесо железнодорожного транспортного средства/ Ю.В. Соболев, В.М. Соколов, А.Ф. Майборода, М.М. Бабаев (СССР). - № 4617619/11; Заявл. 09.12.88; Оpubл. 15.01.92, Бюл. № 2. - 3с.: 2ил.

184. А.с. 1768429 СССР, МКИ В 61 L 25/00. Устройство для автоматического адресования железнодорожных транспортных средств/ М.М. Бабаев, О.Ф. Демченко, П.Я. Придубков, Ю.В. Соболев (СССР). - № 4721274/11; Заявлено 19.07.90; Оpubл. 15.10.92, Бюл. № 38. - Зс.: 1ил.

185. А.с. 1787852 СССР, МКИ В 61 L 25/02. Устройство для считывания номеров с железнодорожных транспортных средств/ Ю.В. Соболев, М.М. Бабаев, П.Я. Придубков, О.Ф. Демченко, В.М. Соколов, Л.Н. Золочевский (СССР). - № 4678595/11; Заявлено 18.04.89; Оpubл. 15.01.93, Бюл. № 2. - 4с.: 2 ил.

186. Пат. 21955 Україна, МКІ<sup>6</sup> В 61 L 1/08, В 61 L 1/16. Колійний індуктивний датчик/ М.М. Бабаєв, О.Ф. Демченко, Л.О. Ісаєв, А.А. Прилипко, Ю.В. Соболев (Україна). - № 94086638; Заявл. 11.08.94; Оpubл. 30.04.98, Бюл. № 2. - Зс.: 1 іл.

Приложение А

Таблица А.1

Расчет характеристик качества обнаружения при  $P(L_0) = 0,5$ ;  $P(A_i) = 0,5$  для  $P_{по}$

|          |      | 0,1    | 0,5   | 1     | 4     | 10    | 20    | 40    | 80    | 160    | 320     | 640    |
|----------|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|--------|
| $P_{по}$ | A=3  | 0,626  | 0,732 | 0,786 | 0,883 | 0,928 | 0,950 | 0,965 | 0,975 | 0,982  | 0,989   | 0,991  |
|          | A=6  | 0,636  | 0,749 | 0,806 | 0,911 | 0,956 | 0,976 | 0,987 | 0,993 | 0,996  | 0,997   | 0,998  |
|          | A=12 | 0,639  | 0,753 | 0,812 | 0,919 | 0,965 | 0,985 | 0,994 | 0,998 | 0,999  | 0,9997  | 0,9999 |
|          | A=24 | 0,6395 | 0,754 | 0,813 | 0,921 | 0,967 | 0,987 | 0,996 | 0,999 | 0,9998 | 0,99997 | -      |

Таблица А.2

Расчет характеристик качества обнаружения при  $P(2_0) = 0,5$ ;  $P(L) = 0,5$  для  $P_{ош.ср}$

| $\chi_{и}$  |      | 0,1   | 0,5   | 1     | 4     | 10    | 20    | 40     | 80     | 160     | 320                   | 640    |
|-------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|---------|-----------------------|--------|
| $P_{ош.ср}$ | A=3  | 0,361 | 0,250 | 0,196 | 0,101 | 0,061 | 0,043 | 0,031  | 0,023  | 0,018   | 0,015                 | 0,012  |
|             | A=6  | 0,360 | 0,247 | 0,189 | 0,085 | 0,041 | 0,022 | 0,012  | 0,0065 | 0,0039  | 0,0026                | 0,0019 |
|             | A=12 | 0,360 | 0,246 | 0,187 | 0,080 | 0,034 | 0,015 | 0,0057 | 0,0019 | 0,00066 | 0,00024               | 0,0001 |
|             | A=24 | 0,360 | 0,246 | 0,187 | 0,079 | 0,032 | 0,013 | 0,0041 | 0,001  | 0,00018 | $0,27 \times 10^{-4}$ | -      |

Таблица А.3

Расчет характеристик качества обнаружения при  $P(L_0) = 0,2$ ;  $P(A_i) = 0,8$  для  $P_{по}$ 

| $q?_2$   |      | 0,1    | 0,5    | 1      | 4      | 10     | 20     | 40     | 80     | 160    | 320     | 640    |
|----------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|
| $P_{по}$ | A=3  | 0,9917 | 0,9563 | 0,9404 | 0,9364 | 0,9500 | 0,9615 | 0,9714 | 0,9790 | 0,9847 | 0,9888  | 0,9919 |
|          | A=6  | 0,9899 | 0,9543 | 0,9417 | 0,9495 | 0,9689 | 0,9811 | 0,9891 | 0,9931 | 0,9960 | 0,9974  | 0,9982 |
|          | A=12 | 0,9895 | 0,9539 | 0,9422 | 0,9533 | 0,9700 | 0,9877 | 0,9950 | 0,9982 | 0,9994 | 0,9998  | 0,9999 |
|          | A=24 | 0,9894 | 0,9538 | 0,9423 | 0,9543 | 0,9765 | 0,9894 | 0,9964 | 0,9991 | 0,9998 | 0,99997 | -      |

Таблица А.4

Расчет характеристик качества обнаружения при  $P(L_0) = 0,2$ ;  $P(L_1) = 0,8$  для  $P_{ош.ср}$ .

|             |      | 0,1    | 0,5    | 1      | 4      | 10     | 20     | 40     | 80     | 160     | 320                   | 640    |
|-------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|-----------------------|--------|
| $P_{ош.ср}$ | A=3  | 0,2042 | 0,2105 | 0,1928 | 0,0919 | 0,0591 | 0,0429 | 0,0315 | 0,0235 | 0,0178  | 0,0137                | 0,0107 |
|             | A=6  | 0,2050 | 0,2082 | 0,1828 | 0,0722 | 0,0368 | 0,0208 | 0,0116 | 0,0666 | 0,0041  | 0,0027                | 0,0019 |
|             | A=12 | 0,2051 | 0,2075 | 0,1799 | 0,0666 | 0,0370 | 0,0136 | 0,0054 | 0,0019 | 0,00065 | 0,00024               | 0,0001 |
|             | A=24 | 0,2052 | 0,2073 | 0,1792 | 0,0651 | 0,0279 | 0,0117 | 0,0038 | 0,0009 | 0,00017 | 0,26x1 O <sup>4</sup> | -      |

Таблица А. 5

Расчет характеристик качества обнаружения при  $P(I_0) = 0,7$ ;  $P(A_i) = 0,3$  для  $P_{по}$ 

|          |      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |
|----------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
|          |      | 0,1    | 0,5    | 1      | 4      | 10     | 20     | 40     | 80     | 160    | 320     | 640     |
| $P_{по}$ | A=3  | 0,0626 | 0,2923 | 0,5245 | 0,8351 | 0,9113 | 0,9422 | 0,9611 | 0,9731 | 0,9810 | 0,9865  | 0,9903  |
|          | A=6  | 0,0597 | 0,2996 | 0,5605 | 0,8730 | 0,9465 | 0,9729 | 0,9861 | 0,9924 | 0,9955 | 0,9972  | 0,9981  |
|          | A=12 | 0,0590 | 0,3018 | 0,5706 | 0,8840 | 0,9573 | 0,9825 | 0,9936 | 0,9979 | 0,9994 | 0,9997  | 0,9999  |
|          | A=24 | 0,0588 | 0,3024 | 0,5733 | 0,8869 | 0,9602 | 0,9850 | 0,9955 | 0,9989 | 0,9998 | 0,99997 | 0,99999 |

Таблица А.6

Расчет характеристик качества обнаружения при  $P(I_0) = 0,7$ ;  $P(A_i) = 0,3$  для  $P_{ош.ср}$ .

|             |      |        |        |        |        |        |        |        |                       |                       |                       |                       |
|-------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|             | A=3  | 0,3075 | 0,2688 | 0,2001 | 0,0883 | 0,0519 | 0,0359 | 0,0261 | 0,0199                | 0,0159                | 0,0132                | 0,0112                |
| $P_{ош.ср}$ | A=6  | 0,3076 | 0,2689 | 0,1929 | 0,0775 | 0,0372 | 0,0199 | 0,0106 | 0,0059                | 0,0036                | 0,0024                | 0,0017                |
|             | A=12 | 0,3076 | 0,2688 | 0,1909 | 0,0740 | 0,0319 | 0,0141 | 0,0054 | 0,0018                | $0,62 \times 10^{-3}$ | $0,23 \times 10^{-3}$ | $0,95 \times 10^{-4}$ |
|             | A=24 | 0,3076 | 0,2687 | 0,1904 | 0,0731 | 0,0304 | 0,0125 | 0,0040 | $0,96 \times 10^{-3}$ | $0,17 \times 10^{-3}$ | $0,26 \times 10^{-4}$ | $0,36 \times 10^{-3}$ |

Приложение Б

Расчет характеристик качества обнаружения при параметрах  $q^2 = qJ = 0,5^{\wedge}2_2$  ;  $P(2_0) = P(J^{\wedge} = 0,5; A = 3$

Таблица Б. 1

| $<71 = 4I = 0ЛЛ^2_2$ ; $P(2_0) = P(J_0) = 0,5; A = 3$ |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $\frac{q^2}{*712}$                                    | 1,25     | 2,5      | 5        | 10       | 20       | 40       | 80       | 160      | 320      | 640      |
| $P_{\Pi 0}^{(0)}$                                     | 0,832288 | 0,888331 | 0,935047 | 0,968234 | 0,987584 | 0,996387 | 0,999293 | 0,999920 | 0,999996 | 0,999999 |
| $P_{\Pi 0}^{(0)}$                                     | -        | -        | -        | 0,928    | 0,950    | 0,965    | 0,975    | 0,982    | -        | 0,991    |
| $P_{\Pi 0}^{(OR)}$                                    | 0,936882 | 0,961122 | 0,978555 | 0,989163 | 0,994771 | 0,997491 | 0,998775 | 0,999388 | 0,999689 | 0,999840 |
| $P_{\Pi 0}^{(AND)}$                                   | 0,560653 | 0,644528 | 0,728563 | 0,802636 | 0,860600 | 0,902327 | 0,931228 | 0,951150 | 0,965033 | 0,974842 |

Таблица Б.2

| $q^* = q^2 = 0,5q^2_2$ ; $P(J_0) = P(2_0) = 0,5; A = 3$ |          |          |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|---|----------|----------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| яп  | 1,25     | 2,5      | 5                  | 10                 | 20                 | 40                 | 80                 | 160                | 320                | 640                |
| $^2_{об}.cp$  | 0,167712 | 0,111669 | $0,649 \cdot 10^4$ | $0,318 \cdot 10^4$ | $0,124 \cdot 10^4$ | $0,361 \cdot 10^2$ | $0,707 \cdot 10^3$ | $0,801 \cdot 10^4$ | $0,423 \cdot 10^5$ | $0,104 \cdot 10^6$ |
| $^1_{оо}.cp$  | -        | -        | -                  | $0,61 \cdot 10^4$  | $0,43 \cdot 10^4$  | $0,31 \cdot 10^4$  | $0,23 \cdot 10^4$  | $0,18 \cdot 10^4$  | -                  | $0,12 \cdot 10^4$  |
| $^1_{оу}.cp$  | 0,222705 | 0,166363 | 0,116              | 0,0778             | 0,0517             | 0,0359             | 0,0268             | 0,0216             | 0,0183             | 0,0161             |
| $^1_{оо}.cp$  | 0,242584 | 0,190483 | 0,142              | 0,102              | 0,071              | 0,0495             | 0,0347             | 0,0247             | 0,0176             | 0,0127             |

## Приложение В

Расчет характеристик качества обнаружения при параметрах  $q\} - q\} = 0,5^{2_2}$ ;  $P(2_0) = P(2_1) = 0,5$ ;  $A = 12$

Таблица В. 1

| $\wedge = \wedge = 0,5^{\wedge}; P(2_0) = P(Я_1) = 0,5; A = 12$ |          |          |            |          |          |          |          |          |          |           |
|---|----------|----------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| $<7\}^2$  | 1,25     | 2,5      | 5          | 10       | 20       | 40       | 80       | 160      | 320      | 640       |
| $p_{\Gamma\text{П}\text{О}}^{(a)}$                              | 0,832288 | 0,888331 | 0,935047   | 0,968234 | 0,987584 | 0,996387 | 0,999293 | 0,999920 | 0,999996 | 0,999999  |
| $p_{\Gamma\text{П}\text{О}}^{(c)}$                              | -        |          | -          | 0,965    | 0,985    | 0,994    | 0,998    | 0,999    | 0,9997   | 0,9999    |
| $p_{\text{эпо}}^{(OR)}$   | 0,947851 | 0,971230 | 0,987001 < | 0,995409 | 0,998786 | 0,999765 | 0,999966 | 0,999996 | 0,999999 | >0,999999 |
| $p_{\text{П}\text{О}}^{(AND)}$                                  | 0,595425 | 0,689536 | 0,784970   | 0,869081 | 0,931533 | 0,969600 | 0,988394 | 0,995994 | 0,998638 | 0,999499  |

Таблица В.2

| $\text{?1}^2 = \wedge = 0,5^{\text{?1}^2_2}; P(2_0) = P(A) = 0,5; \text{Л} = 12$ |          |          |                      |                       |                     |                        |                       |                       |                       |                      |
|--|----------|----------|----------------------|-----------------------|---------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| $\text{?1}^2$  | 1,25     | 2,5      | 5                    | 10                    | 20                  | 40                     | 80                    | 160                   | 320                   | 640                  |
| $p_{\text{осо.ср}}^{(c)}$  | 0,167712 | 0,111669 | 0,64940 <sup>i</sup> | 0,318*10 <sup>1</sup> | 0Д2440 <sup>1</sup> | 0,361 *10 <sup>2</sup> | 0,707*10 <sup>3</sup> | 0,801*10 <sup>4</sup> | 0,423*10 <sup>5</sup> | 0Д0440 <sup>-6</sup> |
| $p_{\text{Ой}.ср}^{(c)}$   | -        | -        | -                    | 0,3440 <sup>i</sup>   | 0,1540 <sup>i</sup> | 0,5740 <sup>2</sup>    | 0Д940 <sup>2</sup>    | 0,66*10 <sup>3</sup>  | 0,24* 10 <sup>3</sup> | 0,1*10 <sup>3</sup>  |
| $p_{\text{Ой}.ср}^{(OR)}$  | 0,226555 | 0,167662 | 0,112147             | 0,6640 <sup>i</sup>   | 0,3440 <sup>i</sup> | 0,1540 <sup>i</sup>    | 0,55*10 <sup>2</sup>  | 0Д940 <sup>2</sup>    | 0,63*10 <sup>3</sup>  | 0,23*10 <sup>3</sup> |
| $p_{\text{ой}.ср}^{(AND)}$   | 0,227831 | 0,169221 | 0,113777             | 0,68*10 <sup>1</sup>  | 0,3540 <sup>i</sup> | 0,1540 <sup>i</sup>    | 0,58*10 <sup>2</sup>  | 0,2* 10 <sup>2</sup>  | 0,68* 10 <sup>3</sup> | 0,2540 <sup>3</sup>  |

Приложение Г

Расчет характеристик качества обнаружения при параметрах  $q^2 = q^1 = 0,5q_n^2$ ;  $P(L_0) = 0,2$ ;  $P(L_2) = 0,8$ ;  $A = 3$

Таблица Г.1

| $q^2 = q^1 = 0,5q_n^2$ ; $P(L_0) = 0,2$ ; $P(L_2) = 0,8$ ; $A = 3$ |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| $\gamma_{12}^2$  | 1,25     | 2,5      | 5        | 10       | 20       | 40       | 80       | 160      | 320      | 640       |
| $p_{по}^{(э)}$   | 0,941064 | 0,945538 | 0,959984 | 0,976988 | 0,989966 | 0,996861 | 0,999356 | 0,999925 | 0,999996 | >0,999999 |
| $p_{по}^{(с)}$   | -        | -        | -        | 0,95     | 0,9615   | 0,9714   | 0,9790   | 0,9847   | 0,9888   | 0,9919    |
| $p_{по}^{(OR)}$  | 0,997554 | 0,996024 | 0,995540 | 0,996287 | 0,997500 | 0,998521 | 0,999180 | 0,999559 | 0,999765 | 0,999875  |
| $p_{по}^{(AND)}$   | 0,903530 | 0,877866 | 0,870901 | 0,881839 | 0,902498 | 0,924553 | 0,943559 | 0,958421 | 0,969564 | 0,977781  |

Таблица Г.2

| $q^2 = q^1 = 0,5q_n^2$ ; $P(L_0) = 0,2$ ; $P(L_2) = 0,8$ ; $A = 3$ |          |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
|--|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $\gamma_{12}^2$  | 1,25     | 2,5               | 5                 | 10                | 20                | 40                | 80                | 160               | 320               | 640               |
| $p_{OCO.cп}^{(э)}$   | 0,159199 | $0,93 \cdot 10^4$ | $0,54 \cdot 10^4$ | $0,27 \cdot 10^4$ | $0,11 \cdot 10^4$ | $0,33 \cdot 10^2$ | $0,67 \cdot 10^3$ | $0,77 \cdot 10^4$ | $0,41 \cdot 10^5$ | $0,66 \cdot 10^7$ |
| $p_{OCO.cп}^{(с)}$   | -        | -                 | -                 | $0,59 \cdot 10^4$ | $0,43 \cdot 10^4$ | $0,32 \cdot 10^4$ | $0,24 \cdot 10^1$ | $0,18 \cdot 10^1$ | $0,14 \cdot 10^1$ | $0,11 \cdot 10^4$ |
| $p_{OCO.cп}^{(OR)}$  | 0,196864 | 0,178100          | 0,112456          | $0,64 \cdot 10^4$ | $0,38 \cdot 10^4$ | $0,25 \cdot 10^4$ | $0,17 \cdot 10^4$ | $0,13 \cdot 10^1$ | $0,11 \cdot 10^4$ | $0,96 \cdot 10^2$ |
| $p_{OCO.cп}^{(AND)}$   | 0,218439 | 0,181139          | 0,124411          | 0,100143          | $0,8 \cdot 10^4$  | $0,61 \cdot 10^4$ | $0,46 \cdot 10^4$ | $0,33 \cdot 10^1$ | $0,25 \cdot 10^4$ | $0,18 \cdot 10^4$ |

Приложение Д

Расчет характеристик качества обнаружения при параметрах  $q^2 = ql = 0,5q^2$ ;  $P(2_0) = 0,2$ ;  $P(2_1) = 0,8$ ;  $A = 12$

Таблица Д.1

| $\hat{q} = 0,5$ ; $P(2_0) = 0,2$ ; $P(2_1) = 0,8$ ; $A = 12$ |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| $\rho_{12}$  | 1,25     | 2,5      | 5        | 10       | 20       | 40       | 80       | 160      | 320       | 640       |
| $\rho_{ПО}^{(э)}$  | 0,941064 | 0,945538 | 0,959984 | 0,976988 | 0,989966 | 0,996861 | 0,999356 | 0,999925 | 0,999996  | >0,999999 |
| $\rho_{ПО}^{(с)}$  | -        | -        | -        | 0,97     | 0,9877   | 0,9950   | 0,9982   | 0,9994   | 0,9998    | 0,9999    |
| $\rho_{ПО}^{(OR)}$   | 0,997414 | 0,996490 | 0,996938 | 0,998272 | 0,999368 | 0,999848 | 0,999975 | 0,999997 | >0,999999 | >0,999999 |
| $\rho_{ПО}^{(AND)}$  | 0,900882 | 0,885025 | 0,892398 | 0,918600 | 0,950355 | 0,975493 | 0,989954 | 0,996365 | 0,998725  | 0,999522  |

Таблица Д.2

| $q^2 = q^2 = 0,5$ ; $P(2_0) = 0,2$ ; $P(2_1) = 0,8$ ; $A = 12$ |          |                     |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                        |                       |
|--|----------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| $\rho_{2}$   | 1,25     | 2,5                 | 5                     | 10                    | 20                    | 40                    | 80                    | 160                   | 320                    | 640                   |
| $\rho_{0(с.ср)}^{(э)}$   | 0,159199 | 0,9340 <sup>i</sup> | 0,54* 10 <sup>i</sup> | 0,2740 <sup>i</sup>   | 0,1140 <sup>i</sup>   | 0,33* 10 <sup>2</sup> | 0,67* 10 <sup>3</sup> | 0,77* 10 <sup>4</sup> | 0,41 * 10 <sup>5</sup> | 0,66* 10 <sup>7</sup> |
| $\rho_{0(с.ср)}^{(с)}$   | -        | -                   | -                     | 0,3740 <sup>4</sup>   | 0,14* 10 <sup>4</sup> | 0,54* 10 <sup>2</sup> | 0,19* 10 <sup>2</sup> | 0,65* 10 <sup>3</sup> | 0,24* 10 <sup>3</sup>  | 0,1* 10 <sup>3</sup>  |
| $\rho_{0(с.ср)}^{(OR)}$  | 0,194773 | 0,165226            | 0,9040 <sup>i</sup>   | 0,44* 10 <sup>1</sup> | 0,1940 <sup>1</sup>   | 0,76* 10 <sup>2</sup> | 0,27* 10 <sup>2</sup> | 0,87* 10 <sup>3</sup> | 0,28* 10 <sup>3</sup>  | 0,140 <sup>3</sup>    |
| $\rho_{0(с.ср)}^{(AND)}$                                       | 0,210191 | 0,156169            | 0,9940 <sup>i</sup>   | 0,68* 10 <sup>1</sup> | 0,4040 <sup>i</sup>   | 0,2040 <sup>i</sup>   | 0,80* 10 <sup>2</sup> | 0,29* 10 <sup>2</sup> | 0,10* 10 <sup>2</sup>  | 0,38* 10 <sup>3</sup> |

Приложение Е

Расчет характеристик качества обнаружения при параметрах  $q^2 = q \setminus = 0,5q^2$ ;  $P(L_0) = 0,7$ ;  $P(L_X) = 0,3$ ;  $A = 3$

Таблица Е.1

| $q^2 = q \setminus = 0,5q^2$ ; $P(L_0) = 0,7$ ; $P(L_X) = 0,3$ ; $A = 3$ |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| Чп   | 1,25     | 2,5      | 5        | 10       | 20       | 40       | 80       | 160      | 320      | 640       |
| $p_{\text{по}}^{(\text{э})}$   | 0,655358 | 0,820847 | 0,911510 | 0,961134 | 0,985835 | 0,996060 | 0,999251 | 0,999917 | 0,999996 | >0,999999 |
| $p_{\text{по}}^{(с)}$  | -        | -        | -        | 0,9113   | 0,9422   | 0,9611   | 0,9731   | 0,9810   | 0,9865   | 0,9903    |
| $p_{\text{по}}^{(OR)}$   | 0,581598 | 0,843569 | 0,946288 | 0,980111 | 0,992135 | 0,996662 | 0,998485 | 0,999275 | 0,999640 | 0,999818  |
| $p_{\text{по}}^{(AND)}$  | 0,124722 | 0,365403 | 0,590195 | 0,737830 | 0,830499 | 0,887787 | 0,923662 | 0,946865 | 0,962424 | 0,973167  |

Таблица Е.2

| #1 ~ #2 $0,12$ $P(L_0) = 0,7$ ; $P(L_X) = 0,3$ ; $A = 3$ |          |          |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
|--|----------|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 412  | 1,25     | 2,5      | 5                 | 10                | 20                | 40                | 80                | 160               | 320               | 640               |
| $p_{\text{о со.ср}}^{(\text{э})}$                        | 0,164379 | 0,103793 | $0,60 \cdot 10^4$ | $0,30 \cdot 10^4$ | $0,12 \cdot 10^4$ | $0,35 \cdot 10^2$ | $0,69 \cdot 10^3$ | $0,79 \cdot 10^4$ | $0,42 \cdot 10^5$ | $0,98 \cdot 10^7$ |
| $p_{\text{оу.ср}}^{(с)}$                                 | -        | -        | -                 | $0,52 \cdot 10^4$ | $0,36 \cdot 10^4$ | $0,26 \cdot 10^4$ | $0,2 \cdot 10^4$  | $0,16 \cdot 10^4$ | $0,13 \cdot 10^4$ | $0,11 \cdot 10^4$ |
| $p_{\text{оу.ср}}^{(OR)}$                                | 0,236451 | 0,154191 | 0,106303          | $0,74 \cdot 10^4$ | $0,52 \cdot 10^4$ | $0,38 \cdot 10^4$ | $0,29 \cdot 10^4$ | $0,24 \cdot 10^4$ | $0,20 \cdot 10^4$ | $0,18 \cdot 10^4$ |
| $p_{\text{оу.ср}}^{(AND)}$                               | 0,267365 | 0,194837 | 0,126050          | $0,80 \cdot 10^4$ | $0,52 \cdot 10^4$ | $0,34 \cdot 10^4$ | $0,23 \cdot 10^4$ | $0,16 \cdot 10^4$ | $0,11 \cdot 10^4$ | $0,82 \cdot 10^2$ |

Приложение Ж

Расчет характеристик качества обнаружения при параметрах  $q^2_x = q^2 = 0,5^2$ ;  $P(2_0) = 0,7$ ;  $P(2_1) = 0,3$ ;  $A = 12$

Таблица Ж.1

| $q^2_x = q^2 = 0,5^2$ ; $P(L_0) = 0,7$ ; $P(L_X) = 0,3$ ; $A = 12$ |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
|  | 1,25     | 2,5      | 5        | 10       | 20       | 40       | 80       | 160      | 320       | 640       |
| $P_{\text{ПТО}}^{(э)}$   | 0,655358 | 0,820847 | 0,911510 | 0,961134 | 0,985835 | 0,996060 | 0,999251 | 0,999917 | 0,999996  | >0,999999 |
| $P_{\text{ПТО}}^{(с)}$   | -        | -        | -        | 0,9573   | 0,9825   | 0,9936   | 0,9979   | 0,9994   | 0,9997    | 0,9999    |
| $P_{\text{em}}^{(OR)}$   | 0,605305 | 0,878754 | 0,966549 | 0,991470 | 0,998179 | 0,999694 | 0,999960 | 0,999995 | >0,999999 | >0,999999 |
| $P_{\text{ПТО}}^{(AND)}$   | 0,138200 | 0,424838 | 0,667661 | 0,823817 | 0,916470 | 0,965304 | 0,987327 | 0,995750 | 0,998582  | 0,999485  |

Таблица Ж.2

| $q^2_{12} = q^2 = 0,5q^2_2$ ; $P(2_0) = 0,7$ ; $P(2_1) = 0,3$ ; $A = 12$ |          |          |                   |                     |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
|--|----------|----------|-------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $q^2_{12}$   | 1,25     | 2,5      | 5                 | 10                  | 20                | 40                | 80                | 160               | 320               | 640               |
| $P_{\text{ОУ}}^{(э)}.Cp$   | 0,164379 | 0,103793 | $0,60 \cdot 10^4$ | $0,3040 \cdot 10^4$ | $0,12 \cdot 10^4$ | $0,35 \cdot 10^2$ | $0,69 \cdot 10^3$ | $0,79 \cdot 10^4$ | $0,42 \cdot 10^5$ | $0,98 \cdot 10^7$ |
| $P_{\text{ОУ}}^{(с)}.Cp$   | -        | -        | -                 | $0,32 \cdot 10^4$   | $0,14 \cdot 10^4$ | $0,54 \cdot 10^2$ | $0,18 \cdot 10^2$ | $0,62 \cdot 10^3$ | $0,23 \cdot 10^3$ | $0,95 \cdot 10^4$ |
| $P_{\text{ОУ}}^{(OR)}.Cp$  | 0,235841 | 0,152370 | 0,106171          | $0,69 \cdot 10^4$   | $0,38 \cdot 10^1$ | $0,18 \cdot 10^4$ | $0,69 \cdot 10^2$ | $0,24 \cdot 10^2$ | $0,82 \cdot 10^3$ | $0,30 \cdot 10^3$ |
| $P_{\text{ОУ}}^{(AND)}.Cp$   | 0,263927 | 0,177799 | 0,103251          | $0,55 \cdot 10^1$   | $0,25 \cdot 10^4$ | $0,11 \cdot 10^4$ | $0,38 \cdot 10^2$ | $0,13 \cdot 10^2$ | $0,43 \cdot 10^3$ | $0,15 \cdot 10^3$ |

### Приложение 3

Расчет характеристик качества обнаружения при следующих параметрах

Таблица 3.1

| $=0,9^{n_2}; 9_2^2 = 0,1^{n_2}; P(2_0)=P(2_1) = 0,5; A = 3$ |          |          |          |          |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
|---|----------|----------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| #12 <sup>2</sup>  | 1,25     | 2,5      | 5        | 10       | 20                    | 40                    | 80                    | 160                   | 320                   | 640                   |
| $p_{по}^{(OЯ)}$   | 0,925750 | 0,951043 | 0,970513 | 0,983595 | 0,991420              | 0,995693              | 0,997879              | 0,998954              | 0,999478              | 0,999735              |
| $p_{ПО}^{(AND)}$  | 0,507304 | 0,576745 | 0,651232 | 0,725427 | 0,793575              | 0,850765              | 0,894660              | 0,926143              | 0,947980              | 0,963058              |
| $p_{о<>»}^{(OR)}$ cp  | 0,260116 | 0,209799 | 0,161441 | 0,118571 | 0,84* 10 <sup>4</sup> | 0,58* 10 <sup>4</sup> | 0,40* 10 <sup>4</sup> | 0,29 *10 <sup>4</sup> | 0,23 *10 <sup>4</sup> | 0,19* 10 <sup>4</sup> |
| $p_{OCO}^{(AND)}$ cp  | 0,274379 | 0,228578 | 0,183659 | 0,142009 | 0,105553              | 0,76* 10 <sup>4</sup> | 0,53*10 <sup>4</sup>  | 0,37* 10 <sup>4</sup> | 0,26* 10 <sup>4</sup> | 0,19*10 <sup>2</sup>  |

Таблица 3.2

| $q^2 = 0Д<7,^2_2; P(A_0) = PW = 0,5; A = 12$ |          |          |          |          |                       |                       |                       |                      |                       |                       |
|--|----------|----------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| #12 <sup>2</sup>                             | 1,25     | 2,5      | 5        | 10       | 20                    | 40                    | 80                    | 160                  | 320                   | 640                   |
| $p_{по}^{(OR)}$                              | 0,937908 | 0,963262 | 0,981731 | 0,992661 | 0,997700              | 0,999447              | 0,999896              | 0,999984             | 0,999998              | >0,999999             |
| $p_m^{(AND)}$                                | 0,535740 | 0,613613 | 0,697354 | 0,779911 | 0,853595              | 0,912445              | 0,953847              | 0,978916             | 0,991655              | 0,997038              |
| $p_{OCO}^{(OR)}$ cp                          | 0,261706 | 0,209913 | 0,158747 | 0,112096 | 0,73*10 <sup>4</sup>  | 0,43 *10 <sup>4</sup> | 0,22* 10 <sup>4</sup> | 0,10*10 <sup>4</sup> | 0,4* 10 <sup>2</sup>  | 0,14* 10 <sup>2</sup> |
| $p_{о co}^{(AND)}$ cp                        | 0,262616 | 0,211116 | 0,160162 | 0,113558 | 0,74* 10 <sup>4</sup> | 0,44* 10 <sup>4</sup> | 0,23*10 <sup>4</sup>  | 0,11*10 <sup>4</sup> | 0,42* 10 <sup>2</sup> | 0,15*10 <sup>2</sup>  |

## Приложение И

Расчет характеристик качества обнаружения при следующих параметрах

Таблица И.1

| $\lambda^2=0M; \lambda=0,1\lambda^2; \lambda'(2_0)=0,2; P(L_1) = 0,8; A = 3$ |          |          |          |          |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
|--|----------|----------|----------|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $<In$  | 1,25     | 2,5      | 5        | 10       | 20                | 40                | 80                | 160               | 320               | 640               |
| $p_{\text{по}}^{(OR)}$   | 0,999293 | 0,998289 | 0,997276 | 0,996913 | 0,997320          | 0,998092          | 0,998815          | 0,999323          | 0,999630          | 0,999802          |
| $p_{\text{по}}^{(AND)}$  | 0,927676 | 0,909229 | 0,896700 | 0,891697 | 0,895783          | 0,908299          | 0,925386          | 0,942530          | 0,957092          | 0,968434          |
| $p_1^{(OR)}$<br><i>Ой).cp</i>  | 0,199434 | 0,194916 | 0,182193 | 0,153262 | $0,92 \cdot 10^4$ | $0,50 \cdot 10^4$ | $0,30 \cdot 10^4$ | $0,20 \cdot 10^4$ | $0,14 \cdot 10^4$ | $0,11 \cdot 10^4$ |
| $p_2^{(AND)}$<br><i>Ой).cp</i>   | 0,192597 | 0,141570 | 0,114941 | 0,101660 | $0,89 \cdot 10^4$ | $0,75 \cdot 10^4$ | $0,60 \cdot 10^4$ | $0,46 \cdot 10^4$ | $0,35 \cdot 10^4$ | $0,25 \cdot 10^4$ |

Таблица И.2

| $q_x^2 = 0,9 < 7^2; q^2 = 0,1q^2; P(L_0) = 0,2; P(L_x) = 0,8; A = 12$ |          |          |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                      |                   |
|---|----------|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| $\lambda_{12}^2$  | 1,25     | 2,5      | 5                 | 10                | 20                | 40                | 80                | 160               | 320                  | 640               |
| $p_{\text{по}}^{(OR)}$  | 0,999173 | 0,998352 | 0,997969          | 0,998410          | 0,999194          | 0,999728          | 0,999935          | 0,999988          | 0,999998             | $>0,999999$       |
| $p_{\text{по}}^{(AND)}$   | 0,928022 | 0,915887 | 0,911883          | 0,916282          | 0,928963          | 0,947777          | 0,967674          | 0,983416          | 0,992892             | 0,997339          |
| $p_2^{(OR)}$<br><i>Ой).cp</i>   | 0,198889 | 0,192394 | 0,175989          | 0,138638          | $0,69 \cdot 10^4$ | $0,31 \cdot 10^4$ | $0,13 \cdot 10^4$ | $0,53 \cdot 10^2$ | $0,19 \cdot 10^{-2}$ | $0,65 \cdot 10^3$ |
| $p_1^{(AND)}$<br><i>Ой).cp</i>  | 0,178399 | 0,120553 | $0,92 \cdot 10^1$ | $0,74 \cdot 10^4$ | $0,58 \cdot 10^4$ | $0,42 \cdot 10^4$ | $0,26 \cdot 10^1$ | $0,13 \cdot 10^1$ | $0,57 \cdot 10^{-2}$ | $0,21 \cdot 10^2$ |

## Приложение К

Расчет характеристик качества обнаружения при параметрах  $\delta^2 = 0,9\delta_2^2$ ;  $\delta_2 = 0,1\delta_2^2$ ;  $P(I_0) = 0,7$  ;  $P(A_i) = 0,3$ ;  $A = 3$

Таблица К.

| $qf = 0,9\delta_2^2$ ; $\delta_2^2 = 0,1\delta_2^2$ ; $P(I_0) = 0,7$ ; $P(A_i) = 0,3$ ; $A = 3$ |          |          |          |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
|---|----------|----------|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $\delta^2$  | 1,25     | 2,5      | 5        | 10                | 20                | 40                | 80                | 160               | 320               | 640               |
| $P_{\text{по}}^{(OR)}$  | 0,603505 | 0,789170 | 0,892594 | 0,954856          | 0,983147          | 0,993197          | 0,997082          | 0,998679          | 0,999374          | 0,999692          |
| $P_{\text{по}}^{(AND)}$   | 0,04558  | 0,119092 | 0,247970 | 0,474741          | 0,681404          | 0,800642          | 0,871895          | 0,915268          | 0,942352          | 0,959879          |
| $P_{\text{о со. ср}}^{(OR)}$  | 0,204426 | 0,154794 | 0,122567 | $0,95 \cdot 10^4$ | $0,73 \cdot 10^4$ | $0,55 \cdot 10^4$ | $0,41 \cdot 10^4$ | $0,31 \cdot 10^4$ | $0,25 \cdot 10^4$ | $0,21 \cdot 10^4$ |
| $P_{\text{о со. ср}}^{(AND)}$   | 0,288861 | 0,267478 | 0,228582 | $0,159763$        | $0,97 \cdot 10^4$ | $0,61 \cdot 10^4$ | $0,39 \cdot 10^4$ | $0,26 \cdot 10^4$ | $0,17 \cdot 10^4$ | $0,12 \cdot 10^4$ |

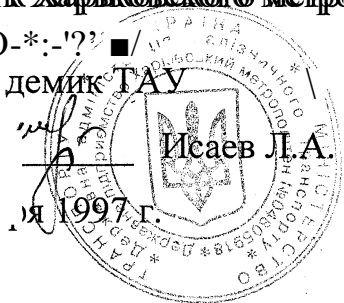
Таблица К.2

Расчет характеристик качества обнаружения при параметрах  $q^2 = 0,9\#^2_2$ ;  $q^2_2 = 0,1q^2_2$ ;  $P(J_0) = 0,7$ ;  $P(J^{\wedge}) = 0,3$ ;  $A = 12$

| $q^* = 0,9^{\wedge}$ ; $q^2 = 0,1q^2_2$ ; $P(J_0) = 0,7$ ; $P(J.) = 0,3$ ; $A = 12$ |          |          |          |                     |                     |                     |                        |                       |                       |                       |
|---|----------|----------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $A_{12}$  | 1,25     | 2,5      | 5        | 10                  | 20                  | 40                  | 80                     | 160                   | 320                   | 640                   |
| $p^{(OR)}_{\text{ПО}}$  | 0,645066 | 0,829726 | 0,928126 | 0,979247            | 0,995447            | 0,999134            | 0,999861               | 0,999980              | 0,999997              | >0,999999             |
| $p^{(AND)}_{\text{ПО}}$   | 0,04693  | 0,125074 | 0,270757 | 0,543060            | 0,759003            | 0,877438            | 0,942244               | 0,975541              | 0,990793              | 0,996838              |
| $p^{(OR)}_{\text{ОСО.ср}}$  | 0,195700 | 0,146530 | 0,114250 | 0,8840 <sup>i</sup> | 0,6540 <sup>i</sup> | 0,4340 <sup>4</sup> | 0,2540 <sup>-1</sup>   | 0,1240 <sup>1</sup>   | 0,49*10 <sup>-2</sup> | 0,18*10 <sup>-2</sup> |
| $p^{(AND)}_{\text{ОСО.ср}}$   | 0,288594 | 0,265965 | 0,221863 | 0,138956            | 0,7340 <sup>i</sup> | 0,3740 <sup>4</sup> | 0,17* 10 <sup>-1</sup> | 0,734 0 <sup>-2</sup> | 0,28*10 <sup>-2</sup> | 0,9540 <sup>-3</sup>  |

УТВЕРЖДАЮ

Начальник Харьковского метрополитена /О. \*- ' ? ? ■ /  
к.т.н.. академик Т А У



УТВЕРЖДАЮ

Ректор ХарГАЖТ  
д.т.н., академик Т А У



Соболев Ю.В.

«9» октября 1997 г.

А К Т

от «9» октября 1997 г.

о внедрении «Автоматизированной системы идентификации вагонов на Салтовской линии Харьковского метрополитена», разработанной академией железнодорожного транспорта совместно с Харьковским метрополитеном

Комиссия в составе главного инженера службы автоматики, телемеханики и связи метрополитена Филипповича В.П., начальника электродепо «Салтовское» Однорогова А.С., главного инженера электродепо Черных О.В., доцента, к.т.н. Бабаева М.М., доцента, к.т.н. Пилипенко В.В. составила настоящий акт в том, что в результате совместных работ ХарГАЖТ и Харьковского метрополитена с 01.01.97 г. по 09.10.97 г. на Салтовском электродепо была внедрена «Автоматизированная система идентификации вагонов метрополитена», включающая центральный микропроцессорный комплекс, напольные устройства считывания и обработки информации (13 контрольных точек), путевые датчики учета проследования вагонов (24 контрольных точки), вагонные датчики (105 единиц), устройства записи магнитной информации на подвижной состав (1 комплект), силовое и коммутационное оборудование (2 комплекта), устройства считывания магнитной информации с колесных пар подвижного состава (2 комплекта) и локальную компьютерную сеть.

Разработанная система позволяет:

1. Учитывать реальный пробег вагонов.
2. Обеспечить выполнение с заданной точностью планового графика движения электропоездов.

3. Осуществлять построение и реализацию нового графика движения с учетом реального масштаба времени.
4. Совершенствовать работу электродепо за счет оптимизации пробега вагонов между ТО1, ТО2, ТО3 и их капитальными ремонтами.
5. Осуществлять диагностику силового электрооборудования вагонов непосредственно во время их движения по изменению уровней магнитных полей рассеяния.

Расчетный экономический эффект от внедрения автоматизированной системы идентификации вагонов в период с 1997 по 2010 гг. составляет 4769 тыс. грн. в ценах 1997 г.

Главный инженер службы автоматики,  
телемеханики и связи метрополитена  
Начальник электродепо «Салтовское»  
Гл. инженер электродепо «Салтовское»  
к.т.н., доцент ХарГАЖТ  
к.т.н., доцент

Филиппович В.П.

Однорогое А.С.

Черных О.В.

Бабаев М.М.

Пилипенко В.В.