

На правах рукописи



**ИВАШЕВСКИЙ МИХАИЛ РОМАНОВИЧ**

**СИСТЕМЫ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ  
БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ  
ТРАНСПОРТЕ**

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент,  
профессор каф. «АТС на ж.д. транспорте»  
**Журавлёва Любовь Михайловна**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 СИСТЕМА ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ КАК ТЕХНИЧЕСКОЕ СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ.....	12
1.1 Состояние вопроса повышения безопасности движения поездов.....	12
1.2 Критерии эффективности повышения безопасности движения поездов с помощью систем интеллектуального видеонаблюдения.....	18
1.3 Функция потерь от ложного обнаружения и пропуска опасного объекта системой интеллектуального видеонаблюдения на железнодорожном транспорте.....	21
1.4 Функциональные возможности систем интеллектуального видеонаблюдения.....	25
1.5 Принципы организации систем видеонаблюдения для повышения безопасности движения поездов.....	31
1.6 Сеть видеонаблюдения с использованием канала беспроводной оптической связи с движущимся поездом.....	42
1.7 Способы повышения эффективности систем видеонаблюдения для повышения безопасности движения поездов.....	46
1.8 Выводы по главе.....	47
ГЛАВА 2 КАЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИДЕОСИГНАЛОВ В СИСТЕМЕ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА.....	49
2.1 Методика оценки критерия качества систем видеонаблюдения.....	49
2.2 Оценка приведенной дисперсии погрешности сигналов фотосенсора.....	56
2.3 Оценка приведенной дисперсии погрешности сигналов фотоприемника.....	70
2.4 Оценка приведенной дисперсии суммарной погрешности видеосигналов.....	75

2.5	Методика оценки критерия достоверности сигналов видеонаблюдения.....	76
2.6	Выводы по главе.....	78
ГЛАВА 3 СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ВИДЕОСИГНАЛОВ В СИСТЕМЕ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА.....		
3.1	Повышение качества сигналов систем видеонаблюдения с помощью оптоэлектронных устройств нового поколения.....	81
3.2	Методика проектирования материала на квантовых структурах.....	82
3.3	Исследование влияния материала из квантовых ям на параметры фотоприемника с помощью математического моделирования.....	86
3.4	Исследование влияния характеристик сверхрешеток на параметры беспроводного оптического канала связи с помощью математического моделирования.....	90
3.5	Исследование повышения качественных характеристик фотодетекторов за счет нового полупроводникового материала.....	96
3.6	Выводы по главе.....	103
ГЛАВА 4 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ.....		
4.1	Методика оценки повышения эффективности систем видеонаблюдения с помощью оптоэлектронных устройств нового поколения.....	104
4.2	Исследование повышения качества сигналов фотодетектора с помощью нового материала на объемных кристаллах.....	105
4.3	Исследование повышения качества сигналов фотодетектора с помощью нового материала на квантовых ямах.....	108
4.4	Оценка повышения качества сигналов канала передачи информации за счет оптоэлектронных устройств нового поколения.....	115

4.5 Оценка повышения эффективности систем видеонаблюдения за счет оптоэлектронных устройств нового поколения.....	117
4.6 Выводы по главе.....	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	122
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	126
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	136
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	139

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Проблема технического обеспечения безопасности движения поездов – одна из самых главных на железнодорожном транспорте. Актуальность темы подтверждается принятой в 2019 году компанией ОАО РЖД долгосрочной программой перехода на «Цифровую железную дорогу». Она предусматривает полную интеграцию интеллектуальных телекоммуникационных технологий между пользователем, транспортным средством, системой управления движения и инфраструктурой.

В рамках этой концепции предполагается реализация проектов, повышающих безопасность движения поездов, например, «умное депо», «умный вагон», «умный переезд» с использованием связевой инфраструктуры, проложенной вдоль железнодорожного полотна. Наиболее остро проблема повышения безопасности движения стоит на переездах, высокоскоростных участках, «слепых зонах». Существующая тенденция к росту дорожно-транспортных происшествий особенно на нерегулируемых переездах диктует необходимость разработки и внедрения специальных технических мер по предотвращению аварий. Так, в рамках проекта «умный переезд» предусматривается создание интеллектуальной системы мониторинга, способной выявлять потенциально опасные объекты, отслеживать их перемещение в заданной зоне наблюдения и информировать о наличии угрозы всех участников перевозочного процесса, прежде всего машиниста.

Организация мониторинга возможна с помощью системы интеллектуального видеонаблюдения (СИВ) за движением через переезд. Система включает в себя канал передачи информации (видеокамеры, линии и устройства связи) в диспетчерский центр управления движением (ДЦУ) и кабину машиниста, а также устройства распознавания. Для внедрения мониторинга переезда с помощью СИВ необходима оценка возможностей системы по техническому обеспечению безопасности движения поездов. Для получения такой оценки требуется разработка критериев соответствия СИВ поставленной задаче

повышения безопасности движения поездов. Основное требование к техническим средствам повышения безопасности – это снижение вероятности аварийной ситуации. Поэтому обязательным критерием соответствия СИВ является достоверность видеоинформации, которая оценивается вероятностями правильного и ложного обнаружений опасного объекта. Значения этих вероятностей во многом зависят от величины искажений видеосигнала на входе устройства распознавания СИВ. Отсюда, необходимым критерием является качество видеосигнала, которое оценивается приведенной дисперсией погрешности, внесенной устройствами СИВ и системой передачи информации. Для принятия решения о соответствии СИВ задачам интеллектуального мониторинга переезда требуются допустимые границы оценок критериев. Эта задача решается с помощью функции потерь, основу которой составляют экономические потери из-за аварий на переездах. Полученная в работе величина вероятности ложного обнаружения  $P_{лож.обн.} \leq 10^{-4}$  и результат сравнения с вероятностью, которую может обеспечить в настоящее время СИВ ( $P_{лож.обн.} = 10^{-3}$ ), свидетельствуют о необходимости повышения технического уровня СИВ. Наиболее эффективный способ – это переход на новую элементную базу нанoeлектроники, позволяющую значительно повысить качественные показатели технических устройств.

В основе решения указанных проблем лежат теоретические и прикладные исследования Фомина А.Ф., Лисенкова В.М., Лебедева А.И., Мартинес-Дуарта Дж.М., Розеншер Э., Винтер Б., Сойфера В.А., Журавлёва Ю.И., Бакута П.А., Фурмана Я.А., Pratt W.K., Roberts L.G., Sobel I.E. и др.

**Целью** настоящей диссертационной работы является разработка научно-методических принципов организации и проектирования каналов передачи цифровой видеоинформации, обеспечивающих повышение безопасности движения поездов.

Для достижения поставленной цели решаются **основные научные задачи**:

1) выбор и обоснование критериев и оценок соответствия систем видеонаблюдения требованиям обеспечения безопасности движения на

железнодорожном транспорте;

2) разработка методик расчета оценок эффективности СИВ на железнодорожном транспорте и анализ полученных результатов;

3) разработка предложений по повышению эффективности СИВ согласно требованиям безопасности движения поездов на железнодорожном транспорте;

4) анализ повышения эффективности СИВ за счет реализации разработанных предложений по улучшению качественных показателей систем видеонаблюдения.

**Объектом** исследования являются каналы передачи цифровой видеoinформации в виде устройств, систем и сетей, предназначенных для видеонаблюдения за движением поездов.

**Предметом** исследований являются научные принципы разработки и проектирования систем видеонаблюдения, интегрированных в систему безопасности движения на железнодорожном транспорте.

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

1. Научно-методические основы и принципы разработки и проектирования каналов передачи цифровой видеoinформации в виде технических устройств систем видеонаблюдения для железнодорожного транспорта на основе элементной базы нового поколения.

2. Методики оценок критериев качества и достоверности сигналов систем видеонаблюдения с помощью приведенной дисперсии суммарной погрешности и вероятностей правильного и ложного обнаружений.

3. Результаты исследований влияния оптоэлектронных характеристик материала на качество сигналов систем видеонаблюдения.

4. Методика оценки повышения качества систем видеонаблюдения за счет использования элементной базы нового поколения.

5. Результаты анализа повышения эффективности систем видеонаблюдения за счет новой элементной базы, позволяющей соответствовать требованиям безопасности движения поездов.

**Научная новизна.** В рамках диссертационного исследования получены новые научные результаты, имеющие большое значение для разработок технических устройств, обеспечивающих повышение безопасности движения поездов на железнодорожном транспорте:

1. Предложены критерии оценки эффективности систем видеонаблюдения для повышения безопасности движения поездов на железнодорожном транспорте.
2. Разработана методика комплексной оценки качества сигналов СИВ с учетом элементной базы нового поколения.
3. С помощью математического моделирования проведено исследование влияния элементной базы на качество сигналов фотосенсора и фотоприемника.
4. Разработана методика оценки повышения эффективности СИВ на новой элементной базе, учитывающая критерии достоверности и качества сигналов.
5. Получены количественные оценки критериев эффективности СИВ на элементной базе нового поколения, отвечающие требованиям безопасности движения поездов.

**Методы исследований** основаны на теории передачи сигналов и оптимального приема, математическом моделировании, теории вероятностей и математической статистики, теории оптоэлектроники и физики полупроводников, теории мезоскопической физики.

**Обоснованность и достоверность** полученных научных результатов, выводов и рекомендаций обусловлена корректной постановкой задачи, принятыми допущениями и ограничениями, подтверждена использованием апробированного математического аппарата теорий передачи сигналов, вероятностей и математической статистики, мезоскопической физики, математического моделирования, сравнением прогнозируемых результатов с расчетами вычислительных и натуральных экспериментов.

**Теоретическая значимость** научных результатов заключается в принципиальном вкладе автора в решении технических задач организации и проектирования каналов передачи цифровой видеоинформации для СИВ на железнодорожном транспорте, в разработке новых методов исследования влияния



элементной базы на качество и достоверность сигналов систем видеонаблюдения, в создании способа эффективного использования существующих сетей связи железнодорожного транспорта для передачи видеoinформации в кабину машиниста и в центр принятия решений.

### **Практическая значимость.**

1. Разработаны научно-методические основы проектирования каналов передачи цифровой видеoinформации для любых объектов, учитывающие особенности железнодорожного транспорта.

2. Разработаны методики проектирования технических средств видеонаблюдения нового поколения на основании предложенных критериев эффективности СИВ, расчеты по которым позволили сделать следующие выводы:

1) величина приведенной дисперсии суммарной погрешности снижается более, чем в 50 раз;

2) вероятность ложного обнаружения снижается до величины  $P_{лож.обн.} \leq 10^{-4}$ ;

3) вероятность правильного обнаружения повышается до величины  $P_{прав.обн.} \geq 0,9993$ ;

4) полученные результаты эффективности СИВ нового поколения соответствуют требованиям по безопасности движения поездов.

3. Разработаны новые технические решения в организации сетей передачи информации о состоянии объектов железнодорожного транспорта, включающие новый вид связи в виде беспроводных оптических каналов. Все эти предложения позволяют повысить оперативность доставки информации, совершенствовать процесс управления движением поездов и обосновать эффективность использования СИВ для повышения безопасности.

### **Соответствие паспорту специальности.**

Согласно паспорту специальности 05.12.13 Системы, сети и устройства телекоммуникаций, рассмотренные в диссертации задачи соответствуют областям исследований:

1. Исследование процессов передачи и отображения цифровой видеoinформации, позволяющих повысить эффективность работы сети (гл.2,3,4).

2. Разработка эффективных путей развития и совершенствования архитектуры сетей и систем телекоммуникаций и входящих в них устройств (гл.1).

3. Разработка методов эффективного использования сетей, систем и устройств телекоммуникаций в различных отраслях народного хозяйства (гл.1).

4. Разработка методов исследования, моделирования и проектирования сетей, систем и устройств телекоммуникаций (гл.2,3,4).

Апробация. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на:

1) XV Юбилейной Санкт-Петербургской международной конференции «Региональная информатика (РИ-2016)» Санкт-Петербург, 2016;

2) XII Международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации», Суздаль, 2017;

3) VIII Международной научно-практической конференции, посвященной году науки «Проблемы безопасности на транспорте», Гомель, 2017;

4) XIX Всероссийская научно-практическая конференция «Безопасность движения поездов», Москва, 2018;

5) Всероссийской научно-практической конференции «Неделя науки – 2019», Москва, 2019.

6) XIII Международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации», Владимир, 2019;

7) Всероссийской научно-практической конференции «Неделя науки – 2020», Москва, 2020.

8) II Международной научно-практической конференции «Инновационный научные исследования в современном мире», Уфа, 2020.

Публикации. Основные научные результаты отражены в 15 публикациях, в 6 статьях в научно-технических журналах из перечня, рекомендованного ВАК РФ для защиты кандидатских диссертаций.

#### **Реализация.**

Результаты внедрены в новые проекты ООО «Наука-Связь», ООО

«Связьпроект групп», НИИ АС, ЦСС ОАО «РЖД», учебный процесс при изучении дисциплин «Теория передачи сигналов» и «Нанотехнологии в телекоммуникациях» РУТ (МИИТ).

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из основной части и приложения.

Основная часть содержит введение, четыре главы, заключение в виде выводов и список литературы (87 наименований). Объем основной части составляет 157 страниц машинописного текста, иллюстрируется 1 таблицей и 36 рисунками. В приложении приведены компьютерные программы, реализующие алгоритмы математического моделирования, а также результаты вычислений.

**Личное участие.** Основные теоретические результаты получены лично автором в период с 2016 – по 2020 год.

# ГЛАВА 1 СИСТЕМА ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ КАК ТЕХНИЧЕСКОЕ СРЕДСТВО ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

## 1.1 Состояние вопроса повышения безопасности движения поездов

Проблема повышения безопасности движения поездов - самая актуальная на железнодорожном транспорте. Безопасность движения поездов (БДП) – это состояние процесса движения железнодорожного подвижного состава, а также технических средств, участвующих в этом процессе, при котором отсутствует риск перехода в опасное состояние. Это состояние движения, при котором возникают поражающие факторы, создающие опасность причинения вреда здоровью людей, имуществу физических и юридических лиц, а также окружающей среде в результате аварий [1,2].

Для предотвращения перехода в опасное состояние (например, столкновения поезда с транспортным средством другого вида на переезде) предусматриваются определенные действия по повышению БДП в виде организационных мер и внедрения технических средств [2].

Таким техническим средством является система видеонаблюдения, которая состоит из канала и приемника видеоинформации (устройства распознавания или оператора). Показатель БДП - вероятность проследования поездом участка пути без перехода его в опасное состояние. Основным требованием к техническим средствам повышения БДП является снижение вероятности аварийной ситуации. Снижение вероятности аварийных ситуаций реализуется с помощью систем видеонаблюдения за счет правильного обнаружения опасных объектов и своевременного оповещения всех участников движения.

Особенно остро проблема обеспечения безопасности имеет место при движении автотранспорта через переезд [3].

Главная причина аварий на переездах – наезды подвижного состава на автотранспорт и пешеходов. Это происходит в местах отсутствия защитных

ограждений железнодорожных путей особенно на участках скоростного движения, а также на переездах из-за нарушений порядка пересечения железной дороги. Как свидетельствует статистика, основные причины дорожно-транспортных происшествий (ДТП) на переездах – проезд на запрещающий сигнал из-за невнимательности водителя, либо неисправность автомобилей, например, отказ тормозов. Существующая тенденция к увеличению ДТП на переездах требует принятия неординарных способов предотвращения аварийных ситуаций. Особое внимание по обеспечению безопасности требуется на нерегулируемых переездах (без шлагбаума).

Статистика по случаям ДТП на железнодорожных переездах за 2016-2019 года представлена на рисунке 1.1 [3,4,5].

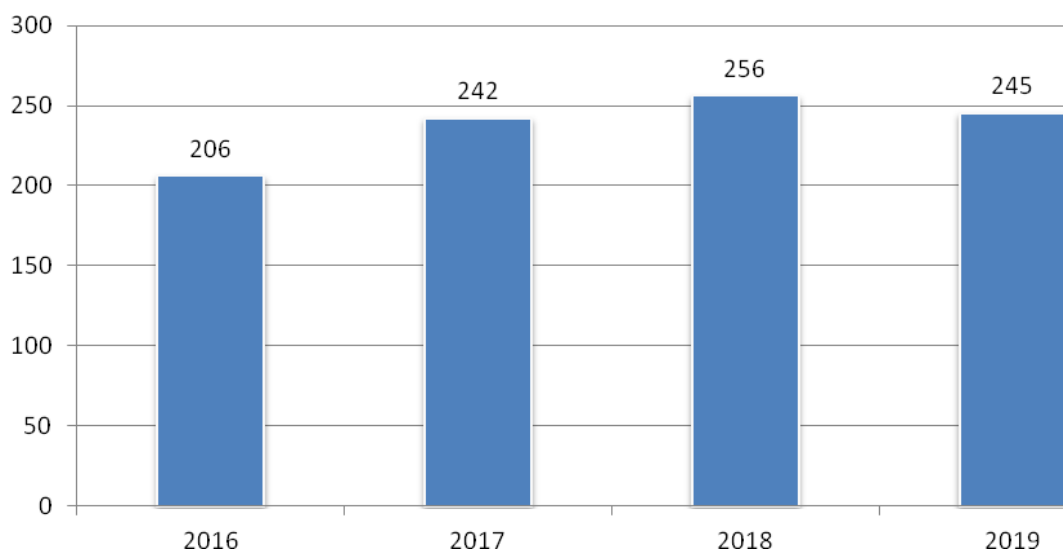


Рисунок 1.1 – Статистика ДТП на переездах за 2016-2019 г.г.[5]

Повышение интенсивностей движения поездов и потока автомобилей особенно в условиях скоростного движения диктует необходимость разработки и внедрения специальных технических мер по предотвращению аварий [6].

Существуют несколько кардинальных способов предотвращения аварий на переездах. Это - устранение одноуровневого пересечения железнодорожного полотна и автомобильной дороги, сокращение числа переездов, своевременное оповещение водителей о приближающемся поезде, а в случае возникновения опасной ситуации своевременное обнаружение посторонних объектов и

оповещение специальных служб железной дороги (ж/д) и прежде всего, машиниста приближающегося поезда [7].

Первый путь - очень затратный и применение его обосновано только для дорог с интенсивным движением транспорта. Второй путь сокращения числа переездов ухудшает социальную и транспортную инфраструктуру, сообщение между близлежащими населенными пунктами. Третий путь своевременного оповещения всех участников движения является наиболее целесообразным.

Подобное оповещение можно реализовать с помощью различных технических средств, в том числе систем видеонаблюдения СИБ [6,8].

В настоящее время оповещение о приближающемся поезде частично реализовано с помощью существующей автоматической переездной сигнализации совместно с цифровыми системами. Например, системой «модуль безопасности железнодорожного переезда» (МБЖДП) и видеонаблюдения производства ГК «Аспект Безопасности» [9].

Система МБЖДП оснащена оптическими датчиками (излучатели-фотоприемники, действующие по принципу работы оптрона), которые сканируют территорию переезда в отсутствие поезда. При обнаружении препятствия при закрытом шлагбауме система посылает световые и звуковые сигналы оповещения (тревоги) службам ж/д, в том числе машинисту локомотива с помощью поездной радиосвязи (ПРС). Система МБЖДП позволяет снизить вероятность столкновения опасного объекта с поездом, но имеет существенный недостаток. Он заключается в следующем: нет идентификации «опасного» объекта, а следовательно, обоснования необходимости экстренного торможения, которое может повлечь за собой серьезные последствия: травмы пассажиров, срыв графика движения, экономические потери и др. Если объект не представляет угрозы движению поезда, сигнал тревоги может оказаться ложным.

Для устранения этого недостатка необходим прямой видеоканал с машинистом. Чтобы принять правильное решение, машинист должен иметь возможность заранее оценить обстановку на переезде по видеоизображению (на расстоянии не менее 2 км до переезда) и вовремя затормозить. Поэтому более

эффективными средствами для предотвращения аварий являются системы видеонаблюдения. Самый простой вариант предусматривает установку видеокамеры и передачу видеоизображения переезда в кабину машиниста с помощью технологии *Wi-Fi*. Такой способ организации видеонаблюдения уже частично внедрен компаниями «АВИДЭЛ» и «МОВОТІХ» на опытном полигона Московской железной дороги [10].

С помощью видеотерминалов и передающего оборудования *Wi-Fi* компании МОВОТІХ, установленных на локомотивах и переездах, осуществляется передача изображения в кабину машиниста (за 2 км до переезда). Аналогичный принцип видеонаблюдения за переездами с помощью высокоскоростных цифровых каналов предлагает компания «Fluidmesh» (за 5-10 км до видеокамер) [11].

Недостатком таких систем является отсутствие видеоаналитики для распознавания посторонних объектов, а также канала передачи информации в единый диспетчерский центр управления (ЕДЦУ) в автоматическом режиме. Это необходимо для своевременного принятия решения о скорости движения поезда и регулирования графика движения. Использование систем распознавания опасных ситуаций (камеры со встроенной видеоаналитикой) и передача совместно с видеосигналом и звукового сигнала «тревоги» в случае опасности позволит привлечь внимание машиниста при приближении к переезду. Такой способ повышения безопасности движения поездов с помощью систем интеллектуального видеонаблюдения (СІВ) возможен при условии наличия сети видеонаблюдения. Поэтому для реализации СІВ необходим анализ различных вариантов сетевых архитектур видеонаблюдения с учетом имеющихся каналов связи на ж/д.

Подобные сети СІВ уже внедрены на отдельных участках скоростного движения Октябрьской железной дороги с использованием видеоаналитики в специально разработанной системе безопасности «Интеллект» компании «ІTV АххонSoft» [12]. В основе системы безопасности - мультиспектральный модуль, который фиксирует появление на рельсах посторонних предметов и передает

информацию операторам системы. Операторы информируют диспетчерские службы и поездные бригады. Очевидный недостаток системы - недостаточная оперативность доставки информации. Вероятность того, что время доставки информации в кабину локомотива превысит время безопасного торможения, недопустимо велика. При скоростном движении для повышения оперативности принятия решения результаты работы видеоаналитики в виде изображений опасных объектов должны сразу (а не через оператора в ЕДЦУ) поступать машинисту поезда (для исключения ложных обнаружений), а также поездному диспетчеру (ДНЦ) и дежурным по станциям (ДСП).

Перспективным методом управления движением поездов является система интервального регулирования. Среди разработанных и внедряемых в последнее время систем интервального регулирования представляет интерес система СИРДП-Е, в которой особое внимание уделено повышению надежности устройств управления движением поездов [13].

Среди наиболее важных результатов внедрения системы СИРДП-Е, непосредственно касающихся безопасности и эффективности управления движением поездов, можно отметить следующие:

1) повышение безопасности движения поездов за счет снижения ошибок со стороны обслуживающего персонала и повышения безопасности при производстве маневровых работ;

2) высокая надежность и готовность системы, горячее резервирование основных элементов системы; в случае выхода из строя основных средств управления система переходит в защищенное состояние с безопасным контролем занятия и освобождения поездом перегона; связь с подвижными объектами осуществлена посредством цифрового радиоканала;

3) расширенная диагностика и контроль состояния системы, существенное сокращение времени поиска и устранения неисправностей.

Однако, обнаружить посторонние объекты на железнодорожных путях опасных участков (скоростных, со сложным рельефом в виде «слепых зон», с повышенной вероятностью камнепадов, оползней, переездов и т.д.) и



предотвратить аварию система СИРДП-Е не имеет возможности. Чтобы «увидеть» и оценить степень опасности описанных выше ситуаций необходимо внедрять системы интеллектуального видеонаблюдения, которые бы функционировали совместно с СИРДП-Е.

Совместное использование СИРДП-Е и системы интеллектуального видеонаблюдения повысит безопасность и эффективность управления движением поездов за счет возможности обнаружения и предотвращения дорожно-транспортных происшествий на переездах, аварий на участках со сложным рельефом особенно в условиях плохой видимости, в случае террористических угроз взрывов в тоннелях, на мостах и других охраняемых объектах.

Наиболее простой вариант организации СИВ предусматривает установку видеокамеры с функцией видеоаналитики и передачу видеоизображения переезда оперативному сотруднику в ЕДЦУ либо непосредственно машинисту подвижного состава. В более сложном варианте с распределенной видеоаналитикой интеллектуальное видеонаблюдение позволит создать систему автоматического управления движением поездов.

Однако в настоящее время системы интеллектуального видеонаблюдения имеют существенный для ж/д недостаток. Это - относительно высокая вероятность ложного обнаружения [14], которая может привести к необоснованным командам экстренного торможения и, как следствие, к тяжелым травмам пассажиров, разрывам тормозных магистралей, нарушениям графика движения поездов. Причина ложных обнаружений СИВ заключается в недостаточно высоком качестве формирования цифрового видеосигнала, искажениях и его ошибочной обработке (видеоаналитике).

Поэтому для повышения эффективности работы СИВ и снижения вероятности ложного обнаружения необходимо улучшать качество сигналов и совершенствовать алгоритмы видеоаналитики. Одной из главных задач, связанных с внедрением СИВ, является оценка качества передачи видеосигналов и разработка путей снижения вероятности ложного обнаружения. Решение этой задачи состоит из нескольких этапов:

- 1) исследование источников искажения сигнала СИВ в условиях железнодорожного транспорта;
- 2) разработка модели оценки и методики расчёта величины искажений;
- 3) разработка предложений по улучшению качества видеосигналов, т.е. повышению отношения мощностей сигнал/шум (с/ш) на входе устройств распознавания опасных объектов СИВ.

Таким образом, можно сделать вывод: главным условием предотвращения аварийных событий является эффективная работа систем управления скоростью движения поездов совместно с СИВ. Это позволяет своевременно обнаружить опасный объект и передать команду остановки подвижного состава машинисту локомотива, а также транслировать эту информацию поездному диспетчеру. Автоматические и автоматизированные системы видеонаблюдения есть ключевые составляющие современных комплексных систем безопасности.

## **1.2 Критерии эффективности повышения безопасности движения поездов с помощью систем интеллектуального видеонаблюдения**

Обеспечение безопасности движения поездов – одна из главных задач, стоящая перед всеми подразделениями железнодорожного транспорта (управления движением поездов, автоматики, сигнализации и блокировки, локомотивного, вагонного, путевого хозяйств и пр.). Повышение БДП и предотвращение аварий возможно за счет применения таких технических средств, как системы видеонаблюдения. Для использования СИВ с целью повышения БДП необходим анализ технических возможностей систем видеонаблюдения. Решение этой задачи требует разработки критериев соответствия качественных характеристик СИВ требованиям безопасности (рисунок 1.2), которые выбираются на основании функции потерь (1.3).

**Безопасность движения поездов (БДП)** — состояние процесса движения ж/д подвижного состава, а также технических средств, участвующих в этом процесс, при котором отсутствует риск перехода в опасное состояние.

Для предотвращения перехода в опасное состояние предусматриваются действия по повышению БДП в виде внедрения технических средств.

Показатель БДП – вероятность проследования поездом участка пути без перехода в опасное состояние.

Основным требованием к техническим средствам повышения БДП является предотвращение риска наступления опасного дестабилизирующего фактора (снижение вероятности аварийной ситуации).

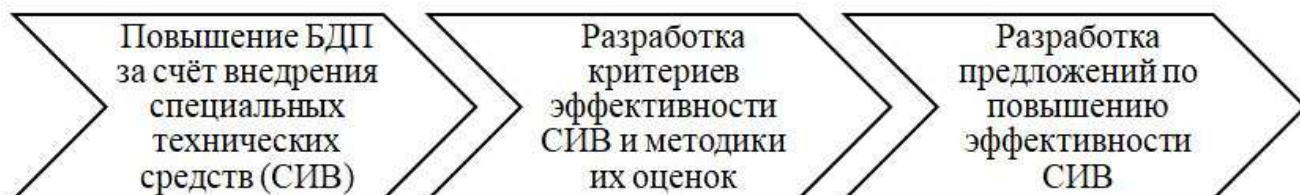


Рисунок 1.2 – Основные определения и пути решения задачи БДП

Кроме обоснования критериев соответствия необходимо получить допустимые значения оценок выбранных критериев (1.3).

Основная функция СИВ – обнаружение опасных объектов на пути следования поезда и оповещение участников движения. Предварительное аналитическое описание объектов используется в процессе работы устройств распознавания.

Обнаружение объектов известной формы осуществляется с помощью оптимальных решающих устройств (ОРУ) в виде согласованных фильтров [15]. Для решения более сложных задач, например, требующих прогнозирования поведения объекта, необходима дополнительная оценка параметров входного сигнала. Обнаружение ОРУ объекта известной формы (в виде машины, человека, животного и т.д.) может происходить путем анализа контура объекта на основании сформированной характеристики, соответствующей аналитическому описанию формы объекта [15]. Качество работы ОРУ определяется энергией сигнала (с/ш на выходе канала СИВ). Это означает, что с увеличением объема информации, поступающей по каналу на вход ОРУ, повышается эффективность используемых алгоритмов видеоаналитики (приемника видеоинформации).

В результате анализа основных функций СИВ предложены два критерия эффективности: качества видеосигналов и достоверности полученной информации (рисунок 1.3). Первый критерий характеризует канал передачи видеосигналов, включающий приемо-передающие устройства и линию связи. Критерий качества оценивается приведенной дисперсией суммарной погрешности  $\delta_\varepsilon^2$ . Критерий достоверности характеризует качество видеоаналитики СИВ (приемника видеоинформации), зависит от алгоритма распознавания объекта и отношения мощностей сигнала и шума (с/ш) на входе устройства распознавания (величины  $\alpha_{\text{сх}}^2 = 1/\delta_\varepsilon^2$ ). Критерий достоверности оценивается вероятностями правильного  $P_{\text{прав.обн.}}$  и ложного  $P_{\text{лож.обн.}}$  обнаружений, которые в данной работе рассчитываются по алгоритму Неймана-Пирсона.



Рисунок 1.3 – Критерии эффективности СИВ

Как видно из рисунков 1.2 – 1.3, оценки введенных критериев согласуется с определениями и показателями БДП на железнодорожном транспорте [1,2].

### **1.3 Функция потерь от ложного обнаружения и пропуска опасного объекта системой интеллектуального видеонаблюдения на железнодорожном транспорте**

Для определения допустимых значений оценок критериев качества и достоверности систем видеонаблюдения необходимо ввести понятие функции потерь.

По определению функция потерь – это функция, которая в теории статистических решений характеризует потери при неправильном принятии решений на основе наблюдаемых данных [16]. В случае аварийных ситуаций на ж/д под потерями понимаются экономические (в виде стоимостного выражения) потери, произошедшие в результате перехода процесса движения в опасное состояние [2,17].

Поэтому в качестве функции потерь для определения допустимых значений оценок критериев принимается величина экономического ущерба, наступающего в результате пропуска или ложного обнаружений опасного объекта. Анализ всех возможных вариантов аварийных ситуаций на переездах, касающихся расчета вероятностей пропуска и ложного обнаружения СИВ, показывал следующее: самыми опасными являются случаи пропуска объекта или поступления ложного сигнала в момент, когда торможение возможно только в экстренном режиме [17].

Торможение в экстренном режиме - это особый процесс, который строго регламентируется служебными инструкциями [18]. При поступлении ложного сигнала машинист немедленно включает режим экстренного торможения. В случае пропуска объекта машинист не имеет информации о ситуации на переезде, и как следствие, происходит наезд на объект. Процесс торможения также происходит, но в более безопасном для пассажиров режиме.

В таблице 1.1 приведено описание возможного ущерба в случаях наезда на посторонний объект (пропуск объекта) или экстренного торможения (ложное обнаружение объекта), в результате которых железная дорога несет экономические убытки [2].

Таблица 1.1 Расчёт экономического ущерба

Наезд поезда на объект в результате пропуска опасной ситуации			Экстренное торможение в результате ложного обнаружения объекта		
Описание последствий происшествия	Описание расходов	Усредненная оценка величины расходов	Описание последствий происшествия	Описание расходов	Усредненная оценка величины расходов
1. Тяжелая травма человека	<p>а) лечение в больнице</p> <p>б) реабилитация</p> <p>в) выплаты пособий по утрате трудоспособности</p>	<p>а)(10тыс.руб.) x (кол-во дней) x (<i>n</i> - количество пострадавших)</p> <p>б)(20тыс.руб)x (кол-во дней) x (<i>n</i> - количество пострадавших)</p> <p>в)(30тыс.руб.x 12 мес.) x (<i>n</i> - кол-во пострадавших) Итого: 500 тыс. руб. x <i>n</i></p>	1. Тяжелая травма человека	<p>а) лечение в больнице</p> <p>б) реабилитация</p> <p>в) выплаты пособий по утрате трудоспособности</p>	<p>а) (10 тыс.руб.) x (кол-во дней) x (<i>m</i> - количество пострадавших)</p> <p>б)(20тыс.руб)x (кол-во дней) x (<i>m</i> - количество пострадавших)</p> <p>в)(30тыс.руб.x 12 мес.) x (<i>m</i> - кол-во пострадавших) Итого: 500 тыс. руб.x <i>m</i></p>
2. Полная утрата или повреждение объекта хозяйствования (например автомобиль)	Стоимость объекта хозяйствования, стоимость ремонта, стоимость утилизации, компенсация по страхованию	Расходы по статье: 700 тыс.руб.	2. Повреждение внутреннего оснащения вагонов, конструктивных элементов систем торможения и др.	Стоимость восстановления поврежденного оборудования вагонов и всего поезда в целом	Расходы на материалы (зап.части) и восстановительные работы. Расходы по статье: 100 тыс. руб.
3. Нарушение графика движения поездов	Ущерб от нарушения производственных связей предприятий, пользующихся услугами ж/д; ущерб от снижения эффект. работы транспортной системы	Расходы в виде штрафов 300 тыс. руб.	3. Порча груза (багажа)	Стоимость груза (багажа), компенсация по страхованию	Расходы на компенсацию испорченного багажа: 100 тыс. руб.

## Продолжение таблицы 1.1

Наезд поезда на объект в результате пропуска опасной ситуации			Экстренное торможение в результате ложного обнаружения объекта		
Описание последствий происшествия	Описание расходов	Усредненная оценка величины расходов	Описание последствий происшествия	Описание расходов	Усредненная оценка величины расходов
			4.Нарушение графика движения поездов	Ущерб от нарушения производства связей предприятий, пользующихся услугами транспортной системы; ущерб от снижения эффективности работы транспортной системы	Расходы в виде штрафов: 300 тыс. руб.
$C_{\text{пропуск}} = 1000 \text{ тыс.руб.} + 500 \text{ тыс.руб.} \times n$ (чел.)			$C_{\text{лож.обн.}} = 500 \text{ тыс.руб.} + 500 \text{ тыс.руб.} \times (m \text{ чел.})$		

Как показывает статистика за 2018 и 2019 годы [19,20], число пострадавших при наезде поезда на объект имеет в среднем по сети ОАО «РЖД» значение  $n = 1$  человек, среднее количество пострадавших  $m$  при экстренном торможении  $m = 10$  человек.

Величина экономического ущерба за счет наезда и экстренного торможения подсчитана на основании [2].

В ценах 2019 г. экономические ущербы от наезда поезда на объект и ложного экстренного торможения в среднем составляют соответственно  $C_{\text{пропуск}} = 1,5 \text{ млн.руб.}$  и  $C_{\text{лож.обн.}} = 10 \text{ млн.руб.}$

Допустимые значения вероятностей пропуска  $P_{\text{пропуск}}$  и ложного обнаружения  $P_{\text{лож.обн.}}$  для системы видеонаблюдения рассчитываются как отношение несущественного экономического убытка к усредненным экономическим ущербам (при наезде и экстренном торможении) в течение одного отчетного 2019 года для одного хозяйствующего объекта (железной дороги). В

качестве несущественного ущерба принята величина франшизы  $C_{мин}$  (минимального размера ущерба, на который распространяется страховое покрытие при страховании убытков из-за аварий) для железнодорожной дороги. Величина франшизы определяется согласно закона о страховании и нормативных документов [21,22] и имеет порядок 1 тыс. руб.

На основании выше изложенного максимальные значения вероятностей пропуска и ложного обнаружения и минимальное значение вероятности правильного обнаружения  $P_{прав.обн.}$  рассчитываются следующим образом:

$$P_{пропуск} = \frac{C_{мин}}{k \times C_{пропуска}} = 0,0007 ; \quad (1.1)$$

$$P_{прав.обн.} = 1 - P_{пропуск} = 0,9993 ; \quad (1.2)$$

$$P_{лож.обн.} = \frac{C_{мин}}{l \times C_{лож.обн.}} = 10^{-4} , \quad (1.3)$$

где  $k = 1$  - среднее количество происшествий в виде наездов, повлекших за собой существенные экономические последствия, согласно статистическим данным за 2018 и 2019 г.г. в расчете на одну железную дорогу;

$l = 1$  - среднее количество происшествий в виде экстренных торможений, повлекших за собой существенные экономические последствия, согласно статистическим данным за 2018 и 2019 г.г. в расчете на одну железную дорогу [19].

Таким образом, предполагаемые экономические убытки будут минимально допустимыми при наездах  $C_{пропуск}$  и экстренном торможении  $C_{лож.обн.}$ , если для них ввести коэффициенты (1.1-1.3), имеющие значения вероятностей соответственно  $P_{пр} = 0,0007$  и  $P_{лож.обн.} = 10^{-4}$ .

Современные алгоритмы видеоаналитики и каналы передачи информации СИБ, реализованные с помощью элементной базы микроэлектроники, способны гарантировать вероятность  $P_{лож.обн.} = 10^{-3}$  [23].

С помощью величины  $P_{лож.обн.} = 10^{-3}$  (гарантированной системами видеонаблюдения) и графика  $P_{прав.обн.} = f(P_{лож.обн.})$  (рисунок 4.4), рассчитанного в



главе 4 с учётом качественных параметров канала передачи сигналов на основе микроэлектроники, получена оценка  $P_{\text{прав.обн.}} \approx 0,92$ . Отсюда, вытекает следующий вывод: для использования систем видеонаблюдения необходимо уменьшать вероятность ложного обнаружения и повышать вероятность правильного обнаружения.

Возможны два пути совершенствования СИВ:

- 1) улучшать качество видеосигнала (снижать приведенную дисперсию суммарной погрешности  $\delta_{\varepsilon}^2$ ;
- 2) совершенствовать алгоритмы распознавания объектов.

Диссертационная работа посвящена исследованиям и разработкам методов повышения качества видеосигналов и уменьшения величины  $\delta_{\varepsilon}^2$ . Использование элементной базы нанoeлектроники на основе новых материалов позволяет значительно повысить качество видеосигналов. Так, для требуемой вероятности ложного обнаружения ( $P_{\text{лож.обн.}} = 10^{-4}$ ) на основании графика  $P_{\text{прав.обн.}} = f(P_{\text{лож.обн.}})$  (рисунок 4.4), построенного для элементной базы СИВ нового поколения, получено значение вероятности правильного обнаружения, равное  $P_{\text{прав.обн.}} \cong 0,9993$ .

Следовательно, использование систем видеонаблюдения для повышения безопасности движения возможно при условии применения устройств передачи и приема видеосигнала на новой элементной базе (нанoeлектроники).

#### **1.4 Функциональные возможности систем интеллектуального видеонаблюдения**

Основная задача видеонаблюдения – визуальный контроль заданной области пространства при помощи одной или нескольких видеокамер. Камеры позволяют сохранять и просматривать цифровые видеоданные, а также постоянно оценивать состояние контролируемой территории, выделяя, так называемые, «охраняемые события», заключающиеся в тех или иных изменениях наблюдаемой обстановки [14].

Наиболее распространенными функциями систем видеонаблюдения являются вывод информации в непрерывном режиме на пункт контроля и запись в архив. В настоящее время происходит переход от аналоговых способов получения, отображения и хранения видеоинформации к цифровым (IP – камеры, компьютерные мониторы, цифровые базы данных). Поэтому существенную роль в построении систем видеонаблюдения играют цифровые технологии сжатия, хранения, поиска и передачи информации.

Современные системы видеонаблюдения основаны на клиент-серверной архитектуре, когда информация от видеокамер передается по каналам связи на сервер, где производится видеоанализ (рисунок 1.4). Наличие сервера для осуществления видеоаналитики является отличительным признаком интеллектуальных систем видеонаблюдения. В серверах используется аппаратно-программное обеспечение на основе методов компьютерного зрения для автоматизированного сбора данных с помощью анализа потока видеоизображений.

Результатом работы видеоаналитики являются сообщения об опасных объектах или событиях, которые передаются оператору только в случае обнаружения тревожных признаков, а также записываются в видеоархив.

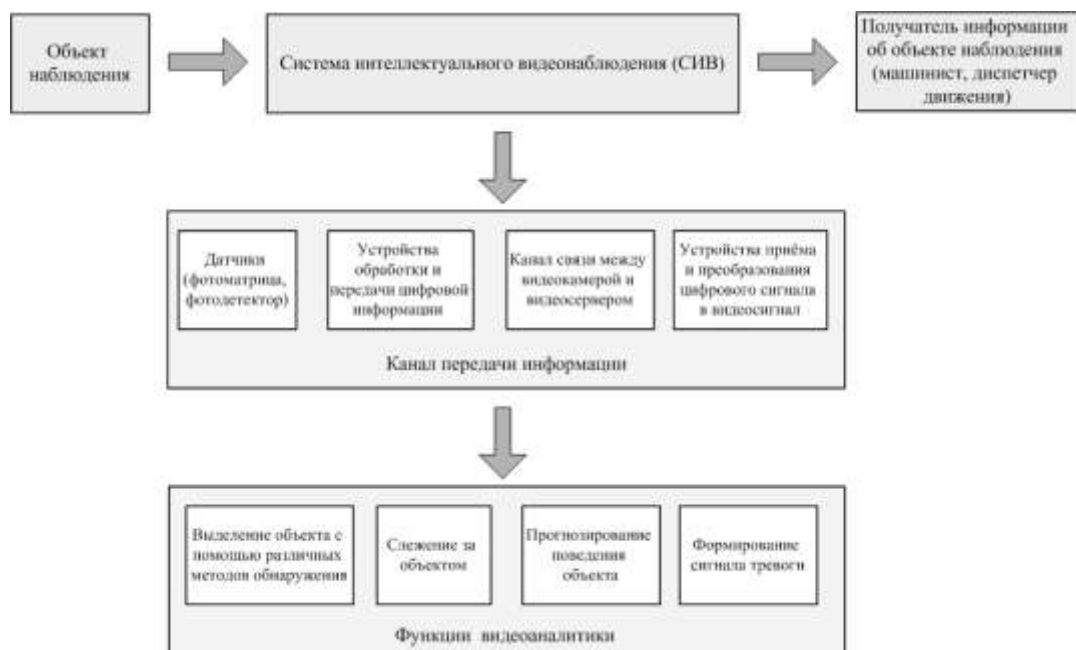


Рисунок 1.4 – Структурная схема системы интеллектуального видеонаблюдения

Видеоаналитика опирается на алгоритмы обработки изображения и распознавания образов, позволяющие анализировать видео без прямого участия человека [14,24]. В зависимости от целей видеоаналитика может реализовать одну или несколько функций:

- 1) обнаружение объектов с помощью видеодетекторов движения;
- 2) слежение за объектом с помощью нескольких видеокамер и специальных алгоритмов обработки;
- 3) классификация объектов на основании признаков формы и размеров;
- 4) идентификация объектов (например, людей по биометрическим признакам лица);
- 5) распознавание (обнаружение) тревожных ситуаций на основе анализа поведения объекта наблюдения.

Для обеспечения безопасности на переездах ж/д все перечисленные выше пять функций СИВ должны быть использованы.

Видеоаналитика может иметь расширенные функции, например:

- 1) прогнозирование поведения объекта;
- 2) интеллектуальное сжатие видеоконтента (передается только видео, содержащее тревожные ситуации), что позволяет уменьшить нагрузку на канал связи и оператора видеонаблюдения;
- 3) ранжирование (определение приоритета) событий видеоаналитики, что позволяет оператору сосредоточить внимание только на важных событиях и не отвлекаться на второстепенные ситуации.

Для видеоаналитики результатов мониторинга переездов ранжирование событий необходимо в случае передачи информации машинисту поезда.

С точки зрения применения различают следующие типы видеоаналитики:

- 1) периметральная (охрана протяженных участков);
- 2) ситуационная (распознавание тревожных ситуаций, связанных с поведением людей, движением транспортных средств);
- 3) биометрическая (идентификация лиц);
- 4) бизнес-аналитика (управление организацией).

Для анализа видеоаналитики результатов мониторинга переездов ранжирование событий необходимо в случае передачи информации машинисту поезда.

С точки зрения практического применения различают следующие типы видеоаналитики:

1) серверная видеоаналитика предполагает централизованную обработку видеоданных на центральном процессоре и непрерывную передачу видео от источника информации на сервер, что создает нагрузку на каналы связи, объемы памяти и является существенным недостатком;

2) встроенная видеоаналитика реализуется в источнике видеоданных (видеокамере, кодере), работает на выделенном процессоре, передает данные в случае обнаружения объекта вместе с видеопотоком на общий для всех видеокамер сервер обработки, видеоанализа и хранения, что снижает нагрузку на канал связи;

3) распределенная видеоаналитика реализуется как гибридный вариант серверной и встроенной видеоаналитики, в котором обнаружение объектов производится в источнике видео, сопоставление результатов от нескольких камер - на сервере, что позволяет повысить эффективность обнаружения и снизить вероятность ложных тревог.

Для мониторинга объектов ж/д могут найти применение все три типа архитектур видеоаналитики. Так, для информирования машиниста подходит встроенная видеоаналитика (сигнал тревоги вместе с изображением передаются в кабину машиниста). Для регулирования движением поездов в пределах дороги из диспетчерского центра управления необходима серверная видеоаналитика. Наиболее универсальной является распределенная видеоаналитика, которая объединяет преимущества первых двух типов.

Как видно из рисунок 1.4, система видеонаблюдения состоит из канала передачи информации и приемника видеoinформации (устройства распознавания в виде программно-аппаратных средств видеоаналитики).

Для обеспечения требуемого качества обнаружения устройствам распознавания необходим минимальный объем информации (эпсилон – энтропии  $h_\epsilon(B)$ ), который доставляется каналом. Это минимальное количество информации, которое требуется передать по каналу связи для того, чтобы обеспечить допустимую неточность воспроизведения [25]. На основании теоремы Колмогорова эпсилон-энтропия  $h_\epsilon(B)$  гауссовского непрерывного источника сообщений, приходящаяся на один отсчет непрерывного сигнала, равна половине двоичного логарифма от с/ш ( $\sigma_B^2/\sigma_\epsilon^2$ ) на выходе канала  $\rho_{\text{вых}}^2$ , а именно [25]:

$$h_\epsilon(B) = \frac{1}{2} \log_2 \frac{\sigma_B^2}{\sigma_\epsilon^2}; \quad (1.4)$$

$$\rho_{\text{вых}}^2 \cong \alpha_{\text{ex}}^2 = \frac{\sigma_B^2}{\sigma_\epsilon^2}. \quad (1.5)$$

Качество работы приемника СИВ (устройства распознавания) оценивается вероятностями правильного и ложного обнаружений. Следовательно, допустимые значения  $P_{\text{прав.обн.}}$  и  $P_{\text{лож.обн.}}$ , полученные в параграфе 1.3, позволяют рассчитать величину  $h_\epsilon(B)$ . Задача диссертационной работы – определить величину эпсилон-энтропии для обеспечения требуемой неточности воспроизведения, а именно:  $P_{\text{прав.обн.}}=0,9993$ ;  $P_{\text{лож.обн.}}=10^{-4}$ .

Операция распознавания опасного объекта и прогнозирования его поведения – это сложная многоэтапная задача [26]. Она состоит из последовательной обработки каждого кадра видеоизображения после фиксации наличия объекта наблюдения. В качестве примера ниже приведена последовательность шагов обработки изображения (видеоаналитики). Сначала происходит подготовка кадра, которая заключается в изменении разрешения путем объединения определенным образом нескольких пикселей в один. На этом этапе осуществляется сжатие видеоизображения для ускорения процесса видеоаналитики. При этом часть информации вместе с шумом теряется. На втором этапе происходит формирование фона «сцены» и отделение его от объекта наблюдения (путем вычитания его из кадра). С помощью операции «бинаризации» (замены значений всех пикселей больших нуля на уровень 255)

происходит переход к двум цветам (градациям оттенков): черному и белому. Здесь четко проявляются артефакты от шума канала, которые мешают выделить объект наблюдения. Для борьбы с шумом существует множество алгоритмов (простое усреднение фона, использование вероятностных моделей, машинного обучения и т.д.). Лучший результат достигается путем комбинации нескольких подходов. Однако чем сложнее алгоритм, тем больше времени занимает обработка очередного кадра. Выбор оптимального решения зависит от качества канала (величины с/ш  $\rho_{\text{вых}}^2$ ) и условий задачи (времени, выделенного на обработку изображения). Для видеонаблюдения в реальном времени обработка не должна превышать длительность кадра (порядка 40 мс). На третьем этапе формируются зоны, объединяющие пиксели объектов наблюдения. На четвертом этапе осуществляется трекинг, когда в результате обработки соседних кадров выявляются отдельные объекты наблюдения. Таким образом, современные устройства видеоаналитики зависят от качества канала передачи информации, алгоритмов и программной реализации. Для успешного функционирования устройств распознавания требуется большая экспериментальная работа по настройке видеоаналитики. Чем выше качество канала  $\rho_{\text{вых}}^2$ , тем эффективнее процесс распознавания на этапах обнаружения объекта и очистки от шумов.

Каждый алгоритм гарантирует качество (вероятность ложного обнаружения) при условии, что параметр  $\rho_{\text{вых}}^2$  на выходе канала не будет меньше допустимого значения, соответствующего энтропии.

Элементная база микроэлектроники канала передачи информации для современных алгоритмов распознавания гарантирует вероятность  $P_{\text{лож.обн.}} \geq 10^{-3}$ . Эта цифра не обеспечивает требуемое значение  $P_{\text{лож.обн.}}$  для повышения безопасности движения на ж/д. Чтобы снизить вероятность ложного обнаружения, не переходя на новую элементную базу, требуется усложнение алгоритмов видеоаналитики, что отразится на продолжительности работы СИВ. Временные затраты снижают оперативность обнаружения объекта и реагирования на возникшую угрозу безопасности движения поездов. Поэтому в работе

исследуется другое направление повышения достоверности распознавания опасных объектов, а именно, за счет улучшения качества сигналов на выходе канала передачи информации с помощью более совершенной элементной базы.

### **1.5 Принципы организации систем видеонаблюдения для повышения безопасности движения поездов**

Системы видеонаблюдения за стратегическими объектами ж/д, связанными с движением поездов, применяются не только на железнодорожном транспорте РФ, но и за рубежом.

В настоящее время во многих странах широкое распространение получили системы видеонаблюдения, реализуемые с помощью установки видеокамер в кабине машиниста по аналогии с видеорегистратором в автомобиле [27]. Такую форму организации видеонаблюдения предполагается внедрить, например, на электропоездах типа «Ласточка», дополнительно оснастив систему мониторинга тепловизором (для видеонаблюдения в темное время суток) и лидаром (для обнаружения удаленных объектов с помощью активных оптических систем). Такой тип «машинного зрения» не требует канала связи видеокамеры на объекте наблюдения с машинистом или диспетчером. Однако имеет существенный недостаток в виде ограниченности по дальности действия. Так, лидар распознает объект на расстоянии не более 200 м (меньше тормозного пути), видеокамера при условии прямой видимости - на расстоянии не более 1,5 км [27].

Для высокоскоростного движения дальность действия таких систем недостаточна, чтобы за время приближения к объекту оценить опасность ситуации и принять решение об экстренном торможении. Более эффективной формой организации видеонаблюдения с точки зрения повышения БДП является система, предусматривающая установку видеокамер на месте наблюдения и наличие каналов связи с машинистом и центром управления движением поездов. Такая система СИВ не имеет ограничений по дальности (расстоянию до объекта наблюдения), не зависит от рельефа пути (крутых поворотов, возвышенностей и т.д.) или недостаточной видимости из-за плохой погоды. Она предоставляет

возможность вовремя затормозить (при условии наличия тормозного пути до объекта и коэффициента готовности канала связи не менее 0,999).

В последние несколько лет на железных дорогах Европейского союза (ЕС), Японии, Северной Америки ведутся работы по улучшению существующих систем оповещения на железнодорожных переездах за счёт внедрения передовых технологий видеонаблюдения. Подобная концепция получила название «умный переезд» (smart railroad crossing) [28]. Основная идея «умного переезда» – создание интеллектуальной системы мониторинга, способной выявлять потенциально опасные объекты на переезде, отслеживать перемещение объекта в заданной зоне наблюдения и информировать о наличии потенциальной угрозы всех участников движения, прежде всего машиниста [17].

Так, в Великобритании на железной дороге компании Network Rail при участии операторов связи Amplicon и TEW Plus Ltd внедряется система видеонаблюдения, обеспечивающая автоматическое сканирование и обнаружение препятствий на переездах [29].

В Европейском союзе в рамках проекта SELCAT (Safer European Level Crossing Assessment and Technology), направленного на минимизацию воздействия человеческого фактора, как основной причины аварий, сформирована стратегия контроля и снижения рисков на переезде [30]. Предложенные решения заключаются в обнаружении препятствия (на переезде) за счёт использования более совершенных технологий видеоанализа. Систему мониторинга переездов с помощью СИВ предполагается интегрировать с системами передачи данных по спутниковым и мобильным сетям связи.

Подобная технология используется в Германии: на железнодорожных переездах устанавливается видеокамера с функцией видеоаналитики. Поступающая информация обрабатывается диспетчером, который может запретить проезд поезда в случае обнаружения препятствия. Одним из производителей таких систем видеонаблюдения является компания Alstom [31].

Компания ОАО «РЖД» также реализует передовые цифровые технологии. Так, в 2019 году принята долгосрочная программа развития холдинга,



предусматривающая переход на «Цифровую железную дорогу» [32,33]. Концепция "Цифровой железной дороги" заключается в полной интеграции интеллектуальных коммуникационных технологий между пользователем, транспортным средством, системой управления движением и инфраструктурой [33].

В рамках этой концепции предполагается реализация проектов, повышающих безопасность движения поездов, например, «умный вагон», «умный переезд», «умное депо» с использованием связевой инфраструктуры, проложенной вдоль железнодорожного полотна.

Применение видеокамер с функцией видеоаналитики на важных объектах (переездах, мостах, тоннелях и др.) могут повысить безопасность движения двумя путями (рисунок 1.5):

1) оперативно отслеживать ситуацию на объекте и передавать видеосигналы диспетчеру в центр управления или непосредственно машинисту для принятия оперативного решения в экстренных случаях;

2) управлять движением поездов в автоматическом режиме, технически реализуя функцию «автомашинист», на основании ситуационного анализа обстановки на железнодорожных путях [34].



Рисунок 1.5 – Требования к каналу передачи информации СИБ

Эти направления организации и научного развития систем видеонаблюдения особенно важны в связи с внедрением высокоскоростного движения на сети железных дорог РФ [35].

Каждое из этих направлений имеет свои особенности, которые заключаются в требованиях к характеристикам линий связи, каналам передачи видеoinформации, в критериях оценки качества изображения и эффективности обнаружения опасных объектов (рисунок 1.5).

Наибольшей эффективности для обеспечения БДП можно добиться путем совмещения двух вариантов организации СИВ.

При решении задачи повышения безопасности и реализации алгоритма движения поездов в режиме «автомашинист» предполагается, что в процессе регулирования скорости система видеонаблюдения выполняет функцию «зрения». Поэтому качество видеосигнала должно соответствовать требованиям «машинного зрения», которые необходимы для эффективной работы устройств распознавания СИВ в условиях высокоскоростного движения поездов. Это означает способность видеоаналитики решать сложные задачи прогнозирования поведения объектов наблюдения, различения множества мелких деталей на видеоизображении, которые физиологически недоступны человеческому глазу. Для выполнения таких задач необходимо получение видеоизображения высокой четкости и с высоким разрешением, воспроизведением большого числа оттенков цвета (сигнала яркости) и большой частотой кадров. Такой широкополосный и качественный цифровой видеосигнал (шириной полосы частот порядка 1 ГГц) можно передать только по волоконно-оптической системе передачи информации (ВОСП) [36]. Волоконно-оптическая система обладает огромной пропускной способностью и может обеспечить необходимую скорость передачи сигналов.

Таким образом, используя сеть передачи данных на основе ВОСП, можно создать широкополосную сеть видеонаблюдения для повышения БДП. Структурная схема СИВ на основе сети передачи данных железнодорожного транспорта представлена на рисунке 1.6.

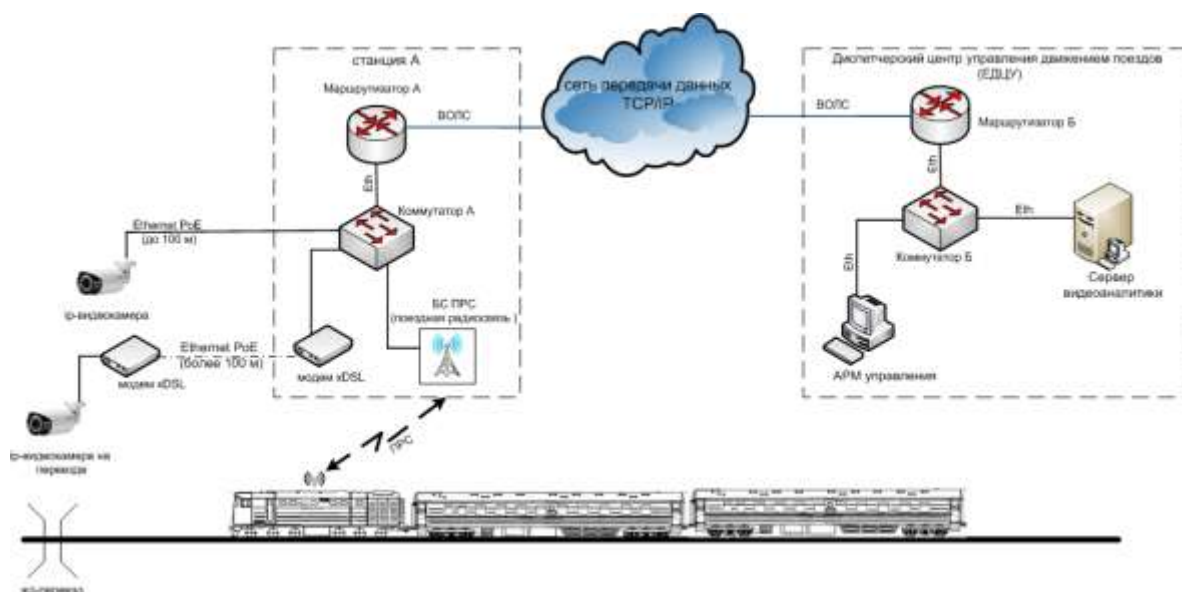


Рисунок 1.6 – Система видеонаблюдения для повышения БПД сети передачи данных ТСП/Р

В качестве сетевой инфраструктуры на рисунке 1.6 использована сеть передачи данных оперативно-технологического назначения (СПД ОТН) ОАО «РЖД». Такая сеть отвечает требованиям по пропускной способности, предъявляемым к каналам связи, является сетью передачи данных на основе протокола ТСП/Р. В качестве направляющих линий от сетевого элемента до объекта наблюдения (видеокамеры) применяется медно-жильный или оптический кабель. В случае подключения по медно-жильному кабелю на расстояние более 100 м потребуются применение модемов xDSL. Питание оборудования видеонаблюдения возможно организовать по технологии Power over Ethernet (PoE) [6,37].

Для организация видеонаблюдения за объектом достаточно одной или нескольких ip-видеокамер со встроенной видеоаналитикой. Видеокамеры позволяют сохранять и просматривать цифровые видеоданные, а также постоянно оценивать состояние контролируемой территории, выделяя, так называемые, «охранные события», заключающиеся в тех или иных изменениях наблюдаемой обстановки.

Вариант организации СИВ на рисунке 1.6 предусматривает: установку видеокамер, например на переездах, передачу видеосигнала на видеосервер единого диспетчерского центра управления, распознавание опасных объектов с

помощью видеоаналитики, передачу команд торможения на локомотив из ЕДЦУ посредством поездной радиосвязи.

Очевидный недостаток схемы организации СИВ на рисунке 1.6 – отсутствие прямого видеоканала с машинистом. Для принятия правильного решения машинист должен иметь возможность заранее оценить обстановку на переезде по видеоизображению. Этот недостаток частично устранен в другом варианте организации видеонаблюдения с помощью видеотерминалов и передающего оборудования *Wi-Fi* (рисунке 1.7), установленных на локомотивах и переездах для передачи изображения в кабину машиниста [38,39].



Рисунок 1.7 – Организация СИВ на основе сети *Wi-Fi*

На рисунке 1.8 представлена функциональная схема организации сети связи с подвижным объектом с помощью сети *Wi-Fi*. Видеокамера устанавливается вблизи передатчика *Wi-Fi* (9), который, попадая в зону действия сети *Wi-Fi* поезда (7), передает видеоизображение переезда или сигнал «тревоги» через точку доступа (3) в кабину машиниста. Далее через контроллер (2) и базовые радиостанции локомотива (1) и сети передачи данных (6) информация с переезда по ВОСП (5,4,8) поступает в ЕДЦУ. Для реализации такого варианта требуется сооружение вышек сети *Wi-Fi* вдоль железнодорожного полотна по аналогии с вариантом организации такой сети, функционирующей на метрополитене. Вариант организации СИВ с одновременной передачей видеосигнала в ЕДЦУ на видеосервер для обработки информации и обнаружения опасных объектов, а также в кабину машиниста для предотвращения возможных ошибок является наиболее эффективным для управления движением поездов и обеспечения безопасности движения [38,39].

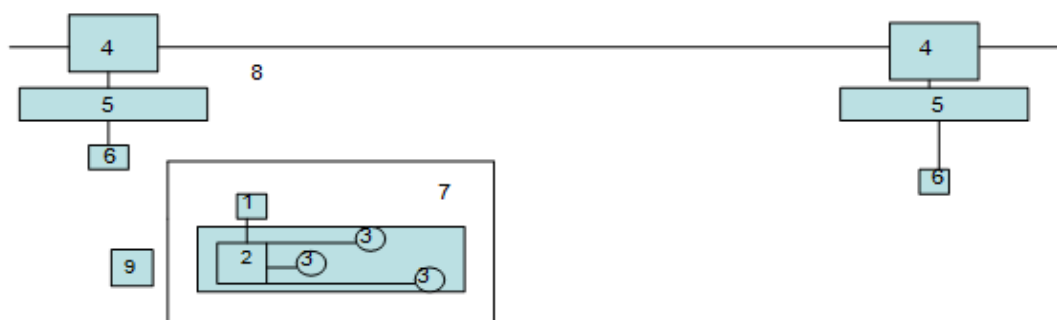
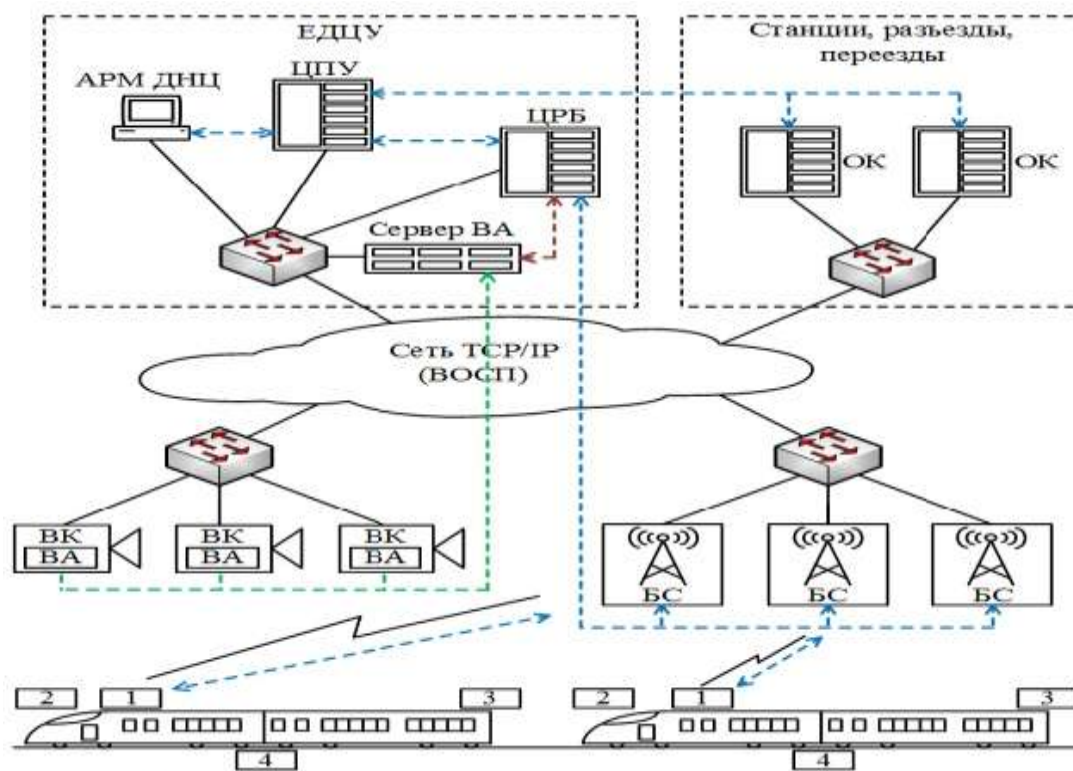


Рисунок 1.8 – Организация связи с подвижным объектом с помощью сети  
поездной *Wi-Fi*

1 – радиостанция *Wi-Fi*, 2 – контроллер сети *Wi-Fi*, 3 – точка доступа, 4 – мультиплексор сети передачи данных, 5 – маршрутизатор, 6 – базовая станция *Wi-Fi*, 7 – сеть *Wi-Fi* поезда, 8 – ВОЛС, 9 – р/ст. видеокамера в зоне действия сети *Wi-Fi* поезда

Как отмечено в параграфе 1.1. внедрение СИРДП-Е совместно с системой интеллектуального видеонаблюдения способствует повышению безопасности и эффективности управления движением поездов. Схема совместной реализации СИРДП-Е и СИВ представлена на рисунке 1.9 [13,40].

Одна или несколько видеокамер (ВК) устанавливаются в местах повышенной опасности. Встроенная видеоаналитика (ВА), реализованная с помощью видеопроцессора в месте расположения видеокамеры, автоматически формирует управляющий сигнал для начала и конца трансляции видеоизображения от ВК на центральный видеосервер (ВС), расположенный на станции управления дороги (ЕДЦУ), при возникновении опасной ситуации. После обнаружения опасного объекта видеоизображение и метаданные с описанием содержания каждого кадра (местоположение, идентификация объекта, время, траектория, скорость движения и т.д.) передаются на сервер обработки информации (ВС).



1 – локомотивная радиостанция; 2 – бортовое процессорное оборудование; 3 – система контроля целостности поезда; 4 – пассивные реперные датчики (балисы)

Рисунок 1.9 – Организация СИВ совместно с СИРДП-Е [13]

В качестве каналов связи на рисунке 1.9 используется ВОСП с пропускной способностью до  $40\text{Гбит/с}$  на одной длине волны, позволяющей передавать видеосигналы с высоким качеством (важно для распознавания опасных объектов и снижения ложных тревог).

В видеосервере осуществляется декодирование, сравнение изображения от нескольких видеокамер, видеоанализ, индексирование, оценка степени опасности события, хранение информации и т.д. Затем информация передается в центр радиоблокировки (ЦРБ) системы СИРДП-Е. Там с помощью центрального процессорного устройства (ЦПУ) формируются команды управления движением поездов (скорости, экстренной остановки), а также поездному диспетчеру (АРМ ДНЦ – автоматизированное рабочее место поездного диспетчера). Устройство ЦПУ связано с объектными контроллерами (ОК), установленными на объектах железнодорожного транспорта (станциях, переездах и т.д.). В кабину машиниста информация поступает по радиоканалу ПРС с помощью базовых станций (БС).

Таким образом, для повышения эффективности управления движением поездов целесообразно совместно с системой СИРДП использовать систему интеллектуального видеонаблюдения с распределенной видеоаналитикой. Обработанная информация в видеосервере будет поступать в ЦРБ системы СИРДП-Е и использоваться для интервального регулирования движением поездов.

В качестве канала связи от ЕДЦУ к машинисту используется канал ПРС, с помощью которого на дисплее в кабине локомотива (интерфейс машинист-машина, рисунке 1.10 [40]) отображается информация о скорости движения или экстренной остановке.



Рисунок 1.10 – Оборудование кабины машиниста «интерфейс машинист-машина»

Передачу видеоизображения опасного объекта в сжатом формате можно реализовать с помощью каналов поездной радиосвязи (ПРС), используя весь диапазон частот, выделенный для цифровой ПРС на прием и передачу (6 МГц). Однако для организации этого варианта потребуется модернизация приемо-передающей аппаратуры стационарных и локомотивных радиостанций или создание новых широкополосных радиостанций. Возможен более простой вариант трансляции видеоизображения только на локомотивы за 2 км до места установки видеокамер для своевременного торможения поезда в случае обнаружения опасного объекта. Для этих целей потребуется установка дополнительных комплектов приемопередающей аппаратуры в свободном диапазоне частот (2,41 ГГц) в кабине машиниста и на переездах.

Кроме описанных выше вариантов передачи видеоизображения с камеры, в настоящее время во многих странах разрабатываются способы использования для этих целей беспроводных оптических каналов связи (БОКС), которые имеют огромные возможности передачи широкополосной информации, не ухудшая при этом электромагнитную обстановку на ж/д [41,42]. На рисунке 1.11 представлен внешний вид аппаратуры БОКС и вариант установки [43].



а)



б)

Рисунок 1.11 –Аппаратура БОКС [43]

а) комплект аппаратуры БОКС; б) вариант установки оборудования БОКС

Коэффициент готовности БОКС составляет величину не менее 0,999, рабочее значение коэффициента ошибок имеет значение не более  $10^{-9}$ . Влияние атмосферных помех и фактора «прямой видимости» ограничивают дальность связи (не более 5 км). На рисунке 1.12 представлена зависимость  $P_{ош}$  от видимости в условиях тумана [44].

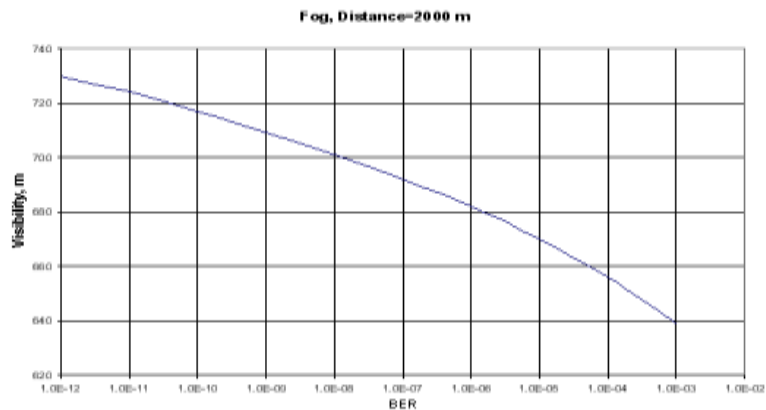
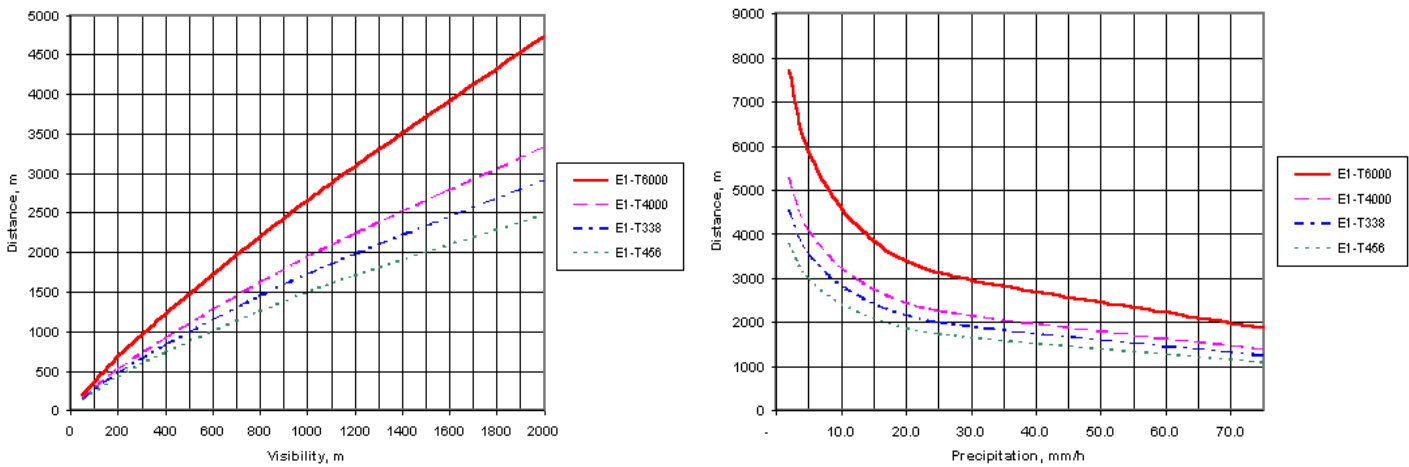


Рисунок 1.12 – Зависимость вероятности ошибки от видимости в условиях тумана [44]



Зависимость максимальной рабочей дистанции оборудования БОКС производителя SkyCell от погодных условий представлена на рисунке 1.13 [44].



а)

б)

Рисунок 1.13 – Максимальные рабочие дистанции разных типов аппаратуры БОКС в зависимости от а) видимости в туман; б) интенсивности дождя [44]

Вариант использования БОКС в системах видеонаблюдения применительно к железнодорожному транспорту представлен на рисунке 1.14.

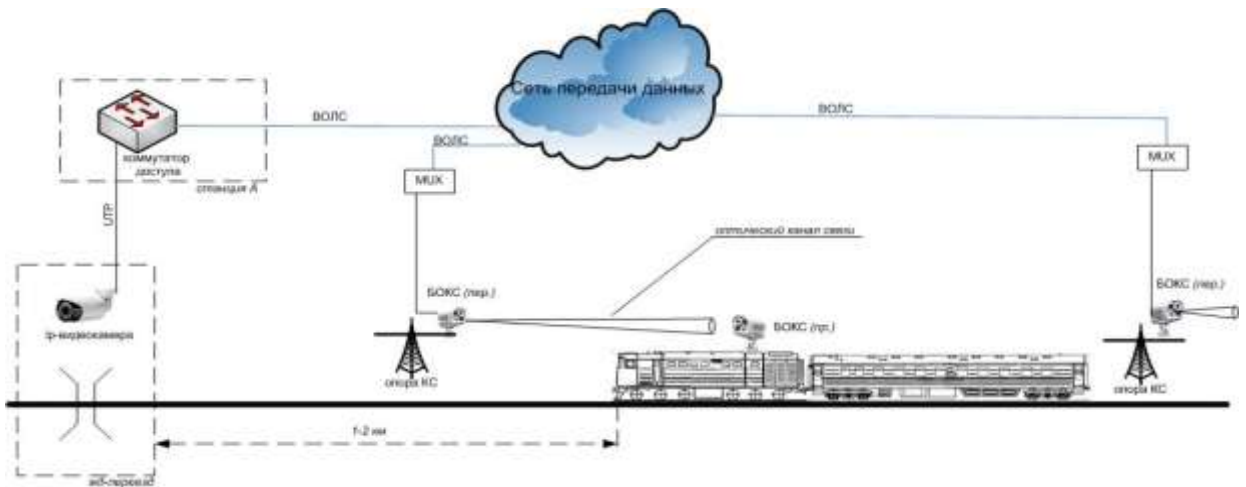


Рисунок 1.14 – Сеть СИВ с использованием БОКС

Для реализации проекта сети СИВ на основе БОКС для железнодорожного транспорта необходимо проведение научных исследований и создание опытно-конструкторских разработок [45-48].

## 1.6 Сеть видеонаблюдения с использованием канала беспроводной оптической связи с движущимся поездом

Проблемы электромагнитной совместимости и ограниченности полосы частот, выделенной для поездной радиосвязи, вынуждают искать альтернативные пути решения задачи передачи широкополосного видеосигнала СИВ машинисту поезда. Таким решением является использование беспроводных оптических каналов связи, работающих в инфракрасном диапазоне длин волн в границах (800 нм – 1600 нм), которые носят название «атмосферных окон» (рисунке 1.15) [44].

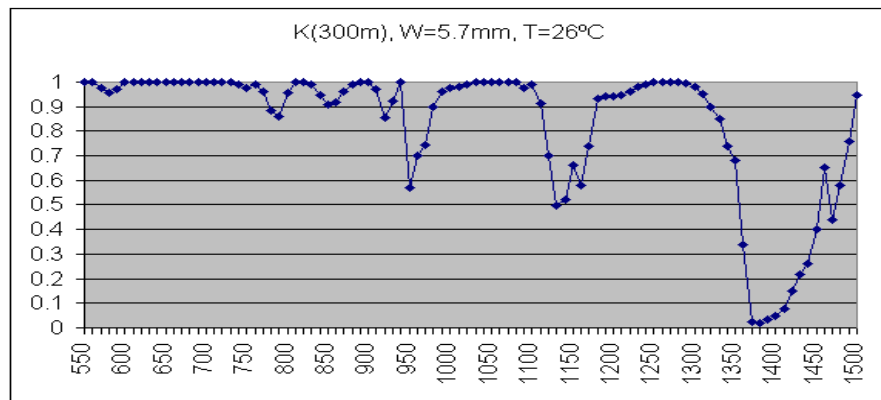


Рисунок 1.15 – Атмосферные окна БОКС (зависимость нормированного затухания от длины волны света) [44]

Возможности беспроводной оптической связи позволяют создать устойчивые и надежные высокоскоростные каналы, соединяющие стационарные и мобильные устройства связи в подвижном составе в единую сеть оперативно-технологической связи. Для реализации такого проекта необходимо решить комплексную задачу по адаптации БОКС к условиям железнодорожного транспорта.

Технический результат может быть получен, если учесть не только известные факторы, ухудшающие качество беспроводной оптической связи (перекрытие «прямой видимости», солнечная засветка, атмосферное поглощение, рассеивание и турбулентность, движение «опоры» и т.д.), но и специфику эксплуатации устройств БОКС на поездах. К таким специфическим факторам относятся изменения уровня сигнала при движении поезда, вибрация, мешающие источники света от прожекторов матч освещения, встречных поездов, сигналов

семафоров, аэродинамический «ветер» от движущегося поезда, электромагнитное влияние на электрический сигнал соединительного кабеля от контактной сети, средств связи и т.д. Важно отметить, что большинство перечисленных выше отрицательных факторов, влияющих на качество БОКС, уже конструктивно учтены в приемо-передающей аппаратуре [49].

Так, аппаратура БОКС имеет системы: 1) автоматического регулирования оптической оси для захвата и удержания фокусированного пучка света при вибрациях опор; 2) автоматического регулирования мощности лазера и глубины модуляции для стабилизации уровня сигнала при колебаниях атмосферного затухания; 3) автоматической регулировки усиления сигнала в приемнике при движении объекта; 4) оптические фильтры для устранения засветок от посторонних источников света; 5) защиты от электромагнитных помех электрической части в виде специального корпуса. Следует отметить, что современные приемо-передающие модули БОКС могут получать сигнал по оптическому волокну.

Целесообразность использования БОКС на ж/д обусловлено потребностью в повышении пропускной способности каналов связи и огромными преимуществами беспроводной оптической связи перед другими видами связи, а именно: 1) возможность использования диапазона частот, не требующего лицензирования; 2) не чувствительность БОКС к электромагнитным помехам; 3) отсутствие электромагнитных помех от БОКС для других средств связи; 4) высокая скорость передачи данных; 5) высокий уровень безопасности передачи информации; 6) простота монтажа, демонтажа и небольшие габариты оборудования; 7) возможность инсталляция связи без использования дополнительной инфраструктуры.

С помощью БОКС можно создать устойчивые и надежные высокоскоростные каналы связи, адаптированные к условиям эксплуатации на ж/д. Кроме того, БОКС на основе имеющейся инфраструктуры ВОСП позволяет соединить мобильные устройства пассажиров, машиниста и членов поездной

бригады с коммутаторами сетей оперативно-технологической, мобильной, спутниковой связи (рисунке 1.16) [49-53].

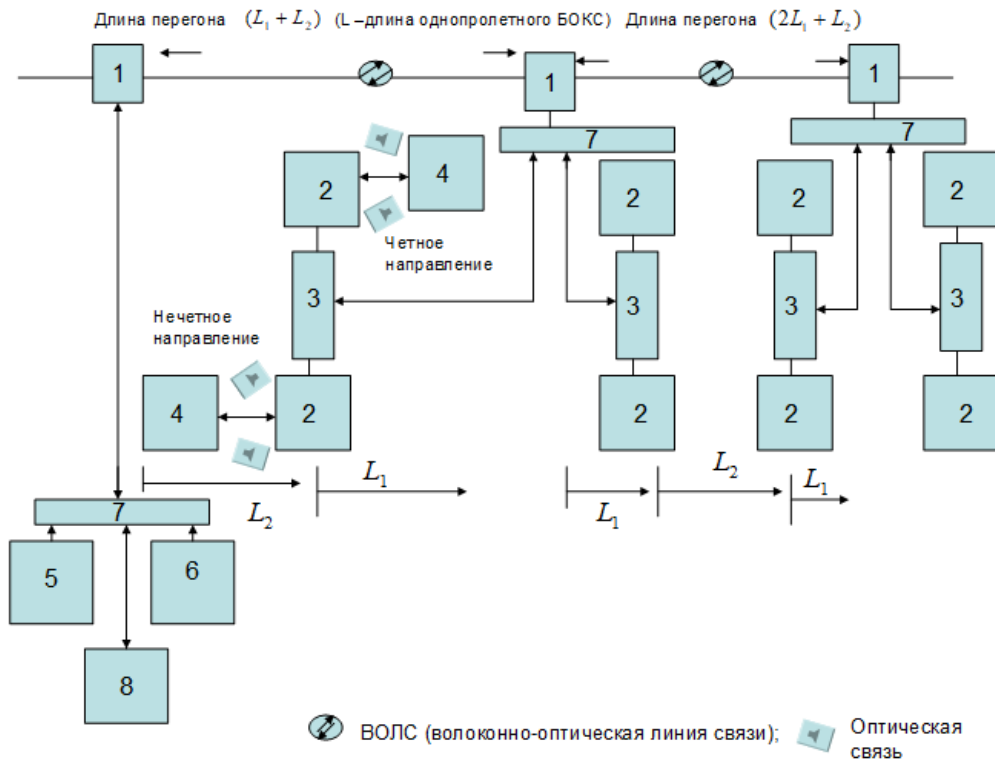


Рисунок 1.16 – Сеть передачи данных с движущимся поездом на основе БОКС

1 – мультиплексор; 2 – БОКС; 3 – разветвитель на опоре КС; 4 – БОКС на крыше локомотива; 5 – видеокамера; 6 – тепловизор; 7 – маршрутизатор; 8 – пульт поездного диспетчера

Предлагаемая сеть передачи данных, включающая двустороннюю связь с движущимся поездом на основе БОКС, реализуется благодаря тому, что максимально используется существующая инфраструктура ж/д. Это – проложенные вдоль железнодорожного полотна волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) и опоры контактной сети, высота которых соответствует изменениям рельефа местности. Установка стационарных узлов БОКС на опорах под углом, учитывающим направление «восток-запад», на уровне высоты подвижного состава обеспечит минимальную длину траектории луча и максимальное отношение с/ш для БОКС, установленных на крышах вагонов [46,48]. Стационарные узлы БОКС, установленные на опорах контактной сети, соединяются при помощи электрического кабеля (витой пары, длиной порядка 100 м) через маршрутизаторы с мультиплексорами (MUX) ВОСП. Возможен

вариант соединения БОКС с ВОСП по оптическому кабелю. Протяженность широкополосного канала связи с движущимся поездом на основе беспроводного оптического канала зависит от мощности лазеров, удаленности места установки стационарных БОКС от *MUX* и расстояния между станциями, оснащенными мультиплексорами ВОСП. С увеличением мощности лазера система связи (рисунке 1.13) позволит пассажирам поезда с помощью сети *Wi-Fi* и БОКС выйти на коммутаторы сети мобильной или спутниковой связи. Для реализации двусторонней связи предлагается использовать две несущие длины волн в безопасном для глаз инфракрасном диапазоне [49]: от стационарной БОКС к подвижной -  $\lambda_1$ , в обратном направлении -  $\lambda_2$  (выше 800 нм).

Схема связи на рисунке 1.16 организуется с помощью оборудования ВОСП для участков с длиной перегонов не более  $(2L_1 + L_2)$ , где  $L_{1,2}$  - протяженность однопролетного канала БОКС, рассчитанная с учетом расположения узла БОКС на опоре контактной сети (максимальное удаление от *MUX* ограничивается возможностями «витой пары»). Длина железнодорожного перегона с помощью электрического кабеля и разветвителей на опорах контактной сети делится на два или три участка с разной  $L$ . Первый стационарный узел БОКС закрепляется на опоре контактной сети рядом с *MUX*, второй БОКС устанавливается от *MUX* (с учетом усилителей) на расстоянии  $L_1 \geq 100\text{ м}$ . Это позволит связать между собой, например, машиниста, диспетчера, дежурного по станции и др. Длина участка  $L_2$  между стационарными БОКС на опорах контактной сети, удаленными от своих *MUX* на расстояние  $L_1$ , задается требуемой дальностью связи (до 5 км) и обеспечивается соответствующей мощностью лазера.

Причем на опорах контактной сети могут быть установлены по два приемопередатчика БОКС с направленными (фокусированными) пучками света в противоположных направлениях. Это необходимо для организации связи в четном и нечетном направлениях движения поездов. При этом БОКСы работают на одинаковых длинах волн, не создавая помех друг другу. Реализацию сети двусторонней связи с движущимся поездом на основе БОКС способен обеспечить

современный уровень техники, базирующийся на элементной базе наноэлектроники.

### **1.7 Способы повышения эффективности систем видеонаблюдения для повышения безопасности движения поездов**

Основным препятствием внедрения СИВ для управления скоростью движения поездов является относительно высокая вероятность ложных обнаружений, что может привести к необоснованным командам экстренного торможения и, как следствие, к негативным последствиям в виде задержек движения поездов. Причина ложных обнаружений - недостаточно высокое качество формирования цифрового видеосигнала, искажения в линиях связи, несовершенные алгоритмы работы видеоаналитики. Использование систем видеонаблюдения для обеспечения безопасности движения возможно при условии снижения вероятности ложного обнаружения и повышения вероятности правильного обнаружения.

Как отмечено в параграфе 1.1, имеются два направления совершенствования СИВ:

- 1) улучшение качества видеосигнала (снижение приведенной дисперсии суммарной погрешности  $\delta_{\varepsilon}^2$ ;
- 2) совершенствование алгоритмов распознавания объектов. Диссертационная работа посвящена исследованиям и разработкам методов повышения качества видеосигналов и уменьшения величины  $\delta_{\varepsilon}^2$ .

Поэтому одной из задач повышения эффективности СИВ является оценка качества передачи видеосигналов и разработка путей снижения вероятности ложного обнаружения за счет увеличения отношения с/ш на входе устройств распознавания СИВ. Такую задачу можно решить путем использования элементной базы (наноэлектроники). Применение новых материалов в видеокамере и в приемопередающих устройствах систем связи позволит значительно повысить качество видеосигналов и гарантировать выполнение требований к достоверности полученной информации. Это означает обеспечить

возможность передачи изображения контролируемого объекта от видеокамер с высокой четкостью по каналу связи на устройство распознавания видеосервера СИВ или в кабину машиниста.

Главным источником искажений видеосигнала (глава 2) являются шумы фотосенсора (ФС) видеокамеры и фотоприемника (ФП) ВОСП [6,8].

В основе работы фотосенсора и фотоприемника лежит физическое явление «фотоэффекта», где величина искажений сигнала зависит от оптоэлектронных характеристик материала, из которого сделаны эти устройства. Поэтому для получения видеосигнала высокого качества фотодетекторы для пикселей ФС и для ФП должны быть изготовлены из новых полупроводниковых материалов, обеспечивающих повышение квантовой эффективности, чувствительности, обнаруживающей способности и уменьшение собственных шумов. Среди таких материалов следует выделить наноструктурированные среды (множественные квантовые ямы) из обогащенных (изотопически однородных) полупроводников. Использование этих материалов повысят коэффициент поглощения света, квантовую эффективность, чувствительность, уменьшит собственные шумы, увеличит обнаруживающую способность и динамический диапазон оптоэлектронных устройств, лежащих в основе ФС и ФП. Применение оптоэлектронных устройств нового поколения влияет на пропускную способность каналов ВОСП, которая определяет возможности телекоммуникационных сетей обеспечить качественный информационный обмен [54,55].

### **1.8 Выводы по главе**

1. Повышение интенсивности и скорости движения поездов увеличивает вероятность столкновений на пересечениях железнодорожного полотна с автомобильными дорогами. Это требует внедрения специальных средств по предотвращению аварий. Одним из перспективных технических средств по предотвращению аварий на переездах является система интеллектуального видеонаблюдения СИВ.

2. Для анализа соответствия возможностей СИВ задачам повышения безопасности движения поездов предлагаются критерии качества и достоверности

видеосигналов. Качество видеосигналов оценивается приведенной дисперсией суммарной погрешности  $\delta_\varepsilon^2$ . Достоверность видеосигналов оценивается вероятностями правильного  $P_{\text{прав.обн.}}$  и ложного  $P_{\text{лож.обн.}}$  обнаружений опасного объекта.

3. Для определения допустимых значений вероятностей  $P_{\text{прав.обн.}}$  и  $P_{\text{лож.обн.}}$  вводится функция потерь, характеризующая величину экономического ущерба от пропуска объекта и ложного обнаружения. Так, в результате анализа соответствия возможностей СИВ задачам повышения безопасности движения поездов получены следующие цифры: вероятность ложного обнаружения не должна превышать  $P_{\text{лож.обн.}} \leq 10^{-4}$ ; вероятность правильного обнаружения должна быть больше или равна  $P_{\text{прав.обн.}} \geq 0,9993$ .

4. Существующие СИВ обеспечивают вероятность ложного обнаружения  $P_{\text{лож.обн.}} \geq 10^{-3}$ . Для уменьшения вероятности ложного обнаружения существуют два направления исследований: 1) улучшение качества видеосигнала; 2) совершенствование алгоритмов распознавания объектов. Эффективность работы видеоаналитики СИВ связана с качеством видеосигнала (отношением с/ш). Повышение отношения с/ш на выходе канала передачи информации – необходимое условие использования видеонаблюдения для повышения безопасности движения поездов.

5. Для повышения качества видеосигналов требуется переход на новую элементную базу (нанoeлектронику), реализованную с помощью квантовых структур и новых полупроводников. Новые материалы способны увеличить коэффициент поглощения света, квантовую эффективность, чувствительность, динамический диапазон и уменьшить собственные шумы фотоприёмников.

6. Ограниченность частотного радиодиапазона и сложность электромагнитной обстановки на ж/д обуславливает целесообразность использования для связи с движущимися поездами беспроводных оптических каналов связи (БОКС).



## **ГЛАВА 2 КАЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИДЕОСИГНАЛОВ В СИСТЕМЕ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

### **2.1 Методика оценки критерия качества систем видеонаблюдения**

Главная задача систем видеонаблюдения на объектах железнодорожного транспорта – повышение безопасности движения поездов путем обнаружения опасных объектов с помощью видеокамер, устройств распознавания образов и передачи видеоизображения по каналам связи в ЕДЦУ и машинистам поездов. Для выполнения этой задачи необходимо, чтобы качество переданных сигналов обеспечивало требуемую достоверность информации, оцениваемую вероятностями правильного и ложного обнаружений. Оценка качества видеосигналов должна учитывать искажения, которые вносят приемопередающие устройства и каналы связи системы видеонаблюдения.

Проблемы качества видеоизображения связаны с потерями данных в процессе передачи по сети связи, которые происходят не только из-за внешних и внутренних искажений, но и временных задержек видеосигналов. Временные задержки проявляются в виде ухудшения качества визуального восприятия кадров, например, в виде снижения резкости, «замораживания» части изображения и т.д. Поэтому оценка качества изображения – это сложный процесс, основанный на анализе как объективных, так и субъективных факторов. Оценка качества может осуществляться как на передающей стороне, например, для динамического регулирования скорости видеопотока путем изменения коэффициентов квантования, так и на приемной стороне у пользователей видеoinформации.

Методы оценки качества видеоизображения разделяются на субъективные, осуществляемые с помощью экспертов, и объективные, проводимые на основе измерений определенных параметров [56,57].

Субъективная оценка видеоизображения проводится на основе тестирования экспертов и является трудоемким методом (во многих случаях неосуществимо). В работе используется объективный метод оценки качества видеосигналов. Причины ухудшения качества, последствия, а также требования к методам оценки и их классификация представлены на рисунке 2.1.

Объективные методы, как правило, состоят из двух этапов: вычисление параметра (например, отношения с/ш пикселей фотоматрицы); сравнение исходного и искаженного сигнала по выбранному параметру.

В теории передачи сигналов аналогичным методом оценки качества является вычисление отношения с/ш на выходе системы передачи информации или приведенной дисперсии суммарной погрешности  $\delta_\varepsilon^2$  (величине, обратной отношению с/ш) [25]. Эта оценка качества видеосигналов относится к пиксельному методу (рисунок 2.1).

Величина приведенной дисперсии  $\delta_\varepsilon^2$  определяет минимальное количество информации на входе приемника (устройства распознавания), которое необходимо передать по каналу для обеспечения требуемого качества работы видеоаналитики СИВ (вероятностей обнаружения).

Для определения величины приведенной дисперсии суммарной погрешности на первом этапе нужно разработать модель оценки  $\delta_\varepsilon^2$ , учитывающую влияние основных факторов, ухудшающих качество видеосигнала. На втором этапе разработать методику расчета вносимых погрешностей устройствами канала передачи информации. На третьем этапе рассчитать значение  $\delta_\varepsilon^2$  (оценки критерия качества) и сделать вывод о соответствии их требованиям ж/д, полученным с помощью функции потерь (параграф 1.3).

Как отмечено в главе 1, результат распознавания образа определяется многими факторами. Он зависит от качества формирования цифрового сигнала на передающей стороне (разрешения фотосенсора видеокамер, погрешностей цифрового преобразования, погодных условий, освещенности, посторонних источников света и т.д.), помех и искажений в линии связи, шумов

фотоприемника и погрешностей восстановления изображения на приемной стороне, а также алгоритмов видеоаналитики.



Рисунок 2.1 – Методы оценки качества видеоизображения

Большинство из этих факторов вызывают искажения видеосигнала, которые можно оценить в виде приведенной к мощности полезного сигнала дисперсии суммарной погрешности  $\delta_{\varepsilon}^2$ .

Общий вид приведенной дисперсии суммарной погрешности  $\delta_\varepsilon^2$  (например, черно-белого изображения), определяющий качество передачи видеосигнала в цифровой форме при передаче по каналам связи, можно представить следующим образом [9,58]:

$$\delta_\varepsilon^2 = \delta_{\text{фс}}^2 + \delta_{\text{л}}^2 + \delta_{\text{анфп}}^2 + \delta_{\text{и}}^2, \quad (2.1)$$

где:  $\delta_{\text{фс}}^2 = \delta_{\text{анфс}}^2 + \delta_{\text{кв}}^2$  – приведенная дисперсия погрешности сигнала на выходе фотосенсора (ФС) видеокамеры (зависит от размеров и внутреннего шума фотодетекторов пикселей и погрешности квантования);

$\delta_{\text{кв}}^2$  – приведенная дисперсия погрешности квантования видеосигнала (зависит от динамического диапазона сигнала, шага квантования, позиционности кода);

$\delta_{\text{анфс}}^2$  – приведенная дисперсия погрешности за счёт внутреннего шума пикселей после аналого-цифрового преобразования (АЦП);

$\delta_{\text{л}}^2$  – приведенная дисперсия погрешности, вносимой линией связи (зависит от типа линии и технологий передачи цифровых сигналов);

$\delta_{\text{анфп}}^2$  – приведенная дисперсия аномальной погрешности от шума фотоприемника (ФП) (в случае использования волоконно-оптической линии связи);

$\delta_{\text{и}}^2$  – приведенная дисперсия погрешности интерполяции (определяется алгоритмом обработки выборок).

В выражение для интегральной оценки  $\delta_\varepsilon^2$  не включены искажения от плохих условий съемки объекта, негативных эффектов из-за порядка и плотности расположения пикселей на фотоматрице (например, ПЗС-матрице) и др. Однако с помощью  $\delta_\varepsilon^2$  можно оценить величину неустраняемых искажений, возникающих за счет приемо-передающей аппаратуры и линии связи. Эти составляющие канала передачи информации вносят основной вклад в качество распознавания образа. Окончательный результат работы СИВ оценивается величиной вероятности

правильного обнаружения  $P_{\text{прав.обн.}}$  и ложного обнаружения  $P_{\text{лож.обн.}}$  опасного объекта, являющиеся функциями отношения с/ш на входе устройства распознавания.

Следует учесть, что современные интерполирующие фильтры и процессоры обеспечивают относительно малые погрешности интерполяции  $\delta_u^2$  [25].

Величина  $\delta_u^2$  при использовании интерполирующих фильтров низкой частоты (ФНЧ), близких к идеальным, приближается к нулю [25].

Для видеосигналов (в том числе высокой четкости) основным источником помех является цифровой шум ФС  $\delta_{\text{анфс}}^2$  (параграф 2.2), который «генерируется» самим пикселем. Причины этого шума: дефекты или примеси материала потенциального барьера ям и светочувствительного слоя. Это приводит в первом случае, к потерям потенциала за счет утечки заряда, во втором случае – к тепловому шуму в отсутствии света [59].

Отсюда, приведенная дисперсия суммарной погрешности видеосигнала на входе устройства распознавания (например, согласованного фильтра и порогового устройства ПУ) можно представить следующим образом:

$$\delta_\varepsilon^2 \cong \delta_{\text{фс}}^2 + \delta_{\text{анфн}}^2 + \delta_l^2. \quad (2.2)$$

Как показано ниже в параграфах 2.2 и 4.2, вероятности аномальных ошибок за счет шума ФС и ФП имеют порядок соответственно  $10^{-5}$ ,  $10^{-7}$ .

В условиях постоянного мониторинга параметров ВОЛС (величины затухания и дисперсионных искажений в оптическом волокне) сети передачи данных ж/д величина  $\delta_l^2$  имеет порядок  $10^{-10}$  (параграф 2.4), что значительно меньше  $(\delta_{\text{фс}}^2 + \delta_{\text{анфн}}^2)$  [60,61].

Отсюда, величину приведенной погрешности можно оценить так:

$$\delta_\varepsilon^2 \cong \delta_{\text{фс}}^2 + \delta_{\text{анфн}}^2. \quad (2.3)$$

На рисунке 2.2 представлена схема расчета величин  $\delta_\varepsilon^2$  и  $P_{\text{прав.обн.}} = f(\delta_\varepsilon^2)$ , характеризующих эффективность работы СИВ.

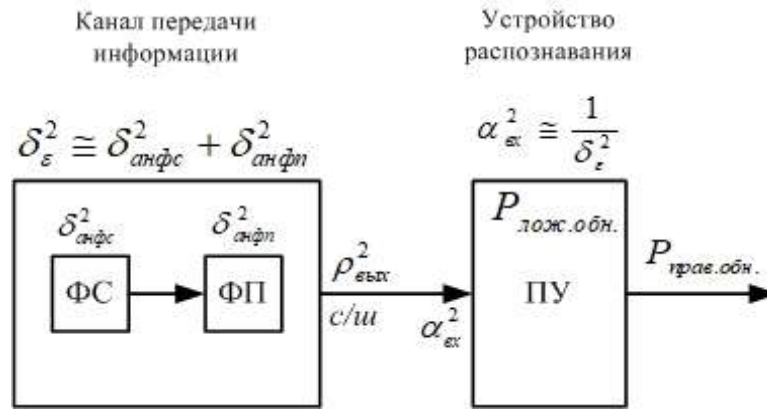


Рисунок 2.2 – Модель оценки приведенной дисперсии суммарной погрешности  $\delta_\varepsilon^2$  и вероятности  $P_{прав.обн.}$  сигнала СИВ

Оценка вероятности правильного обнаружения  $P_{прав.обн.} = f(\delta_\varepsilon^2)$  опасного объекта осуществляется по критерию Неймана-Пирсона для заданной величины  $P_{лож.обн.}$ . Вероятность  $P_{прав.обн.}$  является функцией отношения с/ш ( $\alpha_{вх}^2$ ) на входе согласованного фильтра. Значение отношения с/ш является величиной, обратной приведенной дисперсии суммарной погрешности (2.3):

$$\alpha_{вх}^2 \cong \frac{1}{\delta_\varepsilon^2} \quad . \quad (2.4)$$

Значения погрешностей, вносимых фотосенсором  $\delta_{фс}^2$  и фотоприемником  $\delta_{анфп}^2$ , во многом зависят от оптоэлектронных характеристик используемого материала, которые определяются типом полупроводника, количеством дефектов кристаллической решетки, геометрическими размерами базового элемента (объемного кристалла или квантовой структуры).

Основным функциональным элементом фотосенсора является пиксель фотоматрицы (ФМ), в котором накапливается заряд в результате фотоэффекта [6]. Количество пикселей в фотоматрице может измеряться миллионами (от этого зависит разрешающая способность видеокамеры). После процесса накопления заряда в потенциальной яме пикселей происходит процесс считывания его в виде фототока. В современных цифровых видеокамерах дискретное представление фототока осуществляется в два этапа: сначала – преобразование Фурье, потом – АЦП [25]. В рассматриваемом примере аналоговый сигнал пикселей сразу

преобразуется в цифровой с помощью АЦП. Этот способ позволяет отдельно анализировать полезный сигнал и влияние шума на качество сигнала. Рассматривается модель, при которой шум и истинное значение сигнала (заряда пикселя) квантуются отдельно. Искажения в виде разницы между присвоенным уровнем квантования и истинным значением накопленного заряда пикселя обозначены в виде приведенной дисперсии погрешности квантования  $\delta_{кв}^2$ . Шум пикселя после АЦП может приводить к аномально большим погрешностям при выборе уровня квантования. Эти искажения оцениваются с помощью приведенной дисперсии аномальной погрешности  $\delta_{анфс}^2$ . Таким образом, величина  $\delta_{анфс}^2$  есть погрешность от теплового (аналогового) шума  $h$  после процесса квантования (параграф 2.2). Для цифровых видеокамер величина  $\delta_{фс}^2$  есть аномальные погрешности  $\delta_{анфс}^2$  после АЦП.

Исследование влияния  $\delta_{анфс}^2$  и  $\delta_{кв}^2$  на величину  $\delta_{фс}^2$  показывает, что для отношения с/ш на входе АЦП  $\rho_{выхфм}^2 \geq 10^5$  и числа уровней квантования  $L_{кв} = 256$  имеет место неравенство:  $\delta_{анфс}^2 \gg \delta_{кв}^2$ . В этом случае величина  $\delta_{фс}^2 \cong \delta_{анфс}^2$ .

Таким образом, для оценки приведенной дисперсии суммарной погрешности нужно исследовать влияние внутреннего шума материала ФС и ФП на величину вносимых искажений в видеосигнал.

Характеристиками качества фотосенсора являются зависимость отношения с/ш на выходе ФС ( $1/\delta_{фс}^2$ ) от  $\rho_{выхфм}^2$ , а именно:  $\delta_{анфс}^2 = f(\rho_{выхфм}^2)$  (рисунок 2.3а).

При использовании ВОСП для связи видеокамеры и видеосервера СИВ, искажения в видеосигнал вносит также фотоприемник. В основе принципа действия ФП лежит фотоэффект. Следовательно, основным источником погрешностей для фотоприемника так же, как и для фотоматрицы, является внутренний шум, зависящий от качества материала.

Характеристикой качества ФП является зависимость вероятности ошибки при приеме элементарного импульса  $P_{ошфп}$  от отношения с/ш на выходе

фотодетектора  $P_{ош\phi n} = f(\rho_{вых\phi d}^2)$  (рисунок 2.3б) или аномальной погрешности  $\delta_{ан\phi n}^2 = f(P_{ош\phi n})$ .

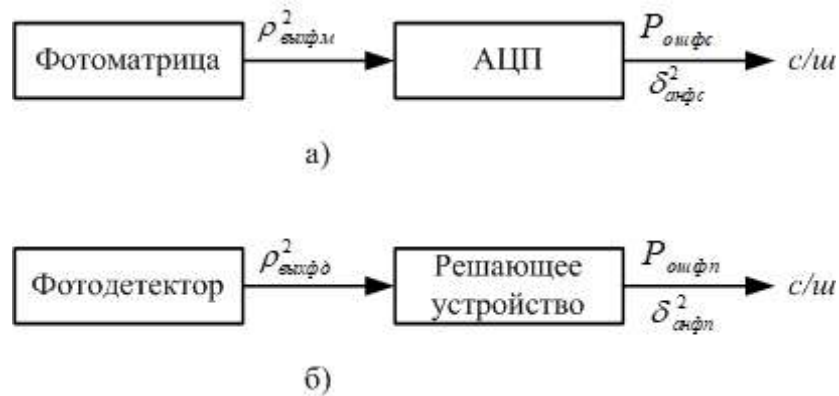


Рисунок 2.3 – Пояснения к расчетам погрешностей  $\delta_{ан\phi с}^2$ ,  $\delta_{ан\phi n}^2$   
 а - фотосенсора; б - фотоприёмника

Таким образом, для оценки качества сигналов на выходе канала передачи информации СИВ необходимо исследовать приведенные дисперсии погрешностей фотосенсора  $\delta_{ан\phi с}^2$  и фотоприемника  $\delta_{ан\phi n}^2$ .

## 2.2 Оценка приведенной дисперсии погрешности сигналов фотосенсора

В основе фотосенсора – аналоговое устройство, называемое фотоматрицей, состоящей из отдельных пикселей (светочувствительных элементов). Предназначено для преобразования проецированного на него оптического изображения в аналоговый электрический сигнал или поток цифровых сигналов при наличии аналого-цифрового преобразования. В пикселе (например, на основе прибора с зарядной связью ПЗС) возбуждаемые при поглощении света электрон-дырочные пары разделяются электрическим полем области пространственного заряда МОП-конденсатора, причем неосновные носители затягиваются в потенциальные ямы, где за время экспонирования накапливается заряд, точно пропорциональный интенсивности света, падающего на данный участок поверхности полупроводника [62].

Основными элементами пикселя являются:



канал n-типа (слой), являющийся зоной генерации носителей (внутреннего фотоэффекта);

потенциальная яма (карман n-типа), где собираются электроны из зоны генерации носителей заряда;

прозрачные электроды для создания потенциальной ямы;

дополнительные элементы в виде подложки p-типа и изолирующего слоя из оксида кремния [63].

Структурная схема пикселя представлена на рисунке 2.4 [63].

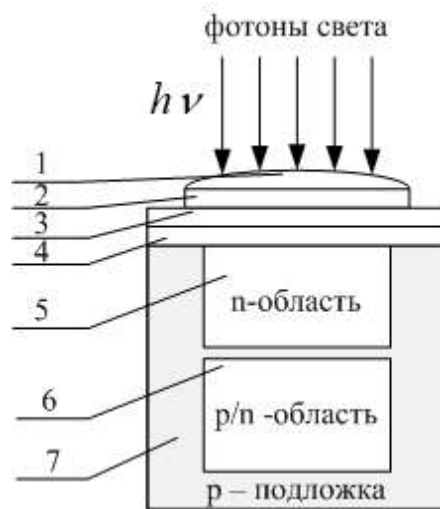


Рисунок 2.4 – Основные элементы пикселя [63]

1 – микролинза пикселя; 2 – цветной светофильтр пикселя; 3 – прозрачный электрод; 4 – оксид полупроводника (например, кремния); 5 – зона генерации носителей (зона внутреннего фотоэффекта в полупроводнике); 6 – потенциальная яма (сбор электронов из зоны 5); 7 – полупроводниковая подложка p-типа

Главными параметрами фотоматрицы, состоящей из большого числа пикселей (порядка миллиона), являются:

- токовая чувствительность (светочувствительность)  $S_i$ ;
- отношение мощностей сигнала и шума  $\rho_{\text{выхфм}}^2$ ;
- физический размер пикселя.

Чувствительность фотоматрицы складывается из чувствительности всех ее пикселей. Чем выше размер матрицы, тем больше отношение с/ш  $\rho_{\text{выхфм}}^2$ .

Физический размер всей матрицы и ее разрешение  $M$  определяют размер пикселя.

Разрешающая способность – это различение двух точек (линий), если между ними находится третья (незасвеченная) точка (линия). Отсюда, разрешающая способность  $M$  определяется как расстояние в два пикселя:  $M = \frac{1}{2p}$ , где  $p$  - размер пикселя. Примерные размеры матриц в мм (6,3 x 4,7), (7,6 x 5,7), (17,3 x 13), (26,6 x 17,9), (36 x 24) [64].

Размеры пикселя  $L$  – единицы микрон. Например, видеокамеры Canon 600i имеют следующие параметры: типоразмер  $R_m = 1/6$ ; количество пикселей (млн)  $K = 0,8$ ; форма квадратная (мкм)  $L = 2,3$ . Примерная формула расчета размера пикселя  $L$  и разрешающей способности  $M$  [59,65]:

$$L \leq \frac{(12/5) \cdot R_m}{\sqrt{K}} \text{ (мкм)} \quad . \quad (2.5)$$

Пиксели могут быть реализованы в виде объемных кристаллов или множественных квантовых ям (МКЯ). Уменьшая площадь пикселя, можно разместить большее количество пикселей в фотоматрице и увеличить разрешающую способность (2.5). Однако, при этом снижается чувствительность пикселя, которая зависит от площади светочувствительного слоя. Улучшая оптоэлектронные характеристики материала светочувствительного слоя пикселя можно увеличить чувствительность, несмотря на уменьшенную площадь поверхности этого слоя. Отсюда, применяя более качественные материалы пикселя можно повысить и разрешающую способность и чувствительность фотоматрицы.

Таким образом, качественные параметры ПЗС-матрицы (чувствительность, отношение с/ш) зависят от оптоэлектронных характеристик отдельных пикселей.

В основе функционирования пикселя лежит явление внутреннего фотоэффекта [59]. Процессы, протекающие в пикселе, можно разделить на два этапа:

1) «накопление заряда» (происходит движение свободных электронов в потенциальную яму, образовавшихся в результате действия света, и накопление заряда, величина которого пропорциональна мощности света);

2) «считывание заряда» (происходит считывание заряда из потенциальных ям пикселей фотоматрицы в виде фототока для каждого кадра изображения путем переноса заряда из одной ямы в другую с эффективностью 0,99-0,999999) [66].

Интегральная чувствительность пикселя  $S_i$  есть отношение величины фототока  $I_{\phi m}$  (в миллиамперах) к световому потоку  $\Phi$  (в люменах) от источника света, спектральный состав которого соответствует [66] вольфрамовой лампе накаливания (оценивает чувствительность фотосенсора в целом):

$$S_i = \frac{I_{\phi m}}{\Phi} . \quad (2.6)$$

Чувствительность  $S_i$  (2.6) зависит от площади светочувствительной области  $S_{nl}$ , от квантовой эффективности  $\eta$ . Квантовая эффективность зависит от коэффициента отражения фотонов от поверхности светочувствительного слоя пикселя и проникающей способности фотонов (коэффициента поглощения  $\alpha$ , зависящей от материала и длины волны света). Чем меньше число отраженных от поверхности пикселя фотонов, тем выше квантовая эффективность. Часть не отраженных фотонов может потеряться, застряв у поверхности, или проникнуть слишком глубоко в материал пикселя. «Длинноволновые» частицы проникают гораздо глубже «коротковолновых». От материала пикселя и его размеров необходимо добиться такого коэффициента поглощения для фотонов, соответствующих видимому свету, чтобы внутренний фотоэффект (ВФЭ) происходил вблизи потенциальной ямы пикселя [65].

Эффективность ВФЭ (без учета коэффициента отражения в случае создания идеальных благоприятных с точки зрения обработки поверхности материала условий для поглощения фотонов) и связанный с ней коэффициент поглощения определяют фотопроводимость материала  $\sigma_{\phi n}$ .

Фотопроводимость можно выразить следующей формулой [66]:

$$\sigma_{\phi n} = q\mu_n \Delta n + q\mu_p \Delta p , \quad (2.7)$$

где  $q$  – заряд электрона;

$\mu_n$  – подвижность электронов в материале светочувствительного слоя;

$\mu_p$  – подвижность дырок в материале светочувствительного слоя;

$\Delta n$  – концентрация фотоэлектронов в результате фотоэффекта;

$\Delta p$  – концентрация дырок в результате фотоэффекта.

Фототок пикселя (накопление заряда и движение свободных электронов из одной потенциальной ямы в другую) можно определить по следующей формуле [66]:

$$I_{\text{фм}} = S_{\text{пл}} \sigma_{\text{фн}} U, \quad (2.8)$$

где  $U$  – глубина потенциальной ямы.

Величина концентраций фотоэлектронов и дырок (2.7), участвующих в фотоэффекте (2.8), определяется степенью легирования полупроводника, например, кремния  $Si$  (материала светочувствительного слоя) фосфором. Величина подвижности этих неравновесных носителей определяется химическим элементом ( $Si$ ), а также степенью его очистки от посторонних примесей и тяжелых изотопов.

Квантовая эффективность  $\eta$  может быть представлена как отношение числа ионизированных электронов к количеству упавших фотонов. Это значит, что не все фотоны превращаются в возбужденные электроны. Величина  $\eta$  имеет разные значения, например, для объемного кристалла  $\eta$  имеет порядок 70%, для квантовой ямы – 2%.

Наиболее важная характеристика пикселя на объемном кристалле – спектральная чувствительность  $R_i$ , выраженная через характеристики материала, рассчитывается следующим образом [67]:

$$R_i = \eta g \frac{\lambda}{1,24}, \quad (2.9)$$

где  $\eta$  – квантовая эффективность (зависит от коэффициента отражения и коэффициента поглощения);

$$g = \frac{\tau}{t_{mp}} = \tau / \frac{l}{\mu_n E} = \tau / \frac{l^2}{\mu_n U} - \text{коэффициент усиления};$$

$\mu_n$  – подвижность носителей заряда;

$\tau$  – время жизни носителя заряда;

$t_{mp}$  – время движения заряда по кристаллу;

$E$  – напряженность электрического поля;

$U$  – напряжение электрического поля;

$\lambda$  – длина волны видимого света (мкм).

Известно, что фотоны, поглощенные полупроводниками, генерируют электронно-дырочные пары. После «рождения» носители заряда либо рекомбинируют друг с другом с характерным временем  $\tau$ , либо двигаются к омическим контактам (затем удаляются электрическим полем).

Произведение  $\mu_n \tau$  является важной характеристикой качества материала для фотоприемника. Например, после обогащения полупроводникового материала (очистки от тяжелых изотопов) увеличивается подвижность носителей заряда и время жизни носителей заряда за счет уменьшения дефектов кристаллической решетки (концентрации тяжелых изотопов).

Для пикселя ФС (в отличие от ФП) имеет место только генерация носителей заряда без рекомбинации (в пределах потенциальной ямы нет направленного перемещения носителей), поэтому коэффициент усиления равен  $g = 1$ .

Эквивалентная мощность шума  $P_{\text{шн}}$ , генерируемая фоточувствительным слоем пикселя и характеризующая порог чувствительности (2.9), равна [67]:

$$P_{\text{шн}} = \frac{\sqrt{2qI_{\text{тем}}\Delta f}}{R_i}, \quad (2.10)$$

где  $I_{\text{тем}}$  – темновой ток;

$\Delta f = 1/2\tau$  – полоса частот интегрирования ( $\tau$  – длительность засветки);

$q$  – заряд электрона.

Для оценки мощности  $P_{\text{шн}}$  необходимо знать величину темнового тока  $I_{\text{тем}}$  (количество электронов, попавших в потенциальную яму в отсутствии засветки).

Плотность темнового тока  $J_{тем} = I_{тем} / S_{пл}$  ( $S_{пл}$  - площадь поверхности кристалла), обусловленная термоэмиссионными эффектами и определяемая числом свободных электронов, оценивается по формуле, изложенной в источнике [19].

При условии приложенного напряжения, превышающего  $\frac{kT}{q}$  ( $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - температура по Кельвину):

$$J_{тем} = qp_0\mu_n ES_c, \quad (2.11)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля;

$S_c$  – сечение светочувствительного слоя;

$p_0$  – концентрация носителей в отсутствии засветки.

Величина концентрации свободных носителей в отсутствии засветки зависит от температуры окружающей среды и количества подуровней в запрещенной зоне (числа легирующих атомов в светочувствительном слое и других дефектов, в том числе тяжелых изотопов). Отсюда, чем меньше дефектов в материале пикселя или фотоприемника, тем меньше темновой ток.

Для сравнения различных материалов (объемных кристаллов и квантовых структур из разных химических элементов) вводится понятие обнаруживающей способности  $D$ .

Обнаруживающая способность пикселя  $D$  не зависит от измерительной системы (ширины полосы частот, площади поверхности образца) и определяется формулами (2.9 – 2.11):

$$D = \frac{\sqrt{S_{пл}\Delta f}}{P_{ш}}, \quad (2.12)$$

$$\text{или } D = \frac{R}{\sqrt{4qgJ_0}}. \quad (2.13)$$

Обнаруживающую способность пикселя (2.12 – 2.13) можно существенно улучшить путем обогащения материала (уменьшения концентрации тяжелых изотопов). При этом повышается квантовая эффективность, чувствительность (2.9) и уменьшается мощность шума (2.10). Рассмотренные характеристики

пикселя (зависимости чувствительности, темнового тока от качества материала) определяют отношение  $c/\text{ш}$   $\rho_{\text{выхфм}}^2$  на выходе ФС, а также величину приведенной дисперсии текущей погрешности  $\delta_{\text{фс}}^2$ .

Основным источником искажений, вносимых фотосенсором, является цифровой шум. Величина погрешности, возникающей после цифровой обработки видеосигнала устройством АЦП, зависит от внутреннего шума пикселей. Поэтому расчетная модель оценки приведенной дисперсии суммарной погрешности  $\delta_{\varepsilon}^2$  и приведенной дисперсии погрешности фотосенсора  $\delta_{\text{фс}}^2$  (2.3) требует уточнений. Это связано с тем, что часть шума, генерируемого пикселями ФС может не влиять на качество видеосигнала после АЦП. Такой эффект происходит в том случае, если величина шума меньше половины шага квантования (согласно правилу арифметического округления). Чтобы учесть эти особенности оцифровки аналогового сигнала видеоизображения, проанализируем влияния внутреннего шума пикселя на выбор уровня квантования.

Особенности работы ФС заключаются в том, что шумы пикселей складываются с фототоком видеоизображения. После процесса дискретизации фототока амплитуда импульсов АИМ (амплитудно-импульсно-модулированного сигнала) состоит из суммы сигнала  $\lambda$  и шума  $h$ . Положительная разность между суммой  $(\lambda + h)$  и ближайшим целым числом, представляющим нижний уровень квантования, может быть меньше половины шага квантования  $(\Delta_{\text{кв}}/2)$ . При округлении в меньшую сторону шум отбрасывается. Погрешность квантования  $\delta_{\text{кв}}^2$  отсчитывается от импульса АИМ (выборки) без учета величины  $h$  шума. Шум не вызывает ошибки, если округление происходит в большую сторону и положительная разность между ближайшим верхним уровнем квантования и суммой  $(\lambda + h)$  меньше половины шага квантования  $(\Delta_{\text{кв}}/2)$ . Обозначим через  $\Delta$  положительную разность между амплитудой выборки и ближайшим нижним уровнем квантования (рисунок 2.5) [58].

Если величины  $\Delta > \frac{\Delta_{кв}}{2}$ ,  $h < \frac{\Delta_{кв}}{2}$ , то шум также не влияет на выбор уровня квантования. В других вариантах соотношений амплитуд сигнала и шума ( $\Delta$  и  $h$ ) могут происходить аномальные ошибки, т.е. ошибки в присвоении номера уровня квантования.

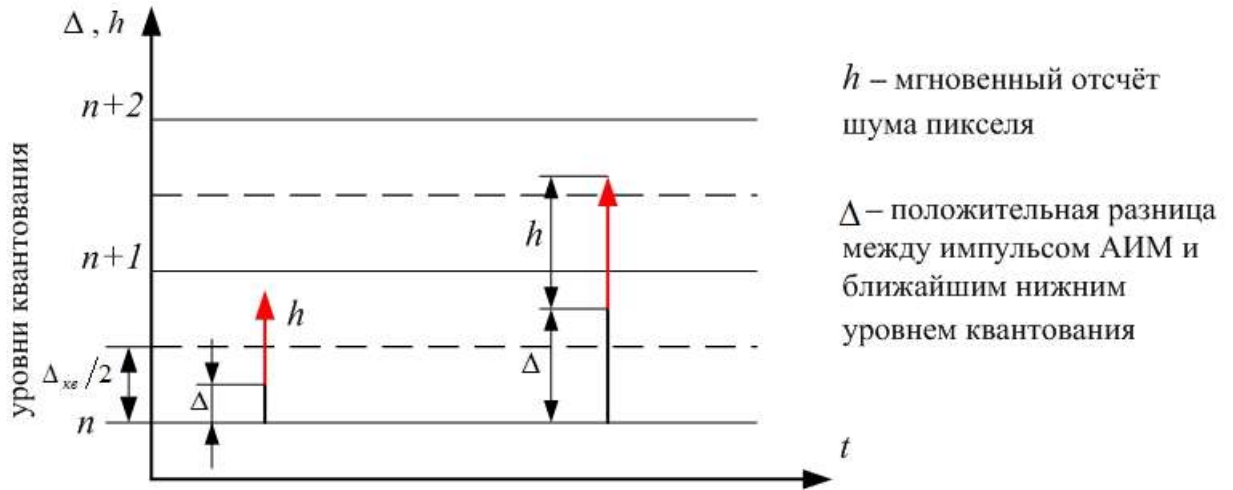


Рисунок 2.5 – Аномальные ошибки на выходе ФС

Величину аномальной ошибки  $\delta_{анфс}^2$  при условии гауссовского распределения плотности вероятностей (ПРВ) фототока можно рассчитать следующим образом [25,68]:

$$\text{при } P_{оифс} < 0,1 \quad (\rho_{выхфл}^2 \geq 4 \cdot 10^4) \quad \delta_{анфс}^2 \cong 12 \cdot P_{оифс}, \quad (2.14)$$

где  $P_{оифс}$  – величина вероятности ошибки на выходе ФС (рисунок 2.3).

Таким образом, при учете аномальных ошибок в процессе квантования большое значение имеет «расстояние» величины  $\Delta$  (приращения выборки АИМ относительно ближайшего нижнего уровня) до верхнего уровня квантования.

Рассмотрим варианты, когда аномальные ошибки обязательно произойдут из-за влияния шума.

Первый тип ошибок с вероятностью  $P_{оул}$  может произойти при одновременном выполнении следующих условий:

- 1) значение  $\Delta$  меньше  $\Delta_{кв} / 2$ ;



2) величина  $(\Delta + h) > \Delta_{кв} / 2$  за счет амплитуды шума  $h > \Delta_{кв} / 2$ . В этом случае амплитуде выборки будет присвоен номер уровня на единицу больше, чем по правилу арифметического округления.

Второй тип ошибок с вероятностью  $P_{ош2}$  может произойти при одновременном выполнении следующих условий:

- 1) величина  $\Delta > \Delta_{кв} / 2$ ;
- 2) сумма  $(\Delta + h) > 1,5 \Delta_{кв} / 2$ ;
- 3) амплитуды шума  $h > \Delta_{кв}$ .

При этом величине сигнала также будет присвоен номер уровня квантования минимум на один больше, чем по правилу арифметического округления.

Для оценки вероятностей аномальных ошибок для изложенных выше случаев нужно определить закон ПРВ системы из двух случайных величин:  $\Delta$  и  $h$ .

Можно предположить, что ПРВ  $\omega(\Delta)$  случайной величины  $\Delta$  – равновероятный закон [25], равный

$$\omega(\Delta) = \frac{1}{\Delta_{кв}}, \quad (2.15)$$

где  $\Delta_{кв}$  – величина шага квантования.

Плотность распределения вероятностей  $\omega(h)$  случайной величины  $h$  подчиняется закону Рэлея с дисперсией  $\sigma_h^2$ , так как пиксели в процессе преобразования световой энергии в электрическую выполняют функцию, аналогичную амплитудному детектору [25,58,62,67]:

$$\omega(h) = \frac{h}{\sigma_h^2} \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_h^2}\right) dh, \quad (2.16)$$

где  $\sigma_h^2$  – дисперсия амплитуды шума.

Учитывая, что амплитуды выборок сигнала и шума являются независимыми случайными величинами, амплитуду шума  $h$  можно также считать независимой величиной от приращения сигнала  $\Delta$ .

Отсюда, совместная ПРВ системы случайных величин  $\Delta$  и  $h$  будет равна произведению ПРВ  $\omega(\Delta)$  (2.15) и  $\omega(h)$  (2.16) [69]:

$$\omega(\Delta, h) = \frac{1}{\Delta_{кв}} \left[ \frac{h}{\sigma_h^2} \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_h^2}\right) \right]. \quad (2.17)$$

С учетом (2.17) выражение для вероятности  $P_{ош1}$  определяется следующим образом:

$$P_{ош1} = \int_0^{\Delta_{кв}/2} \frac{1}{\Delta_{кв}} \int_{\Delta_{кв}/2}^{\infty} \frac{h}{\sigma_h^2} \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_h^2}\right) dh d\Delta. \quad (2.18)$$

Значение вероятности  $P_{ош2}$  рассчитывается по следующей формуле:

$$P_{ош2} = \int_{\Delta_{кв}/2}^{\Delta_{кв}} \frac{1}{\Delta_{кв}} \int_{\Delta_{кв}}^{\infty} \frac{h}{\sigma_h^2} \exp\left(-\frac{h^2}{2\sigma_h^2}\right) dh d\Delta. \quad (2.19)$$

После интегрирования выражений (2.18) и (2.19) получаем следующие формулы:

$$P_{ош1} = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{\Delta_{кв}^2}{8\sigma_h^2}\right), \quad (2.20)$$

$$P_{ош2} = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{\Delta_{кв}^2}{2\sigma_h^2}\right). \quad (2.21)$$

Если учесть, что шаг квантования рассчитывается, как [6,25,58]:

$$\Delta_{кв} = \frac{\Lambda}{L_{кв} - 1} \approx \frac{\Lambda}{L_{кв}}, \quad (2.22)$$

где  $\Lambda$  – динамический диапазон видеосигнала  $\lambda(t)$  (для гауссовского закона ПРВ  $\Lambda = 6\sigma_\lambda$ ,  $\sigma_\lambda$  – среднеквадратическое отклонение сигнала  $\lambda(t)$ ),

$L_{кв}$  – число уровней квантования.

С учётом формулы (2.22) величина шага квантования равна:

$$\Delta_{кв} = \frac{6 \cdot \sigma_\lambda}{L_{кв}}. \quad (2.23)$$

После подстановки формулы (2.23) в выражения (2.20) и (2.21) получаем:

$$P_{ош1} = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{9\rho_{выхфм}^2}{2L_{кв}^2}\right), \quad (2.24)$$

где  $\rho_{выхфм}^2 = \frac{\sigma_{\lambda}^2}{\sigma_h^2}$  – отношение мощностей фототока и шума на выходе фотоматрицы ФС и входе устройства АЦП (рисунок 2.3);

$$P_{ош2} = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{18\rho_{выхфм}^2}{L_{кв}^2}\right). \quad (2.25)$$

Отсюда, величина вероятности суммарной ошибки на выходе ФС равна:

$$P_{ошфс} = P_{ош1} + P_{ош2}. \quad (2.26)$$

Подставляя в формулу (2.26) выражения (2.24) и (2.25), с учетом выражения (2.14), получим формулу для приведенной дисперсии погрешности фотосенсора  $\delta_{анфс}^2$ :

$$\delta_{анфс}^2 \cong 6\left[\exp\left(-\frac{9\rho_{выхфм}^2}{2L_{кв}^2}\right) + \exp\left(-\frac{18\rho_{выхфм}^2}{L_{кв}^2}\right)\right]. \quad (2.27)$$

Как видно из формулы (2.27), с увеличением числа уровней квантования  $L_{кв}$  уменьшается шаг квантования  $\Delta_{кв}$  и вероятность ошибки  $P_{ошфс}$  увеличивается. Отсюда, чем больше уровней квантования, тем выше должно быть значение отношения мощностей сигнала и шума  $\rho_{выхфм}^2$  на выходе ФМ (рисунок 2.3).

На основании [6,68,70] можно принять, что рабочими значениями с/ш являются  $\rho_{выхфм}^2 = 10^5$ .

Анализ влияния  $\rho_{выхфм}^2$ ,  $L_{кв}$  на величину  $P_{ошфс}$  показал, что для условий, при которых  $L_{кв} = 256$  и  $\rho_{выхфс}^2 \geq 10^5$ ; а также для  $L_{кв} = 1024$  и  $\rho_{выхфм}^2 \geq 10^6$ , преимущественное влияние на качество сигнала ФС оказывает вероятность  $P_{ош1}$ .

С увеличением  $\rho_{выхфм}^2$  разница между вероятностями  $P_{ош1}$  и  $P_{ош2}$  увеличивается. Отсюда, следует, что вероятность ошибки на выходе ФС определяется вероятностью  $P_{ош1}$ , т.е.  $P_{ошфс} \cong P_{ош1}$ .

Величина аномальной погрешности на выходе ФС  $\delta_{анфс}^2$  согласно формуле (2.27) рассчитывается, как:

$$\delta_{анфс}^2 \cong 6[\exp(-\frac{9\rho_{выхфс}^2}{2L_{кв}^2})]. \quad (2.28)$$

С учетом пояснений к формуле (2.3) приведенная дисперсия погрешности ФС  $\delta_{фс}^2$  равна сумме:

$$\delta_{фс}^2 = \delta_{анфс}^2 + \delta_{кв}^2, \quad (2.29)$$

где  $\delta_{кв}^2 = \frac{3}{a^{2k}} = \frac{3}{L_{кв}^2} = \frac{\Delta_{кв}^2}{12}$  – приведенная дисперсия погрешности квантования

для импульсно-кодовой модуляции (ИКМ) [25];

$a$  – разрядность кода;

$k$  – число разрядов в кодовой комбинации.

Таким образом, выбирая шаг квантования  $\Delta_{кв}$ , по формуле (2.23) можно обеспечить минимальные искажения  $\delta_{фс}^2$  с учетом погрешности квантования  $\delta_{кв}^2$ , а именно:

$$\delta_{фс}^2 = (\delta_{анфс}^2 + \delta_{кв}^2) \rightarrow \min, \quad (2.30)$$

$$[6\exp(-\frac{\Delta_{кв}^2}{4 \cdot 2 \cdot \sigma_h^2}) + \frac{\Delta_{кв}^2}{12}] \rightarrow \min. \quad (2.31)$$

По результатам проведенных исследований (2.24) – (2.31) величин погрешностей  $\delta_{анфс}^2$ ,  $\delta_{кв}^2$  можно сделать следующие выводы:

- 1) на величину погрешности  $\delta_{анфс}^2$ , возникающей в результате оцифровки шума ФМ, значительное влияние оказывает количество уровней квантования  $L_{кв}$ ;
- 2) при одинаковых отношениях  $\rho_{выхфм}^2$  и разных значениях  $L_{кв}$  величины  $\delta_{анфс}^2$  отличаются на несколько порядков;
- 3) чем больше уровней квантования, тем сильнее влияние внутреннего шума ФМ на качество сигнала;

4) при  $\rho_{\text{выхфс}}^2 \leq 10^5$  и  $L_{\text{кв}} = 256$ , а также при  $\rho_{\text{выхфс}}^2 \leq 10^6$  и  $L_{\text{кв}} = 1024$  соблюдается неравенство  $\delta_{\text{анфс}}^2 \gg \delta_{\text{кв}}^2$  (рисунок 2.2);

5) диапазон величин  $\rho_{\text{выхфм}}^2$ , при котором влияют обе составляющие погрешности ФС  $\delta_{\text{фс}}^2$ , имеет следующие значения: для  $L_{\text{кв}} = 256$  от  $\rho_{\text{выхфм}}^2 > 10^5$  до  $\rho_{\text{выхфм}}^2 \leq 2 \cdot 10^5$ , для  $L_{\text{кв}} = 1024$  от  $\rho_{\text{выхфм}}^2 > 10^6$  до  $\rho_{\text{выхфм}}^2 \leq 3 \cdot 10^6$ ,  $\delta_{\text{фс}}^2 = \delta_{\text{анфс}}^2 + \delta_{\text{кв}}^2$ ;

6) для малозумящих материалов ФМ, обеспечивающих соблюдение следующих условий:  $\rho_{\text{выхфм}}^2 > 2 \cdot 10^5$  для  $L_{\text{кв}} = 256$  и  $\rho_{\text{выхфм}}^2 > 3 \cdot 10^6$  для  $L_{\text{кв}} = 1024$  погрешность ФС определяется погрешностью квантования, т.е.  $\delta_{\text{фс}}^2 \approx \delta_{\text{кв}}^2$ .

Зависимость  $\delta_{\text{анфс}}^2 = f(\rho_{\text{выхфм}}^2)$  приведенной дисперсии погрешности ФС от отношения мощностей сигнала и шума  $\rho_{\text{выхфм}}^2$  представлена на рисунке 2.6.

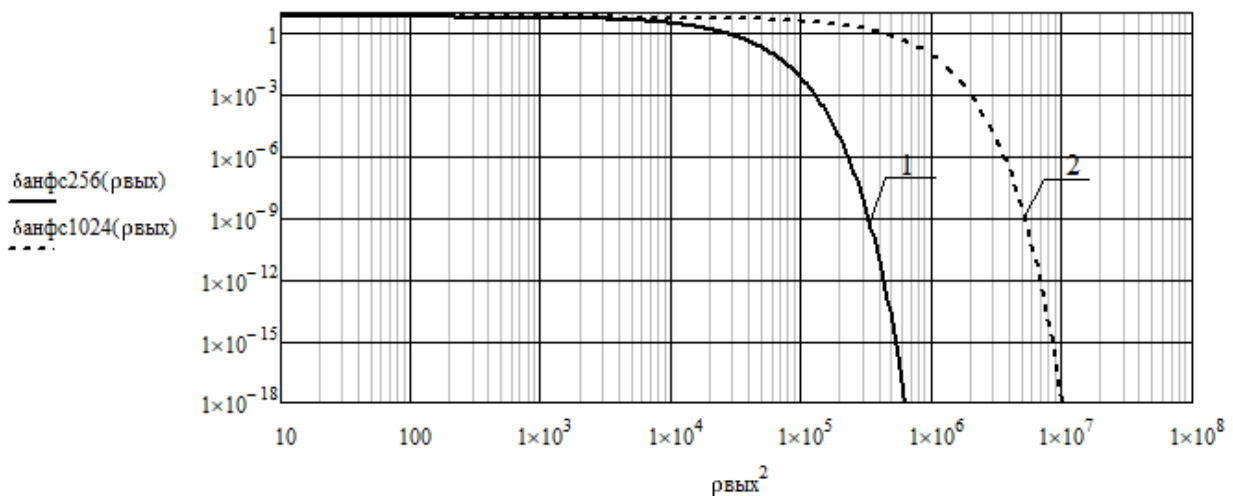


Рисунок 2.6 – Зависимость погрешности  $\delta_{\text{анфс}}^2$  от отношения  $\rho_{\text{выхфм}}^2$

1 – при  $L_{\text{кв}} = 256$ ; 2 – при  $L_{\text{кв}} = 1024$

Приведенная выше модель расчета приведенной дисперсии аномальной погрешности  $\delta_{\text{анфс}}^2$  позволяет оценить влияние шумов ФМ на качество видеосигнала и выбрать оптимальные характеристики пикселей и устройства АЦП.

Учитывая, что приведенная погрешность квантования  $\delta_{кв}^2$  не зависит от  $\rho_{выхфм}^2$ , для исследования влияния шума на качество видеосигнала целесообразно рассмотреть наихудшие условия работы ФС, отмеченные выше в пункте 4 и рассчитывать  $\delta_{фс}^2$  по формуле (2.28).

Этот выбор условий работы фотосенсора определен задачей оценки качества работы СИВ в сложных условиях функционирования железнодорожного переезда. Для разработки предложений по повышению качества сигнала ФС (уменьшению мощности внутренних шумов ФС) необходимо исследовать связь между оптоэлектронными характеристиками материала ФМ и отношением с/ш на выходе фотосенсора.

### 2.3 Оценка приведенной дисперсии погрешности сигналов фотоприемника

Оценка приведенной дисперсии погрешности фотоприемника  $\delta_{анфп}^2$  необходима, если в качестве направляющей системы между передающей и приемной частями СИВ (2.2) используется волоконно-оптическая линия связи (рисунок 1.6).

В этом случае главным источником погрешностей на приемной стороне являются шумы фотоприемника. В процессе преобразования оптических сигналов в электрические под действием внутреннего шума ФП происходят аномальные ошибки, а именно: ноль трансформируется в единицу ( $0 \rightarrow 1$ ) и единица – в ноль ( $1 \rightarrow 0$ ). Вероятность аномальной ошибки  $P_{оифп}$  и приведенная дисперсия аномальной погрешности  $\delta_{анфп}^2$  зависят от отношения с/ш на выходе фотодетектора ФД и входе РУ  $\rho_{выхфп}^2$  (рисунок 2.3).

Величина амплитуды оптического импульса определяется затуханием в оптическом волокне (уровень мощности оптического сигнала должен соответствовать входным параметрам ФП). Искажения (электрического) видеоимпульса на выходе ФП, происходящие за счет шума фотодетектора, могут

быть рассчитаны с помощью зависимости вероятности ошибки от  $Q$ - фактора, а именно:  $P_{ош\phi n} = f(Q)$  [36,61].

Метод расчета вероятности ошибки с помощью  $Q$ -фактора [58,71], предназначенный для приема оптического сигнала, основан на анализе электрического сигнала на выходе ФД в предположении его линейной зависимости от оптического сигнала:

$$P_{ош\phi n} = \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right), \quad (2.32)$$

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad (2.33)$$

где  $(\mu_1 - \mu_0)$  – разность напряжений электрического сигнала при единице и нуле;

$(\sigma_1 + \sigma_0)$  – сумма среднеквадратических отклонений флуктуаций шума ФД при приеме нуля и единицы.

Выражения (2.32), (2.33) получены на основании анализа глаз-диаграммы оптического цифрового сигнала с помощью измерительной оптической головки без вмешательства в электронный тракт ФП [36]. Если учесть следующие формулы [58,67,72]:

$$Q = \frac{\rho_{вых\phi\delta}}{2}; \rho_{вых\phi\delta}^2 = \frac{(P_{ex}R)^2}{\sigma_{h\phi n}^2}, \quad (2.34)$$

где  $P_{ex}R = I_{\phi m}$  – произведение входной мощности оптического сигнала и чувствительности ФД, равное величине фототока  $I_{\phi m}$ ;

$\sigma_{h\phi n}^2$  – дисперсия (мощность) шума ФД,

то выражение для вероятности ошибки можно представить как (2.32) – (2.34):

$$P_{ош\phi n} = \frac{2}{\sqrt{2\pi\rho_{вых\phi\delta}^2}} \exp\left(-\frac{\rho_{вых\phi\delta}^2}{8}\right) \quad (2.35)$$

Величина аномальной ошибки на выходе ФП для гауссовского закона ПРВ сигнала рассчитывается с учетом (2.35) по следующей формуле [25] (рисунок 2.3):

$$\delta_{ан\phi n}^2 \cong 12P_{ош\phi n} \quad . \quad (2.36)$$

Представляют интерес результаты сравнения величин  $\delta_{анфс}^2$  и  $\delta_{анфп}^2$  для ФС и ФП. Так, для рабочих значений ФП  $\rho_{выхфд}^2 \geq 65$  погрешность равна  $\delta_{анфп}^2 \leq 3,72 \cdot 10^{-5}$  (2.36) (параграф 4.3). Аналогично для ФС  $\rho_{выхфм}^2 \geq 10^5$  погрешность равна  $\delta_{анфс}^2 \leq 6,26 \cdot 10^{-3}$  (параграф 2.2). Отсюда, значения  $\delta_{анфп}^2$  на два порядка меньше погрешности  $\delta_{анфс}^2$ . Это свидетельствует о том, что основной вес в суммарную погрешность вносит цифровой шум фотосенсора.

Очевидно, что для уменьшения аномальных погрешностей  $\delta_{анфс}^2$  и  $\delta_{анфп}^2$  необходимо повышать с/ш на выходе фотодетектора (рисунок 2.3). Одним из способов увеличения с/ш является уменьшение шума ФД за счет улучшения оптоэлектронных характеристик материала. Наиболее эффективным методом снижения собственных шумов ФД является использование обогащенных полупроводников [54]. Кроме снижения шумов для улучшения качества сигналов на выходе фотоприемников важно повышать обнаруживающую способность материала. Новые материалы на квантовых структурах из обогащенных полупроводников обеспечивают меньшую мощность внутреннего шума и обладают большей обнаруживающей способностью по сравнению с объемными кристаллами (ОК).

На примере анализа работы фотоприемника (или фотодетектора) на множественных квантовых ямах (МКЯ) с помощью расчетов вероятностей ошибки можно показать все преимущества новых материалов. Такие квантово-размерные фотоприемники наиболее распространены и имеют преимущества перед ФД на объемных кристаллах.

Для такого анализа необходимо получить формулу для расчета  $\rho_{выхфд}^2$  на выходе квантово-размерного ФД. Согласно выражению (2.34) главными параметрами фотодетектора для оценки  $\rho_{выхфд}^2$  являются чувствительность и мощность шума ФД на МКЯ.

Как отмечалось выше, в основе работы фотоприемника лежит явление внутреннего фотоэффекта. Для оценки работы ФП на квантово-размерных



материалах требуется рассмотреть следующие характеристики: чувствительность  $R$ , пороговая мощность шумов  $P_{ш}$ , обнаруживающая способность материала  $D$ .

Согласно теории оптоэлектроники при освещении светом полупроводниковых квантовых ям происходят два компенсирующих друг друга в стационарном состоянии процесса: генерация фотоэлектронов и захват их квантовыми ямами для поддержания заполнения квантовых ям электронами (аналог процесса рекомбинации для объемных кристаллов).

Чувствительность фотоприемника  $R$  на множественных квантовых ямах МКЯ оценивается следующей формулой [67]:

$$R = \eta_{1QW} G_{1QW} \frac{1}{h\nu/q} = \eta_{1QW} G_{1QW} \frac{\lambda(\text{мкм})}{1,24}, \quad (2.37)$$

где  $\eta_{1QW} = p_e \alpha_{1QW} d$  – квантовая эффективность одной ямы;

$p_e$  – вероятность попадания фотовозбужденного электрона в континуум барьера ямы и удаления его электрическим полем ФП;

$\alpha_{1QW}$  – коэффициент поглощения света для одной квантовой ямы (КЯ);

$d$  – толщина образца (барьера квантовой ямы);

$G_{1QW} = \frac{\tau_c}{\tau_{mp}} = \frac{1}{p_c}$  – однопроходное усиление фотопроводимости квантовой

ямы;

$\tau_c$  – время захвата электрона при пролете над квантовой ямой (типичное значение  $(1-10)nc$ );

$\tau_{mp}$  – время переноса электрона через барьер толщиной  $d$  со скоростью дрейфа  $V_{dp} = \mu_n E$ , равной произведению подвижности электрона  $\mu_n$  и напряженности электрического поля  $E$ ;

$p_c = \frac{d}{V_{dp} \tau_c}$  – вероятность захвата электрона квантовой ямой;

$h$  – постоянная Планка;

$\nu$  – частота света;

$q$  – заряд электрона;

$\lambda$  – длина волны света.

Величина мощности минимального шума (порог чувствительности) определяется по формуле:

$$P_{ш} = \frac{\sqrt{2(2-p_c)qI_{тем}\Delta f / (Np_c)}}{R}, \quad (2.38)$$

где числитель формулы (2.38) – квадратный корень из мощности суммарного шума (теплового, генерационно-рекомбинационного, дробового);

$$I_{тем} = S_{пл} J_{тем} = S_{пл} q \rho_{3Dтерм} V_{др} - \text{темновой ток квантовой ямы};$$

$S_{пл}$  – площадь барьера квантовой ямы;

$$J_{тем} = q \rho_{3Dтерм} V_{др} - \text{плотность темнового тока};$$

$\rho_{3Dтерм}$  – трехмерная концентрация в барьере КЯ термически активных электронов;

$$\Delta f = \frac{1}{2\tau_{ин}} - \text{ширина полосы детектирования} (\tau_{ин} - \text{время интегрирования}$$

или засветки);

$N$  – количество квантовых ям.

Обнаруживающая способность ФП на множественных квантовых ямах  $D$  (величина, обратная минимальной мощности оптического сигнала) в предположении  $p_c = 1$  [67] не зависит от системы измерения, характеризует материал ФП и рассчитывается следующим образом с учетом (2.37) и (2.38):

$$D = \frac{R}{\sqrt{2(2-p_c)qI_{тем}\Delta f / Np_c}}. \quad (2.39)$$

Формула (2.39) свидетельствует о том, что обнаруживающая способность материала увеличивается пропорционально  $\sqrt{N}$  раз, что является преимуществом полупроводникового материала на квантовых структурах (МКЯ) по сравнению с объемными кристаллами из полупроводников.

Таким образом, для расчета качества сигналов ФП нужна оценка чувствительности (2.37), мощности суммарного шума (2.38).

## 2.4 Оценка приведенной дисперсии суммарной погрешности видеосигналов

Аналитический материал, представленный в параграфах 2.1 – 2.3, касается разработки методик расчета погрешностей фотосенсора и фотоприемника. Эти методики необходимы для оценки критерия качества сигналов на выходе канала передачи информации СИВ в виде приведенной дисперсии суммарной погрешности  $\delta_\varepsilon^2$  (рисунок 2.2).

Значение погрешности  $\delta_\varepsilon^2$  для системы интеллектуального видеонаблюдения, реализованной на базе сети передачи данных с помощью ВОСП, определяется формулой (2.2). Постоянный мониторинг параметров ВОСП, гарантирующий допустимые значения хроматической и поляризационной дисперсий, а также затухания оптического сигнала, позволяет для расчета  $\delta_\varepsilon^2$  ограничиться двумя составляющими  $\delta_{анфс}^2$  и  $\delta_{анфп}^2$  (2.3). Это возможно, так как величина погрешностей, вносимых линией связи, на три порядка меньше ( $P_{ош} \leq 10^{-10}$ ) [36,60,72], чем значения  $\delta_{анфс}^2$  и  $\delta_{анфп}^2$  (параграф 2.1), а именно:  $\delta_\varepsilon^2 \ll (\delta_{фс}^2 + \delta_{фп}^2)$ .

Таким образом, выражение  $\delta_\varepsilon^2$  для видеосигнала зависит, прежде всего, от отношений с/ш на выходах фотоматрицы  $\rho_{выхфм}^2$  (ФС) и фотодетектора  $\rho_{выхфд}^2$  (ФП).

После проведенных исследований в параграфе 2.2 сделан вывод о целесообразности оценки работы ФС для наихудших условий, когда  $\rho_{выхфс}^2 \ll 10^6$  и  $\delta_{анфс}^2 \gg \delta_{кв}^2$ . Таким образом, общий вид формулы  $\delta_\varepsilon^2$  выглядит следующим образом:

$$\delta_\varepsilon^2 \cong \delta_{анфс}^2 + \delta_{анфп}^2. \quad (2.40)$$

На основании выражений (2.28), (2.35), (2.36), (2.40) после преобразований получим следующую расчетную формулу для приведенной дисперсии суммарной погрешности:

$$\delta_{\varepsilon}^2 \cong 6 \left[ \exp\left(-\frac{4,5\rho_{\text{выхфм}}^2}{L_{\text{кв}}^2}\right) + \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi\rho_{\text{выхфд}}^2}} \exp\left(-\frac{\rho_{\text{выхфд}}^2}{8}\right) \right]. \quad (2.41)$$

Отсюда, качество видеосигнала канала передачи информации СИВ  $\delta_{\varepsilon}^2$  определяется количеством уровней квантования  $L_{\text{кв}}$  и отношениями мощностей сигнала и шума на выходе  $\rho_{\text{выхфм}}^2$  ФМ и  $\rho_{\text{выхфд}}^2$  ФД. Величина  $\delta_{\varepsilon}^2$  влияет на эффективность работы устройства распознавания СИВ, а следовательно, на достоверность полученной информации, оцениваемой вероятностями правильного  $P_{\text{прав.обн.}}$  и ложного  $P_{\text{лож.обн.}}$  обнаружений объекта. Вероятность  $P_{\text{прав.обн.}} = f(\delta_{\varepsilon}^2)$  является функцией приведенной дисперсии суммарной погрешности и рассчитывается по критерию Неймана-Пирсона при заданной вероятности ложного обнаружения  $P_{\text{лож.обн.}}$ .

Таким образом, для повышения эффективности СИВ необходимо увеличение качества видеосигнала (уменьшения  $\delta_{\varepsilon}^2$ ). Снижения приведенной дисперсии суммарной погрешности СИВ можно добиться путем уменьшения шумов фотоэлементов (светочувствительного слоя пикселей и фотоприемников). Для этого необходим переход на новую элементную базу нанoeлектроники.

## 2.5 Методика оценки критерия достоверности сигналов видеонаблюдения

Для характеристики эффективности работы системы интеллектуального видеонаблюдения по повышению безопасности движения поездов необходимо дать оценку критерию достоверности видеoinформации с помощью вероятностей правильного  $P_{\text{прав.обн.}}$  и ложного  $P_{\text{лож.обн.}}$  обнаружений опасного объекта. Расчет этих вероятностей можно осуществить с помощью теории обнаружения на примере согласованных фильтров, выполняющих роль устройства распознавания. При отсутствии априорных вероятностей появления обнаруживаемых объектов используют критерий Неймана-Пирсона. Для этого критерия главными параметрами являются отношение мощностей сигнал/шум  $\alpha_{\text{вх}}^2$  на входе

устройства обнаружения, характеризующее энтропию – энтропию  $h_\varepsilon(B)$  (1.1), (1.2), (2.4), а также вероятность  $P_{лож.обн.}$ , характеризующая заданную неточность обнаружения (параграфы 1.2, 1.4) [25].

Параметр  $\alpha_{\text{сх}}^2$  есть величина, обратная приведенной дисперсии суммарной погрешности (2.4), (2.40).

Требуемое значение вероятности ложного обнаружения определено в параграфе 1.3 с помощью функции потерь ( $P_{лож.обн.} \leq 10^{-4}$ ). В настоящее время алгоритмы распознавания обеспечивают вероятность  $P_{лож.обн.} \geq 10^{-3}$  [23].

Таким образом, для использования СИВ в целях повышения безопасности движения поездов необходимо добиться, чтобы оценка критерия достоверности соответствовала требованиям, полученным на основании расчета функции потерь. Для этого прежде всего, необходимо увеличить отношение сигнал/шум  $\alpha_{\text{сх}}^2$  на входе устройства распознавания СИВ.

Повышение отношения мощностей сигнала и шума  $\alpha_{\text{сх}}^2$  на входе устройства обнаружения видеоаналитики СИВ, реализованного например, в виде согласованного фильтра, увеличивает вероятность правильного обнаружения согласно выражению [25]:

$$P_{\text{прав.обн.}} = V\left[\frac{H}{\sqrt{2\alpha_{\text{сх}}^2}} - \sqrt{2\alpha_{\text{сх}}^2}\right], \quad (2.42)$$

где  $V(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-z^2/2} dz$  – табличный интеграл (дополнение к интегралу вероятности),  $H$  – порог обнаружения сигнала.

Из выражения (2.42) видно, что чем больше входное отношение мощностей с/ш  $\alpha_{\text{сх}}^2$ , тем меньше значение аргумента функции  $V[x]$  при  $H = const$ , тем больше значение табличного интеграла и вероятности правильного обнаружения  $P_{\text{прав.обн.}}$ .

Алгоритм вычисления вероятности правильного обнаружения согласно критерию Неймана-Пирсона [25,58] следующий:

1) задается вероятность ложного обнаружения  $P_{лож.обн.}$  в соответствии с возможностями алгоритма распознавания (параметрами видеоаналитики СИБ);

2) по формуле  $P_{лож.обн.} = V\left[\frac{H}{\sqrt{2\alpha_{вх}^2}}\right]$  определяется значение порога  $H$ , величина которого зависит от отношения  $\alpha_{вх}^2$  на входе устройства распознавания, зависящая от отношения  $\rho_{вых}^2$  на выходе канала передачи информации;

3) рассчитывается вероятность правильного обнаружения  $P_{прав.обн.}$  согласно формуле (2.42).

Задача обнаружения объекта заключается в оптимальном выборе порога  $H$  с учетом особенностей алгоритма Неймана-Пирсона.

Особенности заключаются в следующем: для увеличения вероятности  $P_{прав.обн.}$  величину порога  $H$  следует понижать, для снижения вероятности  $P_{лож.обн.}$  величину порога необходимо увеличивать. Решение этой задачи возможно при условии получения минимального количества информации  $h_\varepsilon(B)$  по каналу СИБ.

Отсюда, улучшение качества видеосигнала (уменьшение величины  $\delta_\varepsilon^2 \cong 1/\rho_{вых}^2$ ) непосредственно влияет на эффективность обнаружения опасного объекта и повышает достоверность видеосигналов (рисунок 2.2). Поэтому борьба с внутренними шумами фотоматрицы и фотодетектора и улучшение таким образом качества видеосигнала – главное направление для повышения вероятности правильного обнаружения, снижения вероятности ложного обнаружения и повышения безопасности движения поездов.

## 2.6 Выводы по главе

1. Разработаны методики оценки приведенных дисперсий погрешностей фотосенсора (ФС) и фотоприемника (ФП).

2. Проанализированы значения приведенных дисперсий погрешностей ФС и ФП ( $\delta_{фс}^2$  и  $\delta_{анфп}^2$ ). Анализ показал, что для рабочих значений отношения мощностей с/ш на выходе фотоматрицы ФС и фотодетектора ФП ( $\rho_{выхфм}^2 \geq 10^5$ ,

$\rho_{\text{выхфд}}^2 \geq 65$ ) основной вклад в приведенную дисперсию суммарной погрешности вносят шумы фотоматрицы ( $\delta_{\text{анфс}}^2 \leq 6,26 \cdot 10^{-3}$ ) и фотодетектора ( $\delta_{\text{анфн}}^2 \leq 3,72 \cdot 10^{-5}$ ) ФП. Уменьшение мощности шума фотоматрицы и фотодетектора возможно с помощью новой элементной базы нанoeлектроники.

3. Получена расчетная формула для оценки критерия качества  $\delta_{\varepsilon}^2$ , которая характеризует основные факторы, влияющие на величину искажений видеосигнала.

4. Предложен метод расчета оценки критерия достоверности (вероятности правильного обнаружения  $P_{\text{прав.обн.}}$ ) с помощью алгоритма Неймана-Пирсона. Основными параметрами для расчета являются качество сигнала (величина  $\delta_{\varepsilon}^2$ ) и значение вероятности ложного обнаружения СИБ ( $P_{\text{лож.обн.}}$ ), необходимое для повышения безопасности движения поездов.

## ГЛАВА 3 СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ВИДЕОСИГНАЛОВ В СИСТЕМЕ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

### 3.1 Повышение качества сигналов систем видеонаблюдения с помощью оптоэлектронных устройств нового поколения

Повышение эффективности работы СИБ за счет улучшения качества видеосигналов достигается путем улучшения оптоэлектронных характеристик материалов фотоматрицы ФС и фотодетектора ФП. Как отмечено в главе 2, основным источником искажений для видеосигналов является внутренний шум от темнового тока  $I_{\text{тем}}$ , генерируемого фотоэлементом и являющимся неустраняемым эффектом [67]. В отсутствие полезного сигнала всегда присутствует тепловой шум ( $i_{\text{мен}}^2$ ), возникающий благодаря флуктуациям фотосопротивления материала, и дробовой ( $i_{\text{оп}}^2 \ll i_{\text{мен}}^2$ ), возникающий вследствие дискретной природы электронов. Величина шума определяется структурой материала и такими параметрами, как коэффициент поглощения  $\alpha$ , квантовая эффективность  $\eta$ . Поэтому основным направлением работы по повышению качества сигналов (с/ш) являются исследование влияния  $\alpha$  и  $\eta$  на качество каналов передачи информации и разработка методики оценки повышения с/ш с помощью новых материалов.

В рамках микроэлектроники это означает улучшение внутренней структуры объемных кристаллов (ОК) с линейными размерами более 100 нм. В рамках наноэлектроники, где в основе лежат многослойные полупроводниковые структуры (квантовые ямы), совершенствование материала означает улучшение кристаллической решетки исходных (природных) полупроводниковых элементов. В том и в другом случаях совершенствование свойств материала есть очистка кристаллической решетки полупроводников от дефектов. Эффективным способом устранения дефектов является очистка от тяжелых изотопов, основанная на технологическом процессе обогащения материала.



Наиболее перспективными материалами для ФС и ФП являются структуры на основе квантовых ям (КЯ), а именно: множественные квантовые ямы (МКЯ) и сверхрешетки (СВР). Эти материалы дают качественные преимущества фотосенсорам и фотоприемникам по сравнению с объемными полупроводниковыми кристаллами (ОК).

Эти преимущества заключаются в улучшении обнаруживающей способности  $D$  фотодетекторов (2.12), (2.39) и расширении длинноволновой границы регистрации света  $\lambda_{cp}$  [67]. Так, обнаруживающая способность  $D$  фотоприемника для материала из МКЯ может быть увеличена за счет количества квантовых ям  $N$  (параметр  $D$  растет прямо пропорционально  $\sqrt{N}$ ). Особый интерес представляют квантовые структуры для создания приборов ночного и теплового видения (от 2 до 20  $\mu\text{м}$ ). Для этих целей не существует природных полупроводников с шириной запрещенной зоны порядка 250  $\text{мэВ}$  и менее (диапазон длинного и сверхдлинного инфракрасного излучения) [73]. Эта задача решается с помощью квантово-размерных фотоприемников на МКЯ и СВР. Еще больше увеличить обнаруживающую способность и длинноволновую границу, а также повысить чувствительность, уменьшить темновой ток ФП на МКЯ возможно за счет обогащения исходных полупроводников (улучшения оптоэлектронных характеристик материала). Это уменьшает количество дефектов кристаллической решетки и значительно повышает коэффициент поглощения, квантовую эффективность и др. На рисунке 3.1 представлены материалы оптоэлектроники, рассмотренные в работе.



Рисунок 3.1 – Материалы оптоэлектроники на основе ОК и КЯ

Таким образом, улучшение свойств материала для повышения с/ш на выходе канала передачи информации СИВ осуществляется поэтапно:

- 1) в рамках микроэлектроники выращивание объемных кристаллов из обогащенных полупроводников;
- 2) переход от микроэлектроники к наноэлектронике (наноструктурированному материалу в виде множественных квантовых ям МКЯ и СВР);
- 3) использование для изготовления МКЯ и СВР обогащенных полупроводников.

Таким образом, на первом этапе обогащение полупроводниковых объемных кристаллов повышает коэффициент поглощения света  $\alpha$  и квантовую эффективность  $\eta$  материала. На втором этапе переход к квантовым структурам улучшается обнаруживающая способность  $D$  по сравнению с объемными кристаллами. На третьем этапе использование обогащенных полупроводников для квантовых ям, помимо увеличения параметров  $\alpha$ ,  $\eta$  материала, еще больше повышает обнаруживающую способность фотоприемника.

### **3.2 Методика проектирования материала на квантовых структурах**

Для оценки эффективности материала на МКЯ из обогащенных полупроводников нужны исследования влияния оптоэлектронных характеристик квантовых ям на параметры ФС и ФП и качество сигналов с/ш. Для этого используется аналитическая модель, описывающая поведение носителей заряда в квантовых структурах. В основе модели лежит дифференциальное уравнение второго порядка (уравнение Шредингера) [73]. Решение поставленной исследовательской задачи осуществляется путем математического моделирования с использованием численных методов [74].

На первом этапе анализируются процессы в более простой полупроводниковой структуре в виде одиночной квантовой ямы КЯ.

Квантовая яма представляет из себя трехслойную структуру толщиной не более 100 нм, например, из арсенида галлия  $GaAs$  (яма) и алюмината арсенида

галлия  $Al_xGa_{1-x}As$  с более широкой запрещенной зоной (барьеры). Индекс  $x$  в химической формуле есть доля атомов галлия, замещенных атомами алюминия, обычно изменяющаяся в пределах от 0,15 до 0,35. Как отмечено выше, наиболее разработанным методом исследования оптоэлектронных характеристик КЯ является математическое моделирование уравнения Шредингера, описывающее волновые функции электронов в квантовой яме. Квантовые ямы, исследуемые в главе 3, лежат в основе таких квантовых структур, как множественные квантовые ямы (МКЯ) и сверхрешетки (СВР), которые успешно используются в качестве материала для полупроводниковых лазеров, фотоприемников, оптических модуляторов [73]. Особенность материала на основе МКЯ (рисунок 3.1, рисунок 3.2), состоящего из нескольких десятков квантовых ям, состоит в том, что квантовые ямы функционируют независимо друг от друга. Это объясняется тем, что ширина потенциальных барьеров в КЯ гораздо больше ширины ямы. Этот факт уменьшает вероятности проникновения волновых функций носителей заряда (например, электронов) в соседние ямы. Поэтому результаты математического моделирования волновых процессов в одной квантовой яме, позволяют прогнозировать характеристики всего материала на МКЯ.

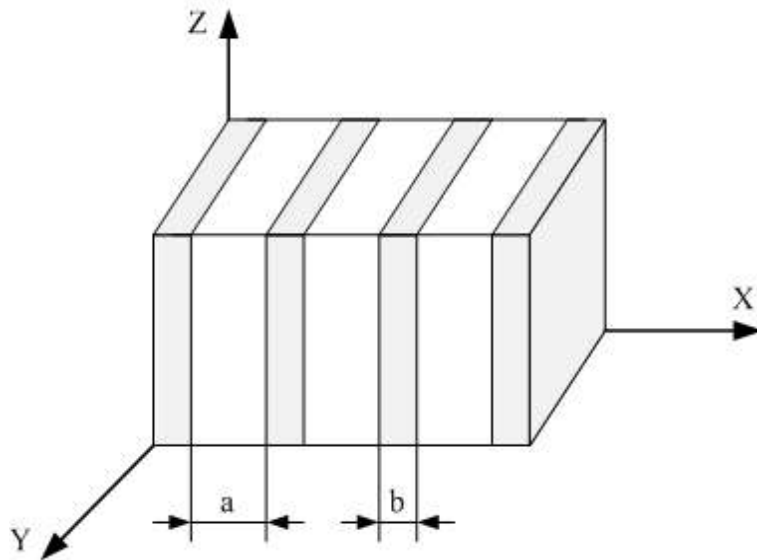


Рисунок 3.2 – Сверхрешетки (МКЯ) из арсенида галлия

$a$  – квантовая яма  $GaAs$  ;  $b$  – барьер  $Al_x Ga_{1-x} As$

В отличие от МКЯ в материалах на основе СВР, также состоящих из множества квантовых ям, ширина барьеров меньше или равна ширине ямы. В этом случае волновые функции электронов (или дырок) проникают сквозь барьеры соседних ям, что отражается на характере распределения энергетических уровней (зон) в квантовой структуре. Создается возможность проектирования новых полупроводниковых материалов с заранее заданными характеристиками.

Квантовая структура из арсенида галлия, покрытая с двух сторон пленкой из алюмината арсенида галлия, представляет из себя квантовую яму с величиной потенциального барьера  $V$ , равной разнице между запрещенными зонами барьеров  $E_{g1} = 2$  эВ и ямы  $E_{g2} = 1,4$  эВ (для  $x = 0,3$ ). Так, для электронов величина потенциального барьера равна  $V_{эл} = 0,4$  эВ, для дырок  $V_{д} = 0,2$  эВ [73].

Если энергии частицы  $E$  (например, электрона) меньше глубина ямы  $V$ , т.е.  $E < V_{эл}$ , то электроны удерживаются (локализуются) внутри ямы. Если выполняется условие  $E > V_{эл}$ , то электроны могут свободно перемещаться по структуре в направлении, перпендикулярном слоям квантовой ямы.

С помощью математического моделирования можно проектировать новые материалы с требуемыми оптоэлектронными характеристиками путем изменений ширины ямы, эффективной массы частицы (электрона или дырки), величины запрещенной зоны. Эффективная масса частицы определяется не только химическим элементом, но и количеством дефектов в кристаллической решетке, которое зависит от технологий производства, концентрации посторонних примесей в материале. Одним из главных источников дефектов являются тяжелые изотопы исходных химических элементов, концентрация которых значительно влияет на оптоэлектронные свойства материала [75,76].

В результате математического моделирования определяются волновые функции носителей заряда и величины разрешенных энергетических уровней в МКЯ и СВР. Эти энергетические характеристики материала позволяют оценить длинноволновую границу фотоэффекта  $\lambda_{сп}$ , коэффициент поглощения света  $\alpha$ , квантовую эффективность  $\eta$  проектируемого материала, а также чувствительность

$R$ , величину темнового тока  $I_{тем}$ , обнаруживающую способность  $D$  фотоприемника.

Так, определение волновых функций и разрешенных значений энергии квантования частицы  $E$  в многослойной структуре с периодическим изменением электрического потенциала осуществляется на основании стационарного уравнения Шредингера. Это есть формальная модель волнового процесса в виде дифференциального уравнения второго порядка [73]:

$$-\frac{\hbar^2 d^2 \psi(x)}{2m dx^2} + V_j \psi(x) = E \psi(x), \quad (3.1)$$

где  $\psi(x)$  - волновая функция частицы;

$\hbar = h / 2\pi$  - постоянная Планка ( $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$  Дж·с);

$m$  - масса частицы;

$V_j$  - высота потенциального барьера в  $j$ -той квантовой яме;

$E$  - энергия частицы.

Характеристикой  $j$ -того слоя КЯ,  $1 \leq j \leq n$ , является величина:

$$q_j = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} (V_j - E)}. \quad (3.2)$$

Решения уравнения (3.1) в разных слоях квантовой ямы представляют из себя линейные комбинации экспонент, либо синусоидальных функций. При этом решения в соседних слоях квантовых структур «сшиваются», исходя из условия непрерывности волновой функции  $\psi(x)$  и ее производной. Причем крайние слои считаются бесконечно протяженными, в которых волновая функция убывает по экспоненциальному закону. В результате получается система из четырех уравнений, которая преобразуется в дисперсионное уравнение [77]. Решение дисперсионного уравнения численным методом для КЯ из арсенида галлия с помощью программы Mathcad приведено в приложении А.

Результаты моделирования волновых функций носителей заряда в одиночной квантовой яме на основе имитационной модели в виде уравнения Шредингера позволяют судить о свойствах материала из множественных

квантовых ям ввиду того, что все КЯ изолированы друг от друга. Обнаруживающую способность  $D$  материала из МКЯ можно повысить благодаря тому, что величина  $D$  пропорциональна количеству  $N$  квантовых ям.

В основе аналогичных исследований материала на сверхрешетках СВР и поиска волновых функций лежит модель Кронига-Пенни [73]. В этом случае для описания системы уравнений и определения волновых функций носителей заряда (электронов) применяются функции Блоха. С помощью этих функций система уравнений преобразуется в трансцендентное уравнение, которое решается численным методом с помощью программного обеспечения Mathcad, Delphi (приложение Б). Исследование оптоэлектронных характеристик материала на МКЯ и СВР позволит оценить влияние материала на качество сигналов фотосенсора и фотоприемника и всего канала передачи информации СИВ.

### 3.3 Исследование влияния материала из квантовых ям на параметры фотоприемника с помощью математического моделирования

Для исследования влияния оптоэлектронных характеристик материала фотоприемника из МКЯ на качество сигнала (с/ш) необходимо исследовать особенности распределения энергетических уровней в одиночной квантовой яме конечной глубины с конечными барьерами с помощью математического моделирования уравнения Шредингера [77]. Для решения дифференциального уравнения (3.1) и нахождения волновых функций составляется система в виде линейных комбинаций уравнений и их производных, в основе которых уравнения следующего вида [73] (рисунок 3.2):

$$\psi(x) = A_1 e^{-qx} \quad (\text{в барьере квантовой ямы для } x > a/2, a - \text{ ширина ямы}); \quad (3.3)$$

$$\psi(x) = A_2 e^{qx} \quad (\text{в барьере квантовой ямы для } x < -a/2); \quad (3.4)$$

$$\psi(x) = B_1 \text{Cos}(hx) + B_2 \text{Sin}(hx) \quad (\text{в квантовой яме для } -a/2 < x < a/2). \quad (3.5)$$

При составлении системы уравнений учитывается, что волновые функции  $\psi(x)$  и их производные должны быть непрерывными на границах ямы и барьеров.

Параметры уравнений (3.3-3.5) с учетом выражений (3.1-3.2) имеют следующие значения при условии, что эффективная масса электрона приблизительно одинаковая в яме и за ее пределами:

$$q = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}(V_j - E)}, \quad h = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}. \quad (3.6)$$

В результате преобразований системы уравнений с учетом формулы (3.6) получается дисперсионное уравнение, которое имеет вид [77]:

$$\operatorname{tg}(ha) = \frac{2qh}{h^2 - q^2}. \quad (3.7)$$

Решение трансцендентного уравнения (3.7) возможно с помощью численных методов и компьютерных программ, например, Mathcad (приложение А).

Вначале отыскиваются корни системы уравнений (нули), затем волновые функции  $\psi(x)$ . Пример графического метода отыскания нулей дисперсионного уравнения приведен в приложении А. Распределение разрешенных энергетических уровней в КЯ изображено на рисунке 3.3.

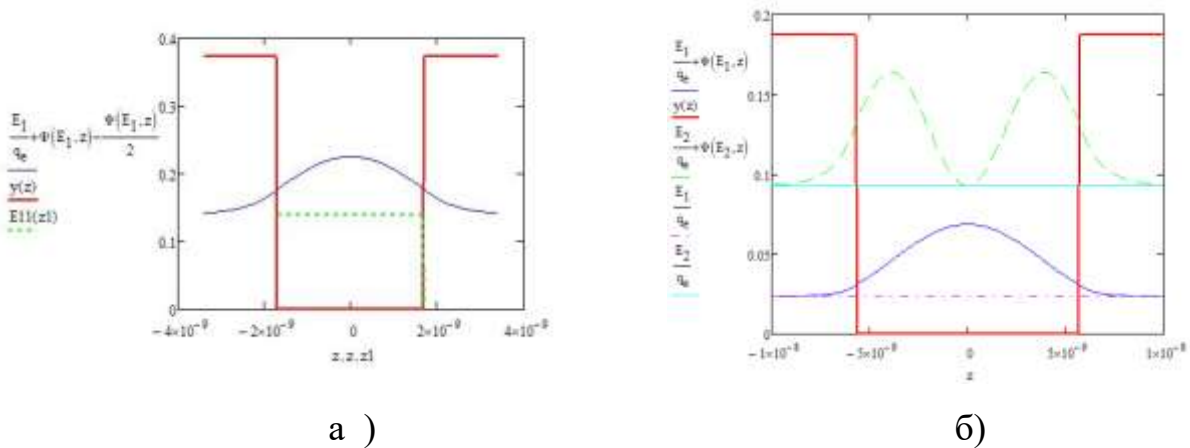


Рисунок 3.3 – Распределение разрешенных энергетических уровней в прямоугольной КЯ из *GaAs*

а – с одним уровнем квантования; б – с двумя уровнями квантования

Количество и расположение энергетических уровней в КЯ, определяющих работу квантово-размерного фотоприемника на МКЯ, зависят от ширины квантовой ямы и характеристик исходных полупроводников. Единственный энергетический уровень в КЯ, представленный на рисунке 3.3а и полученный в результате моделирования, необходим для регистрации фотонов с длиной волны,

соответствующей разнице между зоной проводимости барьеров и уровнем квантования.

Электроны в результате фотоэффекта переходят из связанного состояния квантовых ям в зону проводимости (рисунок 3.4 [67]).

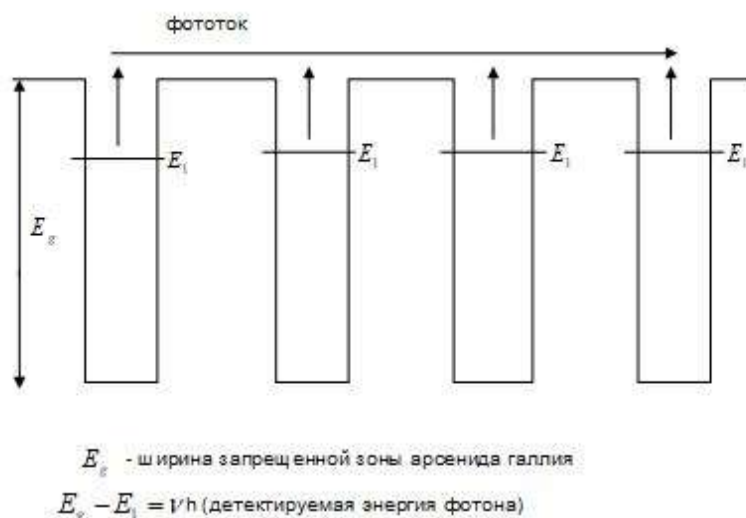


Рисунок 3.4 – Квантово-размерный фотоприемник с одним уровнем квантования

На рисунке 3.5 представлен вариант квантово-размерного ФП, который регистрирует фотоны с длиной волны, соответствующей разнице между уровнями квантования  $E_1$  и  $E_2$ . Причем верхний уровень должен как можно ближе располагаться к краю ямы (рисунок 3.5) [67].

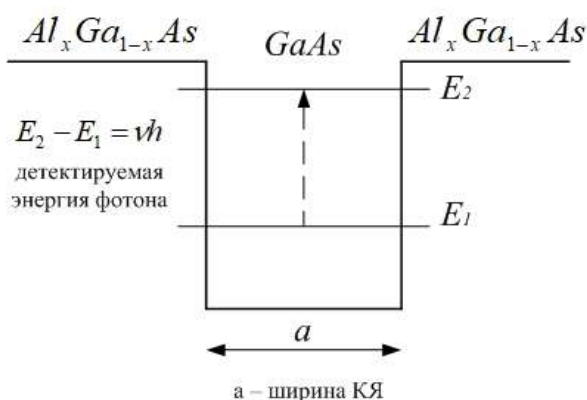


Рисунок 3.5 – Квантовая яма ФП с переходом электронов между уровнями квантования  $E_1$  и  $E_2$

Квантово-размерный ФП из арсенида галлия (наиболее распространенного материала для наноструктур, представляющего из себя твердый раствор в виде сочетания арсенида галлия  $GaAs$  (яма) и алюмината арсенида галлия  $Al_x Ga_{1-x} As$



(барьеры). Параметр  $x$ , означающий долю замещенных атомов галлия атомами алюминия, принимает значения от 0 до 1. Постоянная кристаллической решетки ( $a \approx 0,554$  нм) этих полупроводниковых материалов, вычисляемая по формуле  $xa_{AlAs} + (1-x)a_{GaAs}$ , меняется не более, чем на 15%. Это свидетельствует о структурной совместимости и отсутствии практически напряжений в кристаллической решетке, что очень важно для создания наноструктур [78].

Ширина квантовой ямы имеет порядок 4 нм, ширина барьеров – 30 нм. Такие размеры квантовых ям позволяют значительно уменьшить вероятность туннелирования электронов сквозь барьеры. При этом важно также добиться, чтобы энергетический уровень  $E_1$  значительно отстоял от верхнего края ямы. Выполнение таких условий позволит снизить на порядок темновой ток по сравнению с объемными кристаллами. [59].

Модель фотоприемника с одним уровнем квантования (рисунок 3.3а) позволяет расширить диапазон спектра поглощения света по сравнению с моделью межзонного поглощения [59,67] (рисунок 3.3б).

Таким образом, изменяя параметры полупроводниковых материалов квантовой ямы и барьера ( $m_{эф}$ ;  $E_1$ ;  $E_2$ ), а также ширину ямы, можно изменять число энергетических уровней и расположение уровней. Это важно для проектирования квантово-размерных фотоприемников, где необходимо получить материалы на основе МКЯ с одним или несколькими энергетическими уровнями, расположенным на определенном расстоянии от границы зоны проводимости или друг от друга. Расположение уровней квантования определяет важную оптоэлектронную характеристику ФП, а именно: длинноволновую границу фотоэффекта  $\lambda_{зр}$ , определяющую возможности регистрации света и диапазон детектируемых длин волн.

### 3.4 Исследование влияния характеристик сверхрешеток на параметры беспроводного оптического канала связи с помощью математического моделирования

Огромные возможности беспроводных оптических каналов связи, отмеченные в параграфах 1.5 – 1.6, могут быть реализованы в, так называемых, «атмосферных окнах» (рисунок 1.15). Наиболее перспективные атмосферные окна располагаются в диапазоне длин волн от 8 до 13 мкм [79].

Явление обусловлено, в основном, воздействием молекулярного поглощения атмосферы. Поглощение ИК-излучения на многих участках спектра практически полное. Поэтому говорят о прохождении ИК-излучения в атмосфере только в некоторых окнах прозрачности.

"Окнам" соответствуют интервалы длин ИК-излучения:

$\lambda=0,95 - 1,05$  мкм;  
 $\lambda=1,15 - 1,35$  мкм;  
 $\lambda=1,5 - 1,8$  мкм;  
 $\lambda=2,1 - 2,4$  мкм;  
 $\lambda=3,3 - 4,2$  мкм;  
 $\lambda=4,5 - 5,1$  мкм;  
 $\lambda=8 - 13$  мкм.

$$E_g \text{ (эВ)} = \frac{1,24}{\lambda \text{ (мкм)}}$$

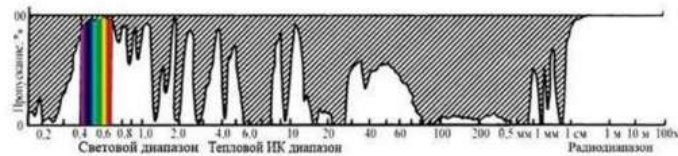


Рисунок 3.6 – Спектр пропускания земной атмосферы [79]

Для разработки квантово-размерных фотоприемников в сверхдлинном инфракрасном диапазоне, для которого не существует природных полупроводников, требуется материал, имеющий очень узкую ширину запрещенной зоны ( $\leq 250$  мэВ). Такой полупроводниковый материал можно создать искусственно с помощью модели сверхрешетки СВР. Модель СВР отличается от модели МКЯ шириной барьеров, которая соизмерима с шириной квантовой ямы. В этом случае происходит образование узких энергетических щелей в запрещенной зоне барьеров квантовых ям, которые используются для фотоэффекта. Для создания оптоэлектронных устройств беспроводных оптических каналов в заданном диапазоне инфракрасных длин волн с использованием СВР необходимо разработать методику проектирования такого материала. В основе методики лежат исследования волновых процессов

носителей заряда в многослойной наноструктуре, которой является сверхрешетка.

Для описания волновых процессов внутри СВР с бесконечным числом слоев и периодом много большим постоянной кристаллической решетки исходного полупроводника используют модель Кронига-Пенни [73]. Согласно этой модели носители заряда (электроны) внутри сверхрешетки с бесконечным числом слоев двигаются в периодическом потенциале из строго прямоугольных ям по аналогии с моделью кристаллической решетки вещества. Такой упрощенный подход позволяет получить много интересных результатов, касающихся расщепления энергетических зон и изменения оптоэлектронных характеристик исходных полупроводников [73]. В этом случае принимается концепция бесконечно большого числа периодов решетки. Так, для сверхрешетки с одинаковым потенциальным барьером  $V$ , эффективной массой  $m_{эф}$  и энергией  $E$  частицы (как внутри ямы шириной  $a$ , так и вне ямы) составляется система уравнений для определения волновых функций  $\psi(x)$ . С учетом эффектов туннелирования волновых функций  $\psi(x)$  внутрь энергетических барьеров получим следующие выражения:

$$\begin{aligned}\psi(x) &= Ae^{i\alpha x} + Be^{-i\alpha x} \text{ (внутри ямы),} \\ \psi(x) &= Ce^{qx} + De^{-qx} \text{ (вне ямы),}\end{aligned}\tag{3.8}$$

$$\text{где } \alpha^2 = \frac{2m_{эф}E}{\hbar^2};$$

$$q^2 = \frac{2m_{эф}(V-E)}{\hbar^2}.$$

Из условия непрерывности волновых функций и их производных при  $x = 0, a$ , где  $a$  – ширина КЯ (начало координат отсчитывается от левого края квантовой ямы, как представлено на рисунке 3.7) после несложных преобразований с учетом (3.8) имеем уравнения:

$$A + B = C + D; i\alpha(A - B) = q(C - D).\tag{3.9}$$

Согласно теореме Блоха волновые функции в квантовых ямах могут быть связаны следующим образом [73]:

$$\psi(a) = \psi(-b)e^{ik(a+b)}, \quad (3.10)$$

где:  $b$  – ширина потенциального барьера;

$k$  – волновой вектор блоховской функции.

Отсюда, выражения для определения коэффициентов волновых функций согласно формуле (3.10) можно переписать так:

$$\begin{aligned} Ae^{i\alpha a} + Be^{-i\alpha a} &= (Ce^{qx} + De^{-qb})e^{ik(a+b)}, \\ i\alpha(Ae^{i\alpha a} - Be^{-i\alpha a}) &= q(Ce^{qb} - De^{-qb})e^{ik(a+b)}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Таким образом, на основании (3.11) получаем систему четырех уравнений, в результате преобразования которой имеем дисперсионное уравнение вида:

$$\frac{q^2 - \alpha^2}{2q\alpha} sh(qb) \sin(\alpha a) + ch(qb) \cos(\alpha a) = \cos kd, \quad (3.12)$$

где  $d = a + b$  – период СВР;

Так как косинус в правой части уравнения (3.12) может принимать значения в интервале от -1 до +1, то все значения левой части уравнения, которые будут больше этого интервала, попадут в запрещенные зоны.

Таким образом, зависимость энергетических уровней от параметров квантовых ям представляет из себя чередование разрешенных и запрещенных зон.

Алгоритм решения и результаты математического моделирования дисперсионного уравнения для СВР на арсениде галлия в программах Mathcad, Delphi представлены в приложении Б.

Примеры решения дисперсионного уравнения (3.12) для твердых растворов из арсенида галлия и электронов с разной эффективной массой при условии  $a=b$  изображены на рисунке 3.7 (а,б).

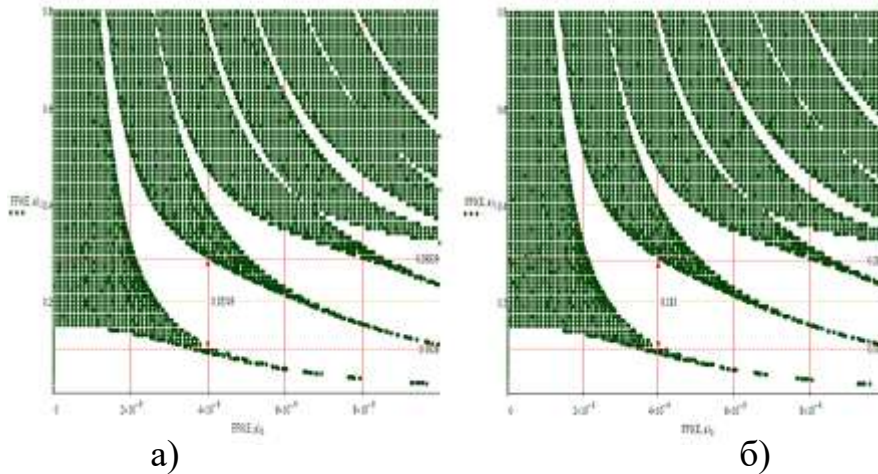


Рисунок 3.7 – Энергетические уровни СВР из арсенида галлия для  $x = 0,24$ :  
 а – без очистки от изотопа  $^{71}\text{Ga}$  ( $m_{\text{эф}} = 0,067m_0$ ,  $V_j = 0,3 \text{ эВ}$ ); б – с очисткой от  $^{71}\text{Ga}$   
 ( $m_{\text{эф}} = 0,067m_0 / 2$ ,  $V_j = 0,34 \text{ эВ}$ )

Энергетические уровни на рисунке 3.7а построены для полупроводниковых материалов из арсенида галлия ( $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ ) со значительной высотой потенциального барьера ( $0,3 \text{ эВ}$ ) и с усредненной эффективной массой электрона, одинаковой шириной ям  $a$  и барьеров  $b$ ,  $m_{\text{эф}} = 0,067m_0$  ( $m_0$  - масса электрона в вакууме) для  $a = b$ ,  $x = 0,24$ . Особенностью твердого раствора  $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$  с частичным замещением атомов галлия алюминием являются зависимости эффективной массы электрона  $m_{\text{эф}}(x) = (0,067 + 0,083x)m_0$  ( $\text{эВ}$ ), ширины запрещенной зоны  $E_g(x) = 1,424 + 1,247x$  ( $x < 0,45 \text{ эВ}$ ) и постоянной кристаллической решетки  $a(x) = 0,56533 + 0,00078x$  ( $\text{нм}$ ) от параметра  $x$  ( $x$  - доли замещенных атомов галлия атомами алюминия) [77]. Таким образом, исходными параметрами материала в виде твердого раствора на основе арсенида галлия, использованными для математического моделирования, являются эффективная масса электрона  $m_{\text{эф}}(x)$  в  $\text{эВ}$  (в  $\Gamma$ -минимуме зоны Бриллюэна), ширина запрещенной зоны  $E_g(x)$  в  $\text{эВ}$  и постоянная кристаллической решетки  $a(x)$  в  $\text{нм}$  [76].

Как отмечено выше, характерная особенность сверхрешеток – расщепление энергетических уровней носителей заряда (электронов) и превращение их в зоны (разрешенные и запрещенные), представлена на рисунке 3.7. Исследования энергетических характеристик СВР показывают, что изменения ширины

квантовых ям и барьеров, а также величина запрещенной зоны, значения эффективной массы электрона влияют на положение и ширину мини-зон проводимости и ширину щелей  $\Delta E_{щ}$ .

Таким образом, для материалов на основе СВР можно получить необходимую ширину мини-зоны (проводимости) или энергетической щели  $\Delta E_{щ}$  (аналога запрещенной зоны). Возможность проектирования оптоэлектронных устройств с требуемыми параметрами (например, длинноволновой границей фотоэффекта  $\lambda_{сп}$ , величиной темнового тока  $I_{тем}$ , чувствительностью  $R$  и т.д.) необходима для создания беспроводного оптического канала связи БОКС, работающего в сверхдлинном инфракрасном диапазоне. Технические параметры БОКС можно повысить за счет использования обогащенных полупроводников. Оптоэлектронные характеристики полупроводникового материала зависят не только от химических элементов, но и от изотопического состава. Снижение концентрации тяжелых изотопов в исходных элементах (операция обогащения) улучшает оптоэлектронные характеристики материала. Применение обогащенных полупроводников увеличивает дальность связи за счет повышения чувствительности ФП и оптического бюджета (разницы уровней по мощности на выходе полупроводникового лазера и входе фотоприемника), а также расширяет диапазон рабочих длин волн (роста значения  $\lambda_{сп}$ ). Это происходит, прежде всего, за счет снижения количества дефектов кристаллической решетки и, как следствие, уменьшения ширины  $E_g$  и массы электрона  $m_{эф}$ .

Так, уменьшение концентрации изотопа галлия  $^{71}Ga$  на порядок приводит к уменьшению эффективной массы электрона в два раза ( $m_{эф} = \frac{0,067m_0}{2}$ ) и повышению потенциального барьера ( $V = 0,34$  эВ) за счет уменьшения ширины запрещенной зоны ямы на 0,06 эВ (рисунок 3.7б). Это увеличивает быстродействие и снижает инерционность исходного материала, что проявляется в изменениях ширины энергетических щелей СВР и величины длинноволновой границы света  $\lambda_{сп}$ .

Так, в результате обогащения арсенида галлия СВР ширина энергетических щелей уменьшается и повышается длинноволновая граница света  $\lambda_{zp}$  (расширяется диапазон фотоэффекта) (рисунок 3.7б). С увеличением размеров КЯ энергетические зоны сужаются и превращаются в уровни квантования (рисунок 3.7а,б).

На рисунке 3.8 представлены графики зависимости ширины щелей  $\Delta E_{щ}$  СВР от размеров КЯ ( $a = b$ ) для материалов: арсенида галлия с естественной концентрации арсенида галлия и с обогащением.

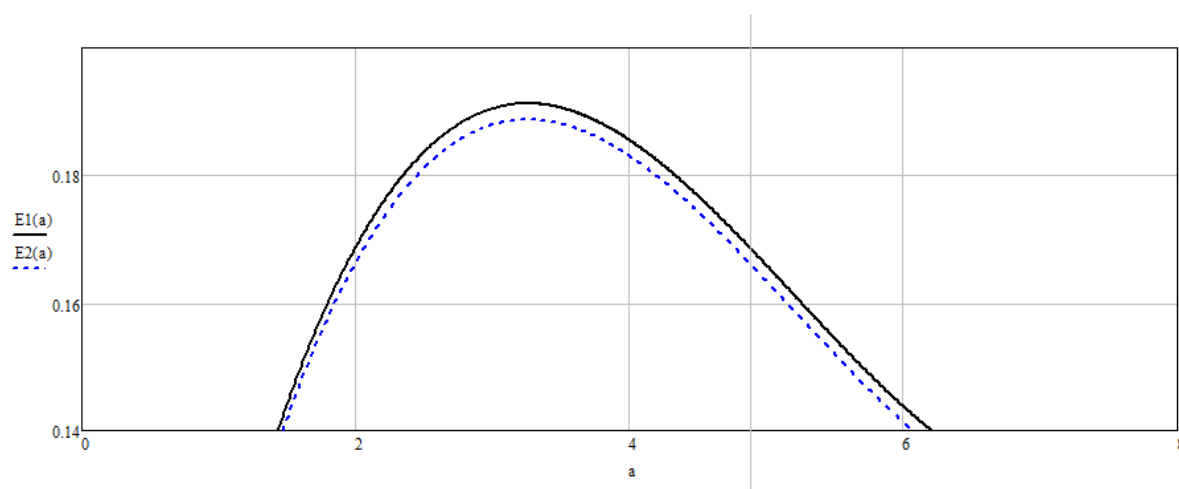


Рисунок 3.8 – Зависимости ширины щелей  $\Delta E_{щ}$  СВР от размеров КЯ

Как видно из рисунка 3.8, при одних и тех же размерах квантовых ям в сверхрешетках из обогащенных полупроводников по сравнению с исходными материалами происходит сужение энергетических зон ( $\Delta E_{щ}$ ) и расширение диапазона фотоэффекта. Так, для  $b = 5$  нм первая энергетическая щель  $\Delta E_{щ}$  уменьшается на 2,5 мэВ, значение  $\lambda_{zp}$  увеличивается на 0,1 мкм. Повышение значения  $\lambda_{zp}$  означает возможность фиксации низкоэнергетических фотонов. Это важно для видеокамер, работающих в темное время суток, а также для организации беспроводных оптических каналов связи БОКС в перспективном атмосферном окне сверхдлинного инфракрасного диапазона (8–13 мкм). Кроме того, уменьшение темнового тока после обогащения материала приводит к повышению обнаруживающей способности полупроводников и улучшению качества канала передачи информации СИВ.

Таким образом, улучшая структуру исходных полупроводников, можно создавать новые материалы из СВР со сверхмалыми размерами энергетических щелей, необходимыми для создания оптоэлектронных устройств (фотосенсоров, фотоприемников, лазеров и т.д.) нового поколения.

### **3.5 Исследование повышения качественных характеристик фотодетекторов за счет нового полупроводникового материала**

Создание новых полупроводниковых материалов с улучшенными оптоэлектронными характеристиками весьма актуальная задача, которая связана с повышением эффективности оптоэлектронных устройств, например, фотодетекторов, лежащих в основе ФС и ФП. Оптоэлектронные устройства на новых материалах востребованы не только в телекоммуникационных системах, использующих инфракрасный диапазон длин волн (ВОСП, БОКС), но и в системах обеспечения безопасности, энергосберегающих технологиях, медицине и т.д. Одним из инновационных путей улучшения свойств материала и создание новых материалов является изотопическая очистка исходных полупроводников от дефектов в виде тяжелых изотопов. Несмотря на то, что собственные изотопы химического элемента близки по химическому составу (одинаковая электронная оболочка) и значениям постоянной кристаллической решетки, они имеют разную массу ядер (разное количество нейтронов в ядре). Разница в массе ядер обуславливает изотопический эффект. Он проявляется в отличиях физических свойств (магнитных, теплопроводности, электропроводности, в различиях спинов ядер и т.д.). Существуют отличия и в оптоэлектронных характеристиках для разных изотопов одного и того же химического элемента: в спектрах комбинационного рассеяния (разнице в расположении оптической продольной моды), ширине запрещенной зоны, коэффициентах преломления, поглощения, эффективной массе электрона и т.д. [80].

Для получения изотопически однородного (обогащенного) материала требуется процедура очистки (сепарации изотопов). В основе изотопической очистки исходных материалов от тяжелых изотопов лежит процесс разделения



изотопов на основе различных физико-технологических принципах, например, газового центрифугирования [81].

Известно, что очистка естественного кремния от тяжелых изотопов  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{30}\text{Si}$  позволила в свое время компаниям по производству микропроцессоров на изотопе  $^{28}\text{Si}$  повысить их быстродействие вдвое (до 3ГГц) [80,82,83] за счет уменьшения числа каналов рассеяния электронов на дефектах кристаллической решетки. Полученный эффект очистки кремния от тяжелых изотопов позволяет рассчитывать на такой же результат после очистки других полупроводников, распространенных в электронике, и добиться повышения технического уровня оптоэлектронных устройств (фотосенсоров, фотоприемников).

Так, изотопическая очистка материала из арсенида галлия от тяжелого изотопа  $^{71}\text{Ga}$  улучшит чувствительность фотоприемников за счет повышения квантовой эффективности, уменьшит тепловые шумы за счет уменьшения числа локальных уровней в запрещенной зоне и количества свободных электронов. Отсюда, повысится отношение мощностей с/ш на выходе фотоприемников. При этом уменьшение ширины запрещенной зоны увеличит возможности фотоэффекта для фотоприемников, которые смогут улавливать низкоэнергетические («темные») фотоны. Известно, что обогащенный материал обладает меньшей инерционностью, что способствует повышаю быстродействию полупроводниковых приборов. Это происходит за счет уменьшения эффективной массы электрона  $m_{эф}$  [84,85].

Как показано ниже, уменьшение концентрации на порядок тяжелого изотопа галлия  $^{71}\text{Ga}$ , снижает эффективную массу электрона  $m_{эф}$  вдвое и ширину запрещенной зоны  $E_g$  на величину 0,06 эВ.

Как отмечено выше, тяжелые изотопы можно рассматривать как дефекты кристаллической решетки, которые значительно влияют на электрические, оптические и механические свойства материала. Такие дефекты могут образоваться на поверхности и в объеме кристалла. Они классифицируются как примеси (посторонние атомы) [86].

Проанализируем влияние концентрации изотопа галлия  $^{71}\text{Ga}$  на подвижность, эффективную массу и ширину запрещенной зоны в кристалле арсенида галлия. В фотоприемнике под действием электрического поля согласно классической теории электропроводности [86] на заряд (электрон) действует сила  $F = qE^*$  ( $q; E^*$  – соответственно заряд электрона и напряженность электрического поля), которая сообщает ему ускорение  $a^* = \frac{F}{m_e}$ . Равноускоренное движение электрона заканчивается столкновением с дефектом (реальная кристаллическая решетка всегда содержит дефекты). При этом приобретенная скорость в направлении электрического поля падает практически до нуля, затем опять начинается ускорение электрона. Цикл «ускорение – рассеяние» повторяется снова и много раз. Среднее расстояние, пролетаемое электроном от столкновения до столкновения, называется длиной свободного пробега, а средняя скорость электрона – дрейфовой скоростью, которая много меньше тепловой скорости.

Для кристаллов кремния известно, что после очистки от тяжелых изотопов  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{30}\text{Si}$  которые составляют 8% всех атомов (72% -  $^{28}\text{Si}$ ), подвижность электронов повысилась в два раза.

Для естественного галлия, который состоит из двух изотопов ( $^{69}\text{Ga} - 60,1\%$ ;  $^{71}\text{Ga} - 39,9\%$ ), очистка кристалла от более тяжелого изотопа  $^{71}\text{Ga}$  также повысит подвижность электронов не менее, чем в два раза. С учетом того, что галлий легче кремния (отношение эффективных масс электронов  $\frac{m_{эфSi}}{m_{эфGa}} = \frac{0,19m_0}{0,067m_0} = 2,84$ ), можно ожидать еще большего эффекта от изотопической очистки галлия. В качестве подтверждения этой версии можно отметить, что количество циклов «ускорение – рассеяние» у галлия больше по сравнению с кремнием. Так, в случае кремния столкновения с тяжелым изотопом происходят в среднем через каждые 9 атомов ( $(72\% / 8\%) = 1/9$ ), для галлия – через каждые  $\approx 2$  атома, т.е. чаще (следовательно, уменьшение концентрации изотопа  $^{71}\text{Ga}$  даст больший эффект). В общем случае точные цифры повышения подвижности

носителей заряда (электронов и дырок) после очистки от тяжелого изотопа  $^{71}\text{Ga}$  кристалла галлия может дать только научный эксперимент.

Степень изменений эффективной массы электрона и ширины запрещенной зоны полупроводника после обогащения галлия можно оценить по экспериментальным данным, опубликованным в [87], где представлены исследования изменений  $m_{эф}$  и  $E_g$  в зависимости от количества дефектов (легирующих атомов). Так, согласно результатам исследований, изложенным в [87], значение эффективной массы электрона в арсениде галлия после снижения на порядок концентрации изотопа  $^{71}\text{Ga}$  уменьшится в два раза, т.е. составит величину  $\frac{0,067m_0}{2}$  (эВ), значение запрещенной зоны уменьшится на 0,06 эВ, т.е. составит величину  $(1,424 - 0,06 = 1,364)$  эВ.

Изменения оптоэлектронных характеристик арсенида галлия после операции обогащения, в результате которой концентрация тяжелого изотопа галлия уменьшается  $^{71}\text{Ga} \approx 4\%$ , учтены при моделировании СВР (рисунок 3.7б, параграф 3.4).

В результате обогащения исходного полупроводника распределение энергетических зон в структуре сверхрешеток СВР отличается от исходной (рисунок 3.7а). Это проявляется в уменьшении ширины первой энергетической щели на 2,5 мэВ (рисунок 3.8) и увеличении длинноволновой границы фотоэффекта  $\lambda_{зр}$  на 0,1 мкм. С помощью обогащенных СВР можно проектировать новые полупроводниковые материалы для фотоприемников БОКС сверхдлинного инфракрасного диапазона (в атмосферном окне с длиной волны света от 8 до 13 мкм), которые невозможно создать на основе естественных полупроводников. Ширина щели  $\Delta E_{щ} \leq 0,155$  эВ соответствует атмосферному окну (8-13) мкм. Приращение  $\lambda_{зр}$  на 0,1 мкм уменьшает поглощение оптического сигнала на порядок (рисунок 3.6), а следовательно, увеличить оптический бюджет БОКС. Это увеличение можно «потратить» на повышение качества сигналов или дальности канала, организованного с помощью беспроводных оптических каналов БОКС для связи с подвижными объектами.

Таким образом, применение нового материала для фотодетекторов ФС и ФП значительно повысит качество канала передачи информации СИВ. В первую очередь это произойдет за счет улучшения квантовой эффективности материала и чувствительности фотодетектора (ФД).

Одной из главных характеристик материала пикселя фотоматрицы и фотодетектора ФП является зависимость квантовой эффективности  $\eta$  от коэффициента поглощения  $\alpha$ . Квантовая эффективность характеризует способность материала преобразовывать поток фотонов в поток носителей заряда. Квантовая эффективность оценивается следующей формулой [67]:

$$\eta = 1 - e^{-\alpha d}, \quad (3.13)$$

где  $\alpha$  – коэффициент поглощения;

$d$  – толщина образца (кристалла).

Коэффициент поглощения определяется выражением [73]:

$$\alpha = K_{\alpha} \sqrt{h\nu - E_g}, \quad (3.14)$$

где  $h\nu$  – энергия фотона (произведение постоянной Планка и частоты света);

$E_g$  – ширина запрещенной зоны арсенида галлия;

$K_{\alpha}$  – коэффициент пропорциональности.

Известно, что зависимость коэффициента поглощения  $\alpha$  от энергии фотона  $\alpha = f(h\nu)$  – прямо пропорциональная. Исходя из графика линейной зависимости  $\alpha = f(h\nu)$  [73], для арсенида галлия можно рассчитать коэффициент  $K_{\alpha}$  на основании следующего соотношения:

$$0,8 \cdot 10^4 = K_{\alpha} \sqrt{1,5 - 1,42 \left(\frac{1}{\text{см}}\right)}; K_{\alpha} = 2,827 \cdot 10^4 (\text{см}^{-1} \cdot \text{эВ}^{-1/2}). \quad (3.15)$$

Так, для нового (обогащенного) материала из арсенида галлия за счет уменьшения  $E_g$  коэффициент поглощения  $\alpha$  изменится (значение  $\alpha$  увеличится в 1,325 раз по сравнению с естественной концентрацией изотопов в арсениде галлия):

$$\alpha = 2,827 \cdot 10^4 \sqrt{1,5 - 1,36} ; \alpha = 1,058 \cdot 10^4 \left(\frac{1}{\text{см}}\right). \quad (3.16)$$

На рисунке 3.9 представлена зависимость  $\alpha = f(E_g)$  для арсенида галлия для энергии фотонов 1,5 эВ, соответствующей длинноволновой границе фотоэффекта.

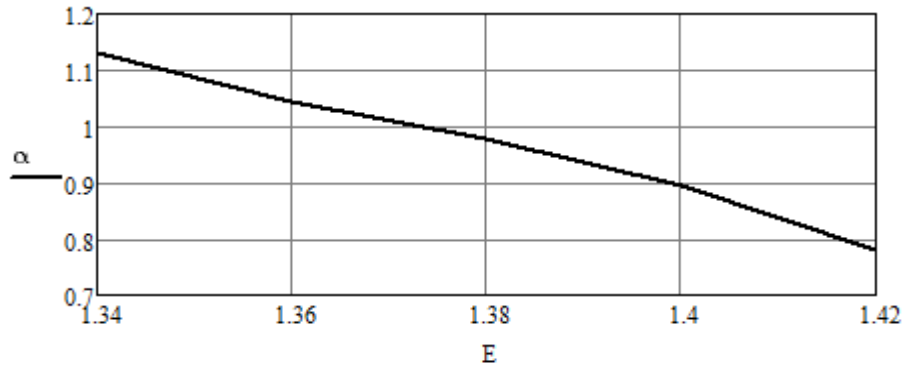


Рисунок 3.9 – Зависимость коэффициента поглощения от ширины запрещенной зоны полупроводника  $\alpha = f(E_g)$

Как видно из рисунка 3.10, с ростом ширины запрещенной зоны  $E_g$  коэффициент поглощения  $\alpha$  падает.

Таким образом, увеличение квантовой эффективности для объемного кристалла из арсенида галлия толщиной  $d = 10^{-4}$  см (3.14 – 3.16) составит:

$$\frac{1 - e^{-1,058 \cdot 10^4 \cdot 10^{-4}}}{1 - e^{-0,8 \cdot 10^4 \cdot 10^{-4}}} \cong 1,23. \quad (3.17)$$

Квантовая эффективность непосредственно входит в формулу для чувствительности (2.9) материала пикселя. Увеличение  $\eta$  в 1,23 раза (3.17) приведет к увеличению чувствительности ФД в такое же число раз. Обогащение полупроводника влияет не только на квантовую эффективность и чувствительность, но и темновой ток  $I_{тем}$  (мощность шума  $P_{ш}$ ). После уменьшения концентрации изотопа  $^{71}Ga$  в полупроводниковом кристалле величина темнового тока может увеличиться за счет роста подвижности носителей заряда  $\mu_n$  и уменьшиться за счёт сокращения числа носителей заряда  $p_0$  в подуровнях запрещенной зоны (2.10). Соотношение величин  $\mu_n$  и  $p_0$  влияет на темновой ток  $I_{тем}$  и обнаруживающую способность материала  $D$ .

Таким образом, после обогащения галлия чувствительность материала (2.9) повысится не менее, чем в 1,23 раза за счет увеличения квантовой эффективности и вероятности наступления фотоэффекта, изменения темного тока  $I_{тем}$  зависят от степени влияния величин  $\mu_n$  и  $p_0$ .

Проанализируем повышение квантовой эффективности для обогащенного материала на основе квантовой ямы.

Для квантовых ям значение параметра  $d = 10^{-6} \text{ см} = 10 \text{ нм}$  в расчете квантовой эффективности  $\eta$  на три порядка меньше, чем для кристаллов. Поэтому выражение (3.13) преобразуется следующим образом:

$$\eta \approx \alpha_{IQW} d. \quad (3.18)$$

На рисунке 3.10 представлены графики зависимости  $\eta = f(E_g)$  для объемных кристаллов и квантовых ям.

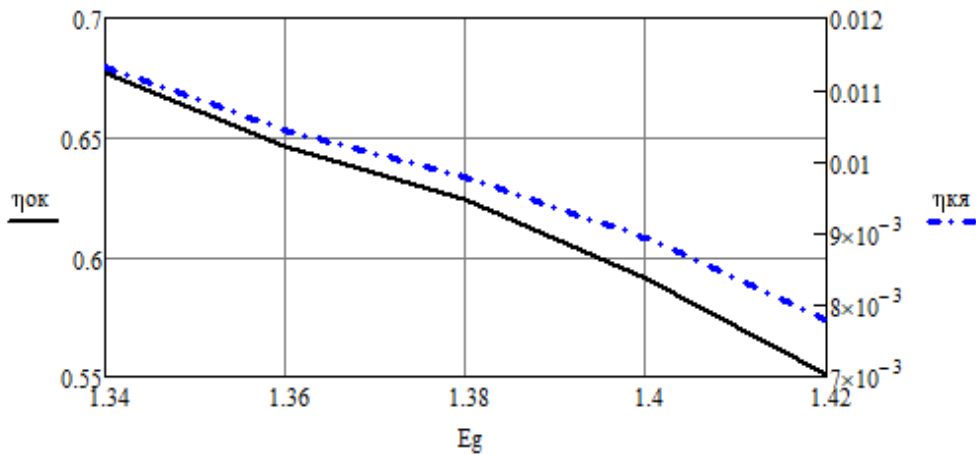


Рисунок 3.10 – Зависимости  $\eta = f(E_g)$  для объемных кристаллов (ОК) и квантовых ям (КЯ)

Как видно из рисунка 3.10, величина  $\eta$  для КЯ меньше на два порядка за счет размера  $d$  квантовой ямы. Однако обнаруживающая способность материала на КЯ выше, чем у объемных кристаллов за счет количества квантовых ям в структуре МКЯ (более 100).

При неизменности толщины барьера вероятность  $p_e$  попадания фотовозбужденного электрона в континуум барьера ямы (2.37) можно принять  $p_e = 1$  [67] и оценить эффективность обогащения по формуле (3.18).

Так, после обогащения галлия получим следующие изменения (увеличение) квантовой эффективности для арсенида галлия в расчете на одну квантовую яму:

$$\frac{1,06 \cdot 10^4 \cdot 10^{-6}}{0,8 \cdot 10^4 \cdot 10^{-6}} = 1,325 . \quad (3.19)$$

Таким образом, в результате уменьшения дефектов в кристаллической решетке материала квантовой ямы из арсенида галлия и на основании выражения (3.19) значительно увеличится чувствительность ФП на МКЯ (2.37) (не менее, чем в 1,325 раза), уменьшится мощность шума (2.38), повысится обнаруживающая способность (2.39).

### 3.6 Выводы по главе

1. Предложена методика проектирования нового материала для оптоэлектронных устройств на основе квантовых ям.

2. Разработана методика проектирования нового материала для оптоэлектронных устройств на основе сверхрешеток.

3. В результате математического моделирования сверхрешеток из обогащенного арсенида галлия сделаны следующие выводы:

1) уменьшение эффективной масса электрона и ширины запрещенной зоны материала влияют на ширину энергетических зон СВР;

2) первая энергетическая щель СВР уменьшится на 2,5 мэВ;

3) длинноволновая граница фотоэффекта  $\lambda_{cp}$  увеличится на 0,1 мкм.

4. На основании исследований квантовой эффективности  $\eta$  материала из обогащенного арсенида галлия получены следующие результаты:

1) величина квантовой эффективности  $\eta$  объемного кристалла и чувствительность ФД (микроэлектроника) повысится не менее, чем в 1,23 раза;

2) величина квантовой эффективности  $\eta$  КЯ и чувствительность ФД (наноэлектроника) увеличится не менее, чем в 1,325 раза.

## ГЛАВА 4 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

### 4.1 Методика оценки повышения эффективности систем видеонаблюдения с помощью оптоэлектронных устройств нового поколения

Целью работы является оценка технических возможностей систем видеонаблюдения и соответствие их требованиям по безопасности движения поездов на ж/д.

В первой главе работы для решения поставленной задачи предлагаются критерии соответствия (качества и достоверности информации), а также их оценки через отношение с/ш (или приведенную дисперсию погрешности) и вероятности правильного и ложного обнаружений. С помощью введенной функции потерь рассчитываются допустимые значения оценок. На основании сравнения результатов оценок с возможностями СИВ предлагаются пути совершенствования систем видеонаблюдения для снижения вероятности ложного обнаружения  $P_{лож.обн.}$ . Наиболее эффективным способом уменьшения  $P_{лож.обн.}$  является улучшение качества сигналов канала передачи информации СИВ. Самым перспективным способом повышения качества (с/ш) является применение новой элементной базы (наноэлектроники). Достижение поставленной цели (снижения  $P_{лож.обн.}$ ) с помощью новых материалов наноэлектроники осуществляется в несколько этапов. На первом этапе (вторая глава) разрабатывается методика расчета критерия качества (приведенной дисперсии суммарной погрешности  $\delta_\varepsilon^2$ ) и предлагается способ оценки достоверности информации с помощью алгоритма Неймана-Пирсона. На втором этапе (третья глава) исследуется взаимосвязь между оптоэлектронными характеристиками полупроводников (зависимостями коэффициента поглощения  $\alpha$  и квантовой эффективности  $\eta$  от размеров и чистоты материала) и параметрами фотодетектора



(ФС и ФП) систем видеонаблюдения (чувствительностью  $R$ , мощностью шума  $P_{ш}$ , обнаруживающей способностью  $D$ ), а также возможности их улучшения с помощью новых материалов. На третьем этапе (четвертая глава) оценивается результат использования новых материалов. Результат заключается в повышении эффективности системы видеонаблюдения. Под эффективностью понимается повышение достоверности информации только за счет повышения качества сигналов в канале передачи информации (снижение приведенных дисперсий погрешностей  $\delta_{\phi c}^2$  ФС,  $\delta_{\phi n}^2$  ФП и канала  $\delta_{\varepsilon}^2$  СИБ) (параграфы 4.2,4.3,4.4) . В параграфе 4.5 на основании расчетов вероятности  $P_{\text{прав.обн.}}$  для заданной величины  $P_{\text{лож.обн.}}$  осуществляется итоговая оценка возможности использования СИБ на новой элементной базе для повышения безопасности движения поездов.

#### **4.2 Исследование повышения качества сигналов фотодетектора с помощью нового материала на объемных кристаллах**

Качество сигналов на выходах фотоматрицы ФС и фотоприемника зависит от характеристик материала (светочувствительного слоя). Как показано в параграфе 3.5, обогащение полупроводникового материала повышает коэффициент поглощения  $\alpha$ , увеличивает квантовую эффективность  $\eta$  и как следствие, чувствительность  $R$  фотодетектора (ФД). За счет повышения  $R$  снижается мощность шума  $P_{ш}$  и улучшается обнаруживающая способность  $D$ . Степень улучшения параметров фотодетектора, лежащего в основе ФМ и ФП (рисунок 2.3), за счет использования нового материала (на основе обогащенных полупроводников) зависит от размеров материала. Как отмечено в главе 3, в качестве материала используются объемные кристаллы с размерами более 100 нм (микроэлектроника) и квантовые структуры МКЯ (наноэлектроника) с размерами менее 100 нм.

Проанализируем влияние характеристик материала и фотодетектора на качество сигналов канала передачи информации на примере объемных кристаллов (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Влияние характеристик материала (из объемных кристаллов) на качество сигналов канала передачи видеоинформации

Как видно из рисунка 4.1, качество сигнала на выходе ФД  $\rho_{\text{выхфд}}^2$  зависит от чувствительности  $R$  (2.9).

Отношение мощностей сигнала и шума на выходе ФД  $\rho_{\text{выхфд}}^2$  при условии, что величина темнового тока  $I_{\text{тем}i} \ll P_{\text{ex}} R_i$ , определяется следующим образом [67]:

$$\rho_{\text{выхфд}}^2 \cong \frac{P_{\text{ex}} R_i}{2q\Delta f}, \quad (4.1)$$

где  $P_{\text{ex}}$  – мощность входного сигнала;

$R_i$  – чувствительность ФД на ОК;

$q$  – заряд электрона;

$\Delta f$  – ширина полосы детектирования.

Учитывая, что параметр  $R_i$  на ОК из обогащенного материала увеличивается в 1,23 раза за счет повышения коэффициентов поглощения  $\alpha$  и квантовой эффективности  $\eta$  (см. глава 3), качество сигналов улучшится в 1,23 раза (4.1) (рисунок 4.1).

Важным параметром ФД является обнаруживающая способность  $D$ , которая зависит от мощности шума  $P_{ш}$  (2.10) и величины темнового тока  $I_{тем}$  (2.11).

Темновой ток определяется концентрацией носителей заряда (электронов)  $p_0$  в отсутствие засветки и подвижностью электронов  $\mu_n$  [67]. После обогащения материала уменьшается  $p_0$ , но растет подвижность  $\mu_n$ . Величина  $p_0$  зависит от количества подуровней в запрещенной зоне кристалла (числа дефектов кристаллической решетки, в том числе тяжелых изотопов). Подвижность  $\mu_n$  зависит от эффективной массы электрона  $m_{эф}$ . Итоговый результат влияния обогащенного материала на темновой ток зависит от соотношения  $p_0$  и  $\mu_n$ . Чем чище материал, тем меньше масса электрона, тем больше подвижность. Однако после очистки от тяжелых изотопов уменьшается концентрация свободных электронов  $p_0$ , образовавшихся за счет подуровней в запрещенной зоне.

Известно, что обогащение материала (кремния) повышает подвижность электронов  $\mu_n$  более, чем в два раза [82,84].

По аналогии с кремнием (см. параграф 3.5) можно принять, что подвижность электронов в кристалле обогащенного арсенида галлия увеличится не менее, чем в два раза.

Снижение концентрации свободных электронов в кристалле арсенида галлия на основании исследований [80,82,84] может составить величину более, чем в четыре раза.

Отсюда следует, что темновой ток (2.11) увеличится в два раза за счет роста подвижности  $\mu_n$  и одновременно упадет более чем в четыре раза за счет снижения концентрации свободных электронов  $p_0$ . Примем в итоге, что темновой ток уменьшится в два раза. Расчетная формула мощности шума  $P_{эш}$  (2.10) (порога чувствительности) в результате обогащения (с учетом снижения темнового тока в 2 раза, а также увеличения  $\eta$  (3.17) и чувствительности в 1,23 раза) изменится следующим образом:

$$P_{\text{ш}}^1 = \frac{\sqrt{2q(I_m / 2)\Delta f}}{1,23 \cdot R_i}. \quad (4.2)$$

Отсюда, мощность шума для ФД на обогащенном кристалле (4.2) уменьшится в  $(1,23 \times \sqrt{2}) \cong 2$  раза.

Соответственно обнаруживающая способность ФД на новом материале  $D$  (2.12) повысится в  $\cong 2$  раза за счет уменьшения эквивалентного шума  $P_{\text{ш}}^1$  (4.2).

Таким образом, характеристики материала существенно влияют на параметры ФД и качество сигналов  $\rho_{\text{выхфд}}^2 = \frac{\sigma_{\lambda}^2}{\sigma_{\text{ш}}^2}$  (отношение мощностей фототока и шума на выходе ФМ и ФП).

#### **4.3 Исследование повышения качества сигналов фотодетектора с помощью нового материала на квантовых ямах**

Как отмечено в параграфе 3.1, значительно улучшить качественные характеристики оптоэлектронных устройств на основе фотоэффекта, а именно, фотодетекторов (пикселей ФМ, фотоприемников) можно за счет использования квантовых структур, например, множественных квантовых ям. Главным преимуществом фотодетекторов на МКЯ является повышение обнаруживающей способности по сравнению с материалом на объемных кристаллах (2.39). С помощью обогащения полупроводникового материала квантовых ям можно еще улучшить оптоэлектронные характеристики фотодетекторов и повысить качество сигналов (с/ш).

Исследования влияния характеристик материала (зависимостей коэффициентов  $\alpha$  и  $\eta$  от длины волны света  $\lambda$  и величины запрещенной зоны  $E_g$ ) на чувствительность фотоприемников, проведенные в главе 3, позволяют оценить повышение качества сигналов ФД, реализованных на основе МКЯ и новых материалах (обогащенных полупроводниках). Методика оценки перечисленных выше характеристик представлена на рисунке 4.2.

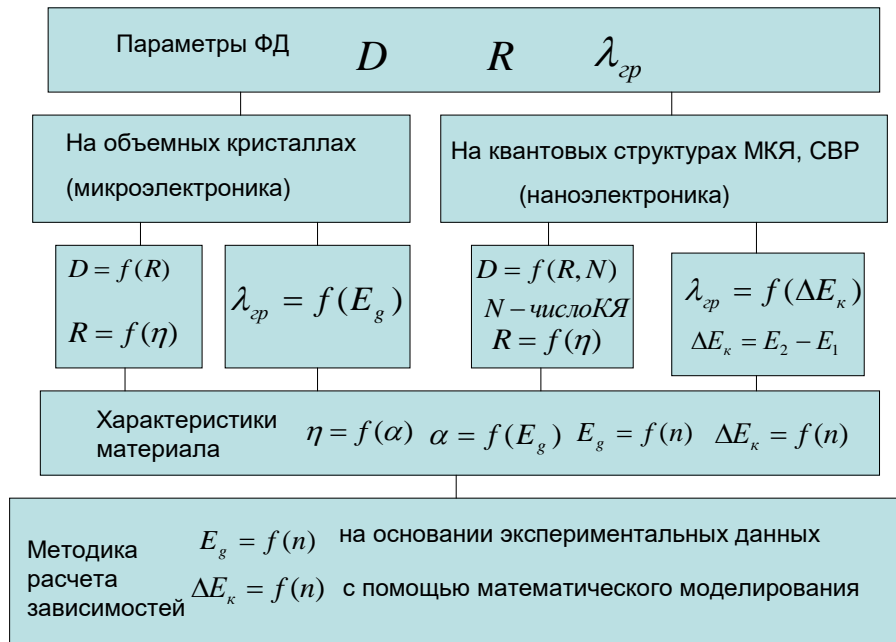


Рисунок 4.2 – Методики расчета характеристик материалов оптоэлектроники и параметров фотодетекторов на их основе

Так, снижение концентрации тяжелых изотопов галлия для квантовых ям (*GaAs*) и потенциальных барьеров (*AlGaAs*) повышают квантовую эффективность и чувствительность КЯ в 1,325 раз (параграф 3.5). На этом основании и в результате анализа формул (2.37), (2.38) можно сделать вывод о том, что после обогащения материала квантовых ям произойдут следующие изменения характеристик носителей заряда [67,54]:

1) повышение дрейфовой скорости за счет увеличения подвижности  $\mu_n$  носителей заряда  $V_{op} = \mu_n E$ , ( $E$  – напряженность электрического поля), как следствие этого, изменения вероятности захвата электрона квантовой ямой  $p_c$  (2.37) и коэффициента усиления КЯ в  $G_{IQW} = 1/p_c$ ;

2) снижение трехмерной концентрации  $\rho_{3Dтерм}$  в барьерах квантовых ям термически активных электронов и соответственно темнового тока  $I_{тем}$  за счет уменьшения количества дефектов (тяжелых изотопов);

3) повышение вероятности  $p_e$  попадания фотовозбужденного электрона в континуум барьера ямы и повышение квантовой эффективности КЯ (2.37).

Движение свободных электронов происходит в условиях действия периодически изменяющегося электрического потенциала МКЯ (рисунок 3.4). При этом одновременно происходят два процесса:

- 1) генерации фотовозбужденных электронов в континуум барьера ямы с вероятностью  $p_e$  и удаления их электрическим полем в виде фототока;
- 2) захват электронов квантовыми ямами в процессе протекания фототока с вероятностью  $p_c$ .

Численные оценки значений параметров обогащенного материала на МКЯ, указанных в пунктах 1) и 2), возможно только после проведения экспериментальных исследований.

Описание дополнительных параметров КЯ ( $p_e, p_c$ ) необходимо для оценки изменений величины  $\rho_{выхфд}^2$  на выходе ФД после обогащения материала.

Так, характер изменения вероятности  $p_c$  при росте подвижности электронов можно оценить, исходя из следующих допущений.

Из выражения  $G_{IQW} = 1/p_c$  видно, что вероятность  $p_c$  зависит от однопролетного усиления КЯ. Величину усиления  $G_{IQW}$  можно рассчитать по следующей формуле:  $G_{IQW} = \frac{\tau_3}{\tau_{np}}$ , которая означает отношение времени захвата электрона  $\tau_3$  квантовой ямой к времени пролета электрона  $\tau_{np}$  над КЯ. В результате обогащения время  $\tau_3$  снижается из-за воздействия двух факторов (роста коэффициента поглощения и скорости генерации фотовозбужденных электронов) [67], время  $\tau_{np}$  снижается из-за действия одного фактора (роста подвижности электронов). Отсюда, можно предположить, что в результате обогащения материала величина  $G_{IQW}$  незначительно уменьшится, величина вероятности  $p_c$  незначительно увеличится.

Примем, что увеличение вероятности захвата электрона  $p_c$  составит 10%.

Оценим, как изменится отношение с/ш фотодетектора на МКЯ после обогащения материала по аналогии с объемным кристаллом (параграф 4.2) на основании (2.37) по аналогии с (4.1) [67,58]:

$$\rho_{\text{выхфд}}^2 \cong \frac{P_{\text{ex}} R}{2(2 - p_c) q \Delta f / p_c N}, \quad (4.3)$$

где  $P_{\text{ex}}$  – мощность излучения на входе фотодетектора, ( $I_{\text{тем}} \ll P_{\text{ex}} R$ );

$R$  – чувствительность фотодетектора;

$N$  – число квантовых ям;

$p_c$  – вероятность захвата электрона квантовой ямой;

$q$  – заряд электрона;

$\Delta f$  – ширина полосы детектирования.

Результатом использования нового материала ФП является повышение отношения мощностей сигнала к шуму на выходе фотоприемника.

С учетом формул (2.37), (2.38), (4.3) рассчитаем повышение качества ФД на МКЯ после обогащения материала.

Для оценки выигрыша по параметру  $\rho_{\text{выхфд}}^2$  необходимо ввести дополнительные обозначения, с помощью которых определим изменения параметров ФД ( $p_e$ ,  $p_c$ ,  $R = f(\alpha_{1QW})$ ), входящих в (4.3):

$$\frac{p_e^1}{p_e} = \gamma; \frac{(2 - p_c^1)}{(2 - p_c)} = \beta; \frac{\alpha_{1QW}^1}{\alpha_{1QW}} = \varphi; \zeta = p_c^1 / p_c, \quad (4.4)$$

где  $p_e^1$ ,  $p_c^1$ ,  $\alpha_{1QW}^1$  – значения параметров КЯ после обогащения  $GaAs$  соответственно: вероятность попадания фотовозбужденного электрона в континуум барьера ямы (так как концентрация атомов алюминия не меняется, то примем  $\gamma = 1$ ), вероятность захвата электрона квантовой ямой, квантовая эффективность ямы. С учетом увеличения вероятности захвата получим:

$\zeta = p_c^1 / p_c = 1,1$ ;  $\beta = \frac{2 - 0,22}{2 - 0,2} = 0,975$ . Так как коэффициент  $\alpha_{1QW}$  после обогащения

материала увеличится в 1,325 раз, то параметр  $\varphi = 1,325$ .

Отсюда, отношение  $\rho_{\text{выхфд}}^2$  после обогащения материала КЯ вырастет с учетом (4.4) в  $K$  раз:

$$K = \gamma\varphi\zeta / \beta \cong 1,5. \quad (4.5)$$

Параметр  $K$  (4.5) позволит оценить эффект очистки материала на основе МКЯ при условии, что входная мощность излучения  $P_{\text{вх}}$ , число квантовых ям  $N$  и ширина полосы частот  $\Delta f$  (время детектирования) не меняются.

Повышение с/ш в 1,5 раза на выходе ФД отразится на величине вероятности ошибки  $P_{\text{оифс}}$  (2.24) на выходе ФС и вероятности ошибки на выходе ФП  $P_{\text{оифп}}$  (при условии использования нового материала на МКЯ).

Рассчитаем повышение качества сигналов ФП через вероятность ошибки с помощью формулы (2.35):

Так, после изотопической очистки материала значение  $\rho_{\text{выхфд}}^2$  на основании формул (2.34), (4.3) – (4.5) увеличится в  $\cong 1,5$  раза, а следовательно, уменьшится вероятность ошибки  $P_{\text{оифп}}$  и величина погрешности  $\delta_{\text{анфп}}^2$  для ФП.

На рисунке 4.3 представлены графики  $P_{\text{оифп}} = f(\rho_{\text{выхфд}}^2)$  для ФП с очисткой и без очистки материала, построенные на основании формулы (2.35):

$$P_{\text{оифпоч}} = \frac{2}{\sqrt{2\pi\rho_{\text{выхфд}1}^2}} \exp\left(-\frac{\rho_{\text{выхфд}1}^2}{8}\right),$$

где  $P_{\text{оифпоч}}$  - вероятность ошибки ФП на обогащенных МКЯ;

$\rho_{\text{выхфд}1}^2 = K\rho_{\text{выхфд}}^2$  – отношение с/ш ФД фотоприемника на обогащенных МКЯ;

$K \cong 1,5$  - коэффициент повышения с/ш на выходе ФД за счет обогащения.



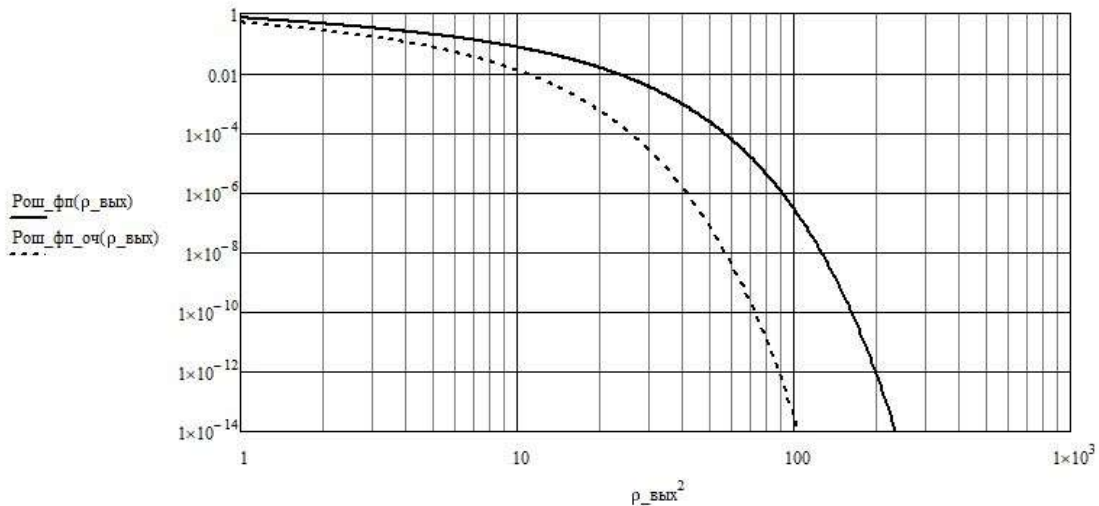


Рисунок 4.3 – Графики зависимости  $P_{ошфп} = f(\rho_{выхфд}^2)$  для ФП на МКЯ из природных (сплошная линия) и обогащенных (пунктирная линия) полупроводников

Как видно из графиков на рисунке 4.3 после обогащения материала КЯ вероятность ошибки уменьшается на несколько порядков. Конкретное значение  $P_{ошфп}$  зависит от величин  $\rho_{выхфд}^2$ .

На основании полученных значений вероятности ошибки  $P_{ошфп}$  (рисунок 4.3) можно оценить, во сколько раз повысится качество приема оптических сигналов за счет улучшения оптоэлектронных характеристик полупроводникового материала (повышения квантовой эффективности, чувствительности, уменьшения шумов).

Так, для рабочего значения  $\rho_{выхфд}^2 = 65$ , обеспечивающего вероятность ошибки  $P_{ошфп} = 0,31 \cdot 10^{-5}$ , обогащение материала на МКЯ позволит снизить величину  $P_{ошфп}$  на три порядка, соответственно уменьшить  $\delta_{анфп}^2$  на два порядка (2.36).

Величину выигрыша в качестве выходного сигнала ФП на новом (обогащенном) материале из МКЯ определим с помощью следующих выражений (2.35), (2.36), (4.5):

$$m = \delta_{анфп}^2 / \delta_{анфпоч}^2, \quad (4.6)$$

где  $\delta_{анфп}^2; \delta_{анфпоч}^2$  – приведенная дисперсия аномальной погрешности ФП соответственно до и после очистки материала.

После подстановки в (4.6) выражений для  $\delta_{анфп}^2; \delta_{анфпоч}^2$  получим:

$$m = \frac{2}{\sqrt{2\pi\rho_{выхфд}^2}} \exp\left(-\frac{\rho_{выхфд}^2}{8}\right) / \frac{2}{\sqrt{K2\pi\rho_{выхфд}^2}} \exp\left(-\frac{\rho_{выхфд}^2 K}{8}\right),$$

где  $\rho_{выхфд}^2$  - отношение мощностей сигнала к шуму на выходе ФД фотоприемника.

После преобразований получим следующее выражение для  $m$  :

$$m = (\sqrt{K}) \cdot \exp\left(\frac{\rho_{выхфд}^2 (K-1)}{8}\right), \quad (4.7)$$

для  $\rho_{выхфд}^2 = 65$ ;  $\rho_{выхфд1}^2 = 1,5\rho_{выхфд}^2$  величина  $m$  равна:

$$m \cong 71.$$

Для фотодетекторов на объемных кристаллах получим следующий результат выигрыша  $m_i$  (4.6) по качеству сигналов ФП за счет обогащения материала ( $K=1,23$ ):

$$m_i = (\sqrt{K}) \cdot \exp\left(\frac{\rho_{выхфд}^2 (K-1)}{8}\right) \cong 9.$$

Отсюда, эффективность обогащения полупроводникового материала влияет на параметр  $\rho_{выхфд}^2$ , и чем меньше величина  $\rho_{выхфд}^2$ , тем сильнее это влияние.

Значение выигрыша  $n$  для погрешности  $\delta_{анфс}^2$  ФС за счет нового (обогащенного) материала рассчитывается по аналогии с ФП (4.6) на основании (2.28):

$$n = \exp(-4,5\rho_{выхфм}^2 / L_{кв}^2) / \exp(-4,5\rho_{выхфм}^2 K / L_{кв}^2).$$

После преобразований получим:

$$n = \exp\{[(4,5 \cdot \rho_{выхфм}^2) / L_{кв}^2](K-1)\}, \quad (4.8)$$

где  $K \cong 1,23$  – величина выигрыша (4.1) по параметру  $\rho_{\text{выхфм}}^2$  ФС на объемном кристалле (параграф 4.2);

$K \cong 1,5$  – величина выигрыша по  $\rho_{\text{выхфм}}^2$  ФС на МКЯ (параграф 4.3).

Величина выигрыша  $n_i$  по  $\delta_{\text{фс}}^2$  для ФС из нового материала на объемном кристалле с параметрами  $\rho_{\text{выхфм}}^2 = 10^5$  и  $L_{\text{кв}} = 256$  равна  $n_i = 4,86 \approx 5$ . Для фотосенсора из нового материала на МКЯ при тех же условиях выигрыш составит величину  $n \cong 31$ . При увеличении  $\rho_{\text{выхфм}}^2$  вдвое значение  $n$  возрастет более, чем в 30 раз, вероятность  $P_{\text{ошфс}}$  после обогащения материала МКЯ уменьшится на два порядка, а именно:  $P_{\text{ошфсоч}} = 1,67 \cdot 10^{-5}$ ,  $P_{\text{ошфс}} \cong 0,5 \cdot 10^{-3}$ . Как видно из выражений (4.7), (4.8), величины выигрыша по качеству сигналов ФП  $m$  и ФС  $n$  зависят от повышения значений  $\rho_{\text{выхфм}}^2$  и  $\rho_{\text{выхфд}}^2$ , т.е. коэффициентов  $K$ .

#### 4.4. Оценка повышения качества сигналов канала передачи информации за счет оптоэлектронных устройств нового поколения

Как было отмечено в главе 1, задачей систем видеонаблюдения является распознавание опасных объектов с заданными вероятностями  $P_{\text{лож.обн.}} \leq 10^{-4}$  и  $P_{\text{прав.обн.}} \geq 0,9993$ . Для обеспечения требуемого качества обнаружения СИВ устройствам распознавания необходим минимальный объем информации  $h_\epsilon(B) = f(\delta_\epsilon^2)$  (1.1) (эпсилон – энтропии), который доставляется каналом. Элементная база микроэлектроники канала передачи информации для современных алгоритмов распознавания гарантирует вероятность  $P_{\text{лож.обн.}} \leq 10^{-3}$ . Эта цифра не обеспечивает требуемое значение  $P_{\text{лож.обн.}}$  для повышения безопасности движения на ж/д. Чтобы снизить вероятность ложного обнаружения, не переходя на новую элементную базу, требуется усложнение алгоритмов видеоаналитики, что отразится на продолжительности работы СИВ [26]. Временные затраты снижают оперативность обнаружения объекта и реагирования на возникшую угрозу безопасности движения поездов. В работе исследуется другое направление повышения достоверности распознавания

опасных объектов, а именно, за счет улучшения качества сигналов на выходе канала передачи информации с помощью более совершенной элементной базы (наноэлектроники).

Оценка качества канала передачи информации осуществляется с помощью приведенной дисперсии суммарной погрешности  $\delta_\varepsilon^2$ , основной вес в которой составляют погрешности ФС  $\delta_{анфс}^2$  и ФП  $\delta_{анфп}^2$ .

Выражение приведенной дисперсии  $\delta_\varepsilon^2$  (2.41) (параграфы 2.2 – 2.4), имеет вид:

$$\delta_\varepsilon^2 \cong 6 \left[ \exp\left(-\frac{4,5\rho_{выхфс}^2}{L_{кв}^2}\right) + \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\pi\rho_{выхфп}^2}} \exp\left(-\frac{\rho_{выхфп}^2}{8}\right) \right].$$

С учетом эффекта очистки материала, который позволяет увеличить  $\delta_{анфс}^2$  и  $\delta_{анфп}^2$ , выражение для приведенной дисперсия суммарной погрешности  $\delta_{\varepsilon оч}^2$  для фотодетекторов ФС и ФП на основе обогащенного полупроводника выглядит следующим образом (2.41), (4.6) – (4.7):

$$\delta_{\varepsilon оч}^2 \cong 12 \left\{ \frac{1}{2} \left[ \exp\left(-\frac{4,5\rho_{вых}^2}{L_{кв}^2}\right) \right] / n + \frac{2}{\sqrt{2\pi\rho_{выхфп}^2}} \left[ \exp\left(-\frac{\rho_{выхфп}^2}{8}\right) \right] / m \right\}, \quad (4.9)$$

Если значения приведенных дисперсий текущих погрешностей фотосенсора  $\delta_{анфс}^2$  и фотоприемника  $\delta_{анфп}^2$  приблизительно одинаковые, то выигрыш по качеству сигнала, т.е. уменьшение приведенной дисперсии суммарной погрешности  $\delta_\varepsilon^2$  (2.41) оценивается по следующей формуле:

$$\chi \approx \frac{n+m}{2}, \text{ при условии } P_{ошфс} \approx P_{ошфп}.$$

Так, например, для фотосенсора с параметрами  $\rho_{выхфм}^2 = 1,75 \cdot 10^5$ ;  $L_{кв} = 256$  и вероятностью ошибки, равной  $P_{ошфс} = 0,61 \cdot 10^{-5}$ , и фотоприемника с  $\rho_{выхфд}^2 = 65$  и вероятностью  $P_{ошфп} = 0,31 \cdot 10^{-5}$  общий выигрыш по качеству сигналов  $\chi$  за счет оптоэлектронных устройств (ФД) нового поколения на МКЯ составит ( $m \cong 71$ ,  $n \cong 31$ )  $\chi \cong 51$  раз (см. формулы (4.6), (4.7) параграфа 4.4)).

Таким образом, повысить качество сигналов канала передачи информации СИВ  $\delta_\varepsilon^2$  и передать требуемый объем информации  $h_\varepsilon(B)$  на устройство видеоаналитики возможно за счет улучшения оптоэлектронных характеристик полупроводникового материала ФД.

#### **4.5 Оценка повышения эффективности СИВ за счет оптоэлектронных устройств нового поколения**

Важным критерием соответствия возможностей систем видеонаблюдения задачам повышения безопасности движения поездов является критерий достоверности информации, необходимый для принятия правильного решения. В качестве оценки критерия достоверности приняты вероятности правильного  $P_{\text{прав.обн.}}$  и ложного  $P_{\text{лож.обн.}}$  обнаружений опасного объекта (параграфы 1.1 – 1.3).

Для решения задачи обнаружения объекта известной формы принято использовать оптимальные решающие устройства (ОРУ) в виде согласованных фильтров [15]. Для решения более сложных задач распознавания объекта требуется дополнительная оценка параметров входного сигнала. Обнаружение ОРУ объекта известной формы (в виде машины, человека, животного и т.д.) может происходить в результате анализа контура объекта на основании сформированной характеристики, соответствующей аналитическому описанию формы объекта. Качество работы ОРУ определяется отношением с/ш  $\alpha_{\text{сх}}^2 \cong \frac{1}{\delta_\varepsilon^2}$  (или  $\rho_{\text{вых}}^2$  на выходе канала).

Это означает, что с увеличением объема информации, поступающей по каналу, повышается эффективность используемых алгоритмов видеоаналитики.

В параграфе 4.5 осуществляется сравнение достоверности обнаружения с помощью разных каналов передачи информации, реализованных на базе микроэлектроники на природных полупроводниках и наноэлектроники с использованием новых материалов.

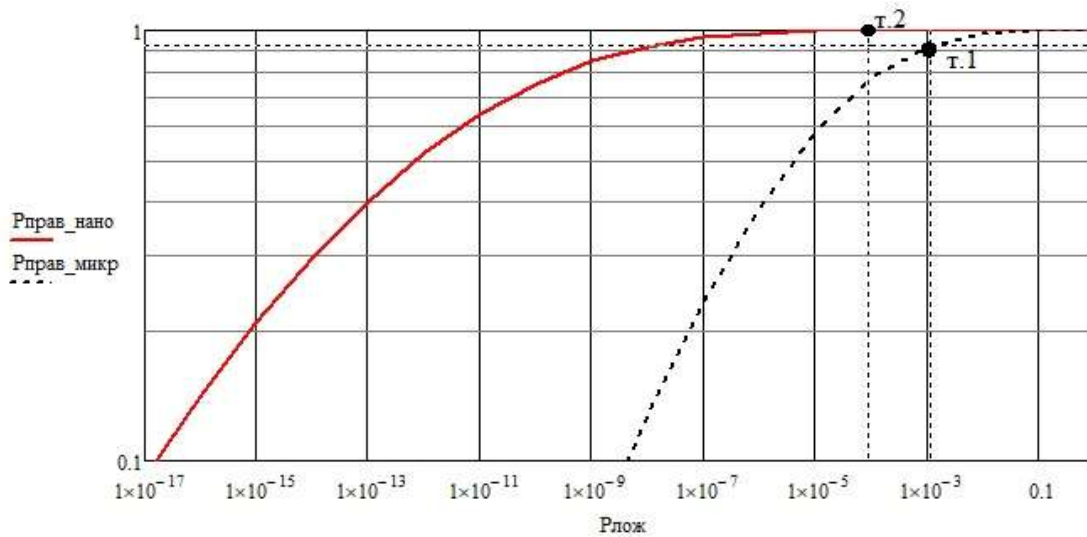
Для расчета вероятностей  $P_{\text{прав.обн.}}$  и  $P_{\text{лож.обн.}}$  используется теория обнаружения (2.42) (приложение В). В качестве устройства распознавания рассматривается оптимальное решающее устройство (ОРУ).

При отсутствии априорных вероятностей появления обнаруживаемых объектов применяют критерий Неймана – Пирсона [25]. Основными параметрами для расчета вероятностей являются отношение мощностей сигнал/шум  $\alpha_{\text{вх}}^2$  на входе ОРУ и заданная вероятность ложного обнаружения  $P_{\text{лож.обн.}}$  [25].

На рисунке 4.4 представлены две кривые  $P_{\text{прав.обн.}} = f(P_{\text{лож.обн.}})$  для случая применения оптоэлектронных устройств на ОК из природного полупроводника и на МКЯ из обогащенного полупроводника.

Расчеты показывают (приложение В), что обогащение материала дает значительное повышение вероятности правильного обнаружения. Как видно из рисунка 4.4, для фиксированной величины вероятности  $P_{\text{лож.обн.}} = 10^{-3}$  значение вероятности правильного обнаружения для нового материала (наноэлектроника) значительно улучшается (с 0,9165 до 0,99926). При этом вероятность пропуска опасного объекта  $P_{\text{пр.}} = 1 - P_{\text{прав.обн.}}$  снижается на два порядка.

Вычисленные значения вероятностей  $P_{\text{лож.обн.}}$  и  $P_{\text{прав.обн.}}$  (оценки критерия достоверности) согласно функции потерь должны быть не хуже  $P_{\text{лож.обн.}} \leq 10^{-4}$  и  $P_{\text{прав.обн.}} \geq 0,9993$  (параграф 1.3), формулы (1.1) - (1.3).



Трассировка графика X-Y Pправ\_микр (точка 1) X

X-коорди  Копировать X

Y-коорди  Копировать Y

Y2-коорд  Копировать Y2

Отслеживать точки данных

Трассировка графика X-Y Pправ\_нано (точка 2) X

X-коорди  Копировать X

Y-коорди  Копировать Y

Y2-коорд  Копировать Y2

Отслеживать точки данных

Рисунок 4.4 –Графики  $P_{\text{прав.обн.}} = f(P_{\text{лож.обн.}})$  зависимости вероятности правильного обнаружения  $P_{\text{прав\_микр}}$  (для микроэлектроники) и  $P_{\text{прав\_нано}}$  (для наноэлектроники) от вероятности ложного обнаружения ( $P_{\text{лож.обн.}}$ )

Для величины вероятности ложного обнаружения  $P_{\text{лож.обн.}} = 10^{-4}$  (рисунок 4.4), требуемой для систем видеонаблюдения, на основании графика  $P_{\text{прав.обн.}} = f(P_{\text{лож.обн.}})$ , построенного для ФП и ФС на квантовых структурах из обогащенного материала, получаем значение вероятности правильного обнаружения  $P_{\text{прав.обн.}} \cong 0,9993$ .

Таким образом, увеличение отношения мощностей сигнала и шума после обогащения материала ФД (пикселей ФМ и фотоприемника) позволит использовать системы видеонаблюдения для повышения безопасности движения поездов.

#### 4.6 Выводы по главе

1. Разработана методика оценки эффективности обогащения материалов для объемных кристаллах (микроэлектроника) и квантовых ям (наноэлектроника).

2. В результате проведенных исследований получены следующие результаты улучшения параметров ФД за счет использования обогащенного материала:

1) происходит снижение трехмерной концентрации  $\rho_{3Dтерм}$  в барьерах квантовых ям термически активных электронов и соответственно темнового тока  $I_{тем}$ ;

2) величина мощности шума  $P_{ш}$  уменьшается в 2 раза за счет снижения темнового тока  $I_{тем}$  и повышения чувствительности ФД на полупроводниковых кристаллах;

3) величина обнаруживающей способности  $D$  объемных кристаллов повышается в 2 раза за счет снижения мощности  $P_{ш}$ ;

3. Разработана методика оценки повышения качества сигналов для ФС и ФП, реализованных на новых материалах.

4. В результате проведенных исследований оценок качества сигналов ФС и ФП на новых (обогащенных) материалах получены следующие результаты:

1) отношение мощностей сигнал/шум ФМ  $\rho_{выхфм}^2$  на объемных кристаллах (ОК) повышается в 1,23 раза;

2) отношение мощностей сигнал/шум ФД  $\rho_{выхфд}^2$  для фотоприемника на МКЯ повышается в 1,5 раза;

3) вероятность ошибки  $P_{ошфп}$  уменьшается более, чем на три порядок.

4) качество сигналов ФС (погрешность  $\delta_{анфс}^2$ ) при  $\rho_{выхфс}^2 = 10^5$ ;  $L_{кв} = 256$  для ОК повышается в  $\cong 6$  раз, для МКЯ - соответственно в  $\cong 31$  раз;

5) качество сигналов ФП (погрешность  $\delta_{анфп}^2$ ) для ОК повышается в  $\cong 9$  раз, для МКЯ увеличивается в  $\cong 71$  раз;



б) качество сигналов канала передачи информации (погрешность  $\delta_\varepsilon^2$ ) повышается в среднем для ОК в  $\cong 8$  раз, для МКЯ в  $\cong 51$  раз.

5. В результате проведенных исследований по повышению эффективности СИВ и на основании полученных значений вероятностей правильного обнаружения ( $P_{\text{прав.обн.}} \geq 0,9993$ ) и ложного обнаружения ( $P_{\text{лож.обн.}} \leq 10^{-4}$ ) сделан вывод о возможности использования систем видеонаблюдения для повышения безопасности движения поездов при условии применения оптоэлектронных устройств нового поколения (ОЭУ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение безопасности движения поездов – это снижение вероятности аварийных ситуаций с помощью технических средств. Согласно принятой в 2019 концепции перехода на «Цифровую железную дорогу», наиболее перспективными техническими средствами являются системы интеллектуального видеонаблюдения СИБ. Видеонаблюдение широко используется на железнодорожном транспорте для различных целей: охрана территорий, грузов, обеспечение безопасности пассажиров на платформах и вокзальных помещениях, в кабинах машинистов, на переездах, для пресечения противоправных актов и т.д. Эффективность работы СИБ оценивается уменьшением вероятности аварийных ситуаций. Для характеристики СИБ предлагаются два критерия эффективности (качества и достоверности), а также оценки этих критериев в виде приведенной дисперсии суммарной погрешности  $\delta_\varepsilon^2$  и вероятностей правильного  $P_{\text{прав.обн.}}$  и ложного  $P_{\text{лож.обн.}}$  обнаружений (глава 1). Чтобы использовать введенные критерии, необходимо обоснование допустимых значений оценок ( $\delta_\varepsilon^2$ ,  $P_{\text{прав.обн.}}$ ,  $P_{\text{лож.обн.}}$ ). Эта задача решается с помощью функции потерь. В результате полученных значений оценок достоверности информации, требуемых от систем видеонаблюдения, сделан следующий вывод: в настоящее время СИБ не соответствуют требованиям безопасности движения поездов. Так, современные СИБ обеспечивают вероятность ложного обнаружения  $P_{\text{лож.обн.}} = 10^{-3}$ . Для безопасности движения вероятность ложного обнаружения должна быть  $P_{\text{лож.обн.}} \leq 10^{-4}$  (глава 1).

Снижение ложных обнаружений на порядок возможно двумя путями:

- 1) совершенствование алгоритмов распознавания опасных объектов;
- 2) повышение качества сигналов  $\alpha_{\text{вх}}^2$  на входе устройства распознавания

СИБ. Работа посвящена повышению качества сигналов канала передачи информации  $\rho_{\text{вых}}^2 \cong \alpha_{\text{вх}}^2$  СИБ. Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Рассчитать качество сигналов канала передачи информации  $\rho_{\text{вх}}^2 \cong 1/\delta_\varepsilon^2$  системы видеонаблюдения: предложить оценку качества и модель расчета с учетом специфики приемо-передающих устройств СИВ (глава 2);

2. Найти пути повышения качества сигналов на выходе канала передачи информации: определить устройства СИВ, вносящие наибольшие неустраняемые погрешности в величину  $\delta_\varepsilon^2$ , предложить способы их снижения (уменьшения шумов, повышение чувствительности ФД) (глава 2);

3. Исследовать возможность улучшения параметров фотосенсора и фотоприемника с помощью новых полупроводниковых материалов (объемных кристаллов и множественных квантовых ям из обогащенных полупроводников): получить зависимости величин вносимых искажений от свойств материала, оценить степень улучшения параметров ФД на новых материалах (глава 3);

4. Рассчитать повышение качества сигналов канала передачи информации (уменьшение приведенной дисперсии суммарной погрешности  $\delta_\varepsilon^2$ ) СИВ за счет нового материала, т.е. получить формулы для расчета выигрыша по качеству сигналов за счет использования новых полупроводниковых материалов (глава 4);

5. Оценить эффективность обнаружения СИВ на основе элементной базы нового поколения с помощью вероятностей правильного и ложного обнаружений.

### Основные результаты и выводы

1. Проведен анализ соответствия технических возможностей СИВ задачам повышения безопасности движения поездов с помощью критериев качества сигналов и достоверности информации, который показал, что вероятности ложного и правильного обнаружений должны иметь следующие значения:  $P_{\text{лож.обн.}} \leq 10^{-4}$ ,  $P_{\text{прав.обн.}} \geq 0,9993$ .

2. Исследованы возможности уменьшения вероятности ложного обнаружения ( $P_{\text{лож.обн.}} \leq 10^{-3}$ ) путем улучшения качества видеосигналов в канале передачи информации за счет перехода на новую элементную базу

(наноэлектронику), способную повысить обнаруживающую способность и длинноволновую границу регистрации света фотодетекторов.

3. Разработаны методики расчета предложенных оценок качества сигналов СИВ в виде приведенных дисперсий: а) погрешности  $\delta_{\phi c}^2$  фотосенсора; б) погрешности  $\delta_{\phi n}^2$  фотоприемника; в) суммарной погрешности  $\delta_{\varepsilon}^2$  канала передачи информации.

4. Предложен метод оценки достоверности сигналов канала передачи информации СИВ в виде вероятности правильного обнаружения  $P_{\text{прав.обн.}}$ , рассчитанной на основании алгоритма Неймана-Пирсона с помощью приведенной дисперсии суммарной погрешности  $\delta_{\varepsilon}^2$  и заданной вероятности ложного обнаружения  $P_{\text{лож.обн.}}$ .

5. Предложена методика проектирования нового материала с требуемыми оптоэлектронными характеристиками с помощью математического моделирования волновых процессов в квантовых ямах и сверхрешетках из обогащенных полупроводников, которая позволила оценить повышение длинноволновой границы фотоэффекта  $\lambda_{\text{зр}}$  для СВР из арсенида галлия на величину 0,1 мкм.

6. Проведен анализ улучшения оптоэлектронных характеристик материала и фотодетектора в зависимости от размеров элементной базы на примере обогащенного арсенида галлия, который позволил сделать следующие выводы:

1) квантовая эффективность  $\eta$  объемного кристалла и чувствительность  $R_i$  ФД (микроэлектроника) повысится не менее, чем в 1,23 раза;

2) квантовая эффективность  $\eta$  квантовой ямы и чувствительность  $R$  ФД (наноэлектроника) увеличится не менее, чем в 1,325 раза.

3) обнаруживающая способность  $D$  ФД увеличивается за счет снижения мощности шума  $P_{\text{ш}}$ , которое происходит в результате уменьшения темнового тока  $I_{\text{тем}}$  и увеличения чувствительности  $R$ , например, для объемных кристаллов значение  $D$  увеличивается в 2 раза;

4) длинноволновая границы фотоэффекта  $\lambda_{gr}$  для СВР из арсенида галлия повышается на величину 0,1 мкм.

7. Разработана методика оценки повышения качества сигналов для ФС и ФП из обогащенных полупроводников и проведены исследования на примере арсенида галлия, в результате которых сделаны следующие выводы:

1) отношение мощностей сигнал/шум ФД  $\rho_{выхфд}^2$  на объемных кристаллах повысится в 1,23 раза;

2) отношение мощностей сигнал/шум ФД  $\rho_{выхфд}^2$  на множественных квантовых ямах МКЯ повысится в 1,5 раза;

3) качество сигналов ФС на обогащенном материале повысится (погрешность  $\delta_{анфс}^2$  уменьшится): а) для объемных кристаллов в  $\cong 5$  раз, б) для МКЯ в  $\cong 31$  раз (при  $\rho_{выхфс}^2 = 10^5$ ;  $L_{кв} = 256$ );

4) качество сигналов ФП на обогащенном материале повысится (погрешность  $\delta_{анфп}^2$  уменьшится): а) для объемных кристаллов в  $\cong 9$  раз, б) для МКЯ увеличивается в  $\cong 71$  раз, в) вероятность ошибки на МКЯ  $P_{ошфп}$  уменьшится более, чем на три порядка;

5) качество канала передачи информации СИБ  $\rho_{вых}^2$  при условии  $P_{ошфс} \cong P_{ошфп} \approx 10^{-6}$  повысится (погрешность  $\delta_{\varepsilon}^2$  уменьшится): а) для объемных кристаллов в  $\cong 8$  раз, б) для МКЯ в  $\cong 51$  раз.

8. В результате проведенных исследований соответствия СИБ требованиям безопасности движения на ж/д, при которых вероятности обнаружения должны иметь значения  $P_{прав.обн.} \geq 0,9993$  и  $P_{лож.обн.} \leq 10^{-4}$ , сделан вывод: при условии применения ОЭУ нового поколения технические возможности канала передачи информации соответствуют требованиям повышения безопасности движения поездов.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. ГОСТ 33358–2015 Безопасность функциональная. Системы управления и обеспечения безопасности движения поездов. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2018. – 20 С.
2. СТО РЖД 1.02.003-2006 Методика оценки эффективности мероприятий по повышению безопасности движения поездов. – М. : ОАО «РЖД», 2006. – 29 С.
3. Астапенко, Е. В России увеличилось количество ДТП на ж/д переездах [Электронный ресурс] // Автомобильный журнал «КОЛЕСА». – 2018. URL: <https://www.kolesa.ru/news/v-rossii-uvelichilos-kolichestvo-dtp-na-zh-d-pereezdah> (дата обращения 13.03.2018).
4. Число ДТП на железнодорожных переездах [Электронный ресурс] // ТАСС. URL: <https://tass.ru/transport/6004935> (дата обращения: 10.02.2019).
5. Вьюгин, И. Ситуация с аварийностью на переездах остаётся тревожной. [Электронный ресурс]. URL: <https://gudok.ru/content/infrastructure/1490921/> (дата обращения 12.02.2020).
6. Ивашевский, М.Р. Качество сигналов систем интеллектуального видеонаблюдения / Л.М. Журавлева, М.Р. Ивашевский, Я.Ю. Мягков, Н.В. Яцкивский // Автоматика, связь, информатика. – 2018. – № 2. – С.2-5.
7. Маслюк, В. Эксперты ОАО «РЖД» выбрали лучшие гаджеты для безопасных переездов [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gudok.ru/infrastructure/?ID=1435370> (дата обращения 15.12.2018).
8. Ивашевский, М.Р. Оценка качества передачи сигналов систем интеллектуального видеонаблюдения / Л.М. Журавлева, М.Р. Ивашевский, Н.О. Ефимова, Н.В. Яцкивский // Проектирование и технология электронных средств. – 2017. – № 3. – С.10-15.
9. Модуль безопасности ж/д переезда [Электронный ресурс]. URL: [http://www.asec.ru/modul\\_bezopasnosti\\_zhd\\_pereezda.html](http://www.asec.ru/modul_bezopasnosti_zhd_pereezda.html) (дата обращения 02.03.2018).

10. Решение MOBOTIX для железнодорожного транспорта: контроль переездов, платформ и станций [Электронный ресурс]. URL: <http://mobotix.online/index.php/2009-10-28-00-49-28/366-railway-crosses> (дата обращения 25.05.2017).

11. New wireless technology to enable the gigabit train. Решение Fluidmesh для железнодорожного транспорта. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fluidmesh.com/wirelzzess-for-trains/> (дата обращения 25.05.2017).

12. Видеоаналитика на вооружении РЖД — система безопасности на базе "Интеллекта" внедрена Октябрьской железной дороге. [Электронный ресурс]. URL: [http://lib.secuteck.ru/newstext.php?news\\_id=95914](http://lib.secuteck.ru/newstext.php?news_id=95914) (дата обращения 24.10.2017).

13. Журавлева, Л.М. Снижение аварийных рисков с помощью систем интеллектуального видеонаблюдения / Л.М. Журавлёва, А.П. Богачёв, Н.В. Яцкицкий // Мир транспорта. – 2017. – № 3. – С. 206-212.

14. Видеоаналитика [Электронный ресурс]. URL: <https://synesis.ru/technology/videoanalitika> (дата обращения 09.11.2017).

15. Охотников, С.А. Распознавание видеоизображений объектов заданной формы на основе анализа их контуров [Электронный ресурс]: дисс. канд. техн. наук. – Йошкар-Ола, 2014. – 181 С. URL: <http://diss.vlsu.ru/index.php?id=34>.

16. Перов, А. И. Статистическая теория радиотехнических систем: учебное пособие/ А.И. Петров. – М. : Радиотехника, 2003. – 400 С.

17. Ивашевский, М.Р. Системы видеонаблюдения на железнодорожном транспорте // Мир транспорта. – 2019. – № 6. – С.244-260.

18. Распоряжение ОАО «РЖД» от 12 декабря 2017 г. № 2580р «О вводе в действие Регламента взаимодействия работников, связанных с движением поездов, с работниками локомотивных бригад при возникновении аварийных и нестандартных ситуаций на путях общего пользования инфраструктуры».

19. Бенчмаркинг (сопоставительный анализ) состояния безопасности движения ОАО «Российские железные дороги» и железных дорог Международного союза железных дорог по итогам 2018 года.

20. На МЖД возросла статистика аварий на переездах. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gudok.ru/news/?ID=1449930> (дата обращения 12.02.2020).

21. Федеральный закон от 25.04.2002 N 40-ФЗ (ред. от 01.05.2019) «Об обязательном страховании гражданской ответственности владельцев транспортных средств».

22. Распоряжение ОАО «РЖД» от 27 февраля 2013 г. № 531р «Об утверждении регламента взаимодействия филиалов при организации страховой защиты».

23. Орлов, С. Видеоаналитика: задачи и решения [Электронный ресурс] // Журнал сетевых решений LAN. – 2014. – № 6. – URL: <https://www.osp.ru/lan/2014/06/13041879/> (дата обращения 24.10.2019).

24. Анштедт, Т. Видеоаналитика: Мифы и реальность / Т. Анштедт, И. Келлер, Х. Лутц. – М. : Security Focus, 2012. – 176 С.

25. Горелов, В. Г. Теория передачи сигналов / В. Г. Горелов, А. Ф. Фомин, А.А. Волков – М. : Маршрут, 2012. – 415 С.

26. Как устроена видеоаналитика. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/post/271207/> (дата обращения 01.07.2019).

27. «Ласточки» станут зрячими и без помощи машиниста [Электронный ресурс]. URL: [https://www.gudok.ru/mec\\_hengineering/?ID=1468761](https://www.gudok.ru/mec_hengineering/?ID=1468761) (дата обращения 01.07.2019).

28. How to Make Railroad Crossings Safer and Smarter [Электронный ресурс]. URL: <https://ohsonline.com/Articles/2017/03/01/How-to-Make-Railroad-Crossings-Safer-and-Smarter.aspx> (дата обращения 30.11.2019).

29. Пресс-релиз компании Amplicon. Cutting-edge CCTV Level Crossing Surveillance System for Network Rail [Электронный ресурс]. URL: <https://www.amplicon.com/projects/cutting-edge-cctv-level-crossing-surveillance-system-network-rail/> (дата обращения 30.11.2019).



30. Video surveillance of level crossings. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.railwaypro.com/wp/video-surveillance-of-level-crossings/> (дата обращения 30.11.2019).

31. Teodor Turcu. Video surveillance of level crossings. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.railwaypro.com/wp/video-surveillance-of-level-crossings/> (дата обращения 20.01.2019).

32. Распоряжение от 19 марта 2019 года № 466-р [Электронный ресурс]: Об утверждении долгосрочной программы развития ОАО «РЖД» до 2025 года. URL: <http://government.ru/docs/36094/> (дата обращения 20.01.2020).

33. Гапанович, В.А. Цифровая железная дорога: настоящее и будущее. [Электронный ресурс] // Гудок. – 2016. – №152. URL: <https://www.gudok.ru/newspaper/?ID=1348652> (дата обращения 20.01.2020).

34. Аппаратно-программный комплекс автоматизированного управления движением поездов в условиях высокой интенсивности движения в режиме «автодиспетчер» – «автомашинист» [Электронный ресурс]. URL: [http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE\\_ID=666&layer\\_id=3290&refererLayerId=3290&id=4080#3](http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=666&layer_id=3290&refererLayerId=3290&id=4080#3) (дата обращения 30.11.2019).

35. Инновации РЖД [Электронный ресурс]. URL: [http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE\\_ID=666&layer\\_id=3290&refererLayerId=3290&id=3585](http://www.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=666&layer_id=3290&refererLayerId=3290&id=3585) (дата обращения 30.11.2019).

36. Скляр, О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи / О.К. Скляр. – М.: Солон-Пресс, 2004. – 261 С.

37. Ивашевский, М.Р. Повышение безопасности движения поездов с помощью систем интеллектуального видеонаблюдения / Л.М. Журавлева, М.Р. Ивашевский, Д.Г. Курьянцев, В.Л. Лошкарев // Перспективные технологии в средствах передачи информации (ПТСПИ-2019): Материалы XIII Международной научно-технической конференции. Владимир, 03-05 июля 2018 г. – ВлГУ, 2019. – С. 28-30.

38. Журавлёва, Л.М. Сетевая архитектура систем видеонаблюдения на железнодорожном транспорте / Л. М. Журавлёва, О.Е. Журавлёв, В.Л. Лошкарев, Д.Г. Курьянцев // Автоматика, связь, информатика. – 2018. – № 8. – С. 32-35.

39. Ивашевский, М.Р. Системы интеллектуального видеонаблюдения на базе мобильной связи / Л.М. Журавлева, М.Р. Ивашевский, Д.Г. Курьянцев, В.Л. Лошкарев // Перспективные технологии в средствах передачи информации (ПТСПИ-2019): Материалы XIII Международной научно-технической конференции. Владимир, 03-05 июля 2018 г. – ВлГУ, 2019. – С. 26-28.

40. Журавлёва, Л.М. Использование систем интеллектуального видеонаблюдения / Журавлева Л.М., Богачев А.П., Журавлев О.Е., Яцкинский Н.В. // Автоматика, связь, информатика. – 2017. - № 9. – С. 13-15.

41. Ивашевский, М.Р. Перспективный канал связи с движущимся поездом // Инновационный научные исследования в современном мире: Материалы II - Международной научно-практической конференции. Уфа, 28 февраля 2020 г. – НИЦ Вестник науки, 2020. – С. 33-39.

42. Волков, В.Г. Беспроводные оптические системы связи // Спецтехника и связь. – 2012. –№3. – С.2-9.

43. Технология FSO [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mostkom.ru> (дата обращения 30.11.2019).

44. Проектирование инфракрасного канала [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/2806677/> (дата обращения 25.01.2019).

45. R. Paudel. High speed train communications systems using free space optics / R. Paudel, H. Le-Minh, Z. Ghassemlooy , M. Ijaz, S. Rajbhand // Исследования Optical Communications Research Group, University of Northumbria, UK. [Электронный ресурс].URL:<https://pdfs.semanticscholar.org/2cc1/27cfe15efdf9211361b81887bb48333ac056.pdf>.

46. R. Paudel. Modelling of free space optical link for ground-to-train communications using a Gaussian source / R. Paudel, Z. Ghassemlooy, H. Li. Minh, S.Rajbhanderi // IET Optoelectronics. – 2013.– VOL.1 – №7. – P.1-8.

47. M.Sivaranjani. System Performance of Free Space Optics in Underground Moving Train Using Optisystem 14 / M.Sivaranjani, Dr.J.Vidhya // Asian Journal of Applied Science and Technology (AJAST). – 2017. – VOL.1 – №3. – P.232-235.

48. Н. Kotake. A new ground-to-train communication system using free-space optics technology / Н. Kotake, Т. Matsuzawa, А. Shimura, S. Haruyama, М. Nakagawa // WIT Transactions on The Built Environment. – 2006. – Vol. 88. – P.683 – 692.

49. Пат. 2155450 С1 Российская Федерация, МПК H04B 10/12. Устройство двусторонней оптической связи [Текст] / Зеленюк Ю.И. Огнев И.В. Поляков С.Ю. Широбакин С.Е.; заявитель и патентообладатель Государственное унитарное предприятие Государственный Рязанский приборный завод - дочернее предприятие государственного унитарного предприятия Военно-промышленного комплекса "МАПО". - № 99113518/09; заяв. 21.06.1999; опубл. 27.08.2000. – 14 С.

50. Пат. 2451397 С2 Российская Федерация, МПК H04B 10/10. Устройство системы оптической связи с автоматическим сопровождением светового луча на приемнике информации [Текст] / Ширанков А.Ф. Аниканов А.Г., Штыков С.А., Горелов А.М., Гусев К.В.; заявитель и патентообладатель Корпорация "САМСУНГ ЭЛЕКТРОНИКС Ко., Лтд." (KR). - № 2009137969/07; заявл. 14.10.2009; опубл. 20.05.2012. – 10 С.

51. Пат. 2225024 С1 Российская Федерация, МПК G 02 В 27/64. Система стабилизации изображения на подвижном основании [Текст] / Патрушев И.П., Лабзин Е.М.; заявитель и патентообладатель ОАО Арзамасское научно-производственное предприятие «ТЕМП-АВИА». - № 2002117561/28; заявл. 01.07.2002; опубл. 27.02.2004. – 10 С.

52. Пат. 57995 U1 Российская Федерация, МПК H04B 17/00. Система беспроводной оптической связи [Текст] / Вишневский В.В., Мацнев Д.Н., Поляков С.Ю., Кузнецов С.Н.; заявитель и патентообладатель Вишневский В.В. - № 2006120272/22; заявл. 09.06.2006; опубл. 27.10.2006. – 20 С.

53. Пат. 2281610 С1 Российская Федерация, МПК H04B 10/10. Устройство передачи данных через открытый оптический атмосферный канал связи [Текст] / Блюмин А.В., Вишневский В.М., Дмитриев В.П., Коршунов И.В., Кузнецов Н.А.;

заявитель и патентообладатель Блюмин А.В., Вишневский В.М., Дмитриев В.П., Коршунов И.В., Кузнецов Н.А. - № 2005102418/09; заявл. 01.02.2005; опубл. 10.08.2006. – 8 С.

54. Ивашевский, М.Р. Новые материалы в оптоэлектронике / Л.М. Журавлева, М.Р. Ивашевский, И.Ф. Музафаров // Мир транспорта. – 2018. – № 2. – С.74-83.

55. Журавлёва, Л.М. Потенциальные возможности повышения пропускной способности оптического канала связи / Л.М. Журавлева, А.В. Новожилов, А.С. Кручинин // Успехи современной радиоэлектроники. – 2013. – № 7. – С. 11- 15.

56. Ричардсон, Я. Видеокодирование. H.264 и MPEG-4 – стандарты нового поколения / Я. Ричардсон. – М. : Техносфера, 2005. - 368 С.

57. Pulido J. A. Video quality evaluation in IP videoconference between fixed and mobile devices // С.: Universitat Politecnica de Catalunya, 2008. 66 С.

58. Ивашевский, М.Р. Повышение качества сигналов системы интеллектуального видеонаблюдения / Л.М. Журавлева, М.Р. Ивашевский, Д.Г. Курьянцев, В.Л. Лошкарев // Проектирование и технология электронных средств. – 2018. – № 1. – С.37-44.

59. Лебедев, А.И. Физика полупроводниковых приборов / А.И. Лебедев. – М. : Физматлит, 2008. – 488 С.

60. Убайдуллаев, Р.Р. Волоконно-оптические сети /Р.Р. Убайдуллаев - М.: Эко-Трендз, 1998.- 267 С.

61. Фриман, Р.Л. Волоконно-оптические системы связи / Р.Л. Фриман – М.: Техносфера, 2003. – 590 С.

62. Носов, Ю.Р. Основы физики приборов с зарядовой связью / Ю.Р. Носов, В.А. Шилин. – М.: Наука, 1986. – 318 С.

63. Милчев, М. Тенденции в цифровой фотографии. Часть 3 (ПЗС-матрицы) [Электронный ресурс] // онлайн-издание 3DNews Daily Digital Digest. URL: <https://3dnews.ru/digital/photo-matrix>. (дата обращения 15.07.2019).

64. Размер матрицы все, что нужно знать [Электронный ресурс]. URL: [fotosklad.ru/expert/photo/article/razmer-matritsy-vse-chto-nuzhno-znat.html](https://fotosklad.ru/expert/photo/article/razmer-matritsy-vse-chto-nuzhno-znat.html). (дата обращения 14.10.2019).

65. Хоувза, М. Приборы с зарядовой связью / М. Хоувза, Д. Моргана – М. : Энергоиздат, 1981. – 372 С.

66. Верещагин, И.К. Физика твердого тела / И.К. Верещагин, С.М. Кокин, В.А. Никитенко. – М.: Высшая школа, 2001 – 193 С.

67. Розеншер, Э. Оптоэлектроника. Перевод с франц. под ред. О.Н. Ермакова. 2-ое издание / Э. Розеншер, Б. Винтер. – М. : Техносфера, 2004. – 592 С.

68. Стерлинг, Д. Техническое руководство по волоконной оптике / Д. Стерлинг. – М.: Лори, 1998. – 288 С.

69. Вентцель, Е.С. Прикладные задачи теории вероятностей / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Радио и связь, 1983. – 414 С.

70. Дамьяновски, В. CCTV. Библия видеонаблюдения. Цифровые и сетевые технологии / В. Дамьяновски. – М.: Ай-Эс-Эс Пресс, 2006. - 478 С.

71. Ивашевский, М.Р. Повышение безопасности движения поездов с помощью систем интеллектуального видеонаблюдения / Л.М. Журавлева, М.Р. Ивашевский, Д.Г. Курьянцев, В.Л. Лошкарев // Перспективные технологии в средствах передачи информации (ПТСПИ-2019): Материалы XIII Международной научно-технической конференции. Владимир, 03-05 июля 2019 г. – ВлГУ, 2019. – С. 28-30.

72. Дмитриев, С.А. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и перспективы / С.А. Дмитриев, Н.Н. Слепов. – М. : Волоконно-оптическая техника, 2005. – 576 С.

73. Мартинес-Дуарт, Д. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники / Д. Мартинес-Дуарт, Р. Мартин-Палма, Ф. Агулло-Руеда. – М.: Техносфера, 2009. – 367 С.

74. Дьяконов, В.П. Mathcad в математике / В.П. Дьяконов. – М.: Горячая линия - Телеком, 2007. –547-553 С.

75. Plekhanov, V.G. Using isotopic effect in nanostructures / V.G. Plekhanov, L.M. Zhuravleva, N.M. Legkiy // Life Science Journal. – 2014. – Vol.11 – № 7 – P. 306 – 309.

76. Zhuravleva, L. M. Isotopic nanostructures / L.M. Zhuravleva, V.G. Plekhanov, N.M. Legkiy // Life Science Journal. – 2014. – Vol.11 – № 8 – P. 331 – 335.

77. Усанов, Д.А. Компьютерное моделирование наноструктур: учебное пособие для студентов факультета нано- и биомедицинских технологий / Д.А.Усанов, Ал. В. Скрипаль, Ан. В. Скрипаль, А.В. Абрамов. – Саратов: Изд-во Саратовского государственного университета, 2013. – 100 С.

78. Борисенко, С.И. Физика полупроводниковых наноструктур: учебное пособие / С.И. Борисенко. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 115 С.

79. Использование полупроводниковых фотоприемников в космической технике [Электронный ресурс]. URL: <https://present5.com/ispolzovanie-poluprovodnikovyx-fotopriemnikov-v-kosmi-cheskoj-texnike-soobshhenie-podgotovili/>. (дата обращения 14.10.2019).

80. Гусев, А.В. Получение и свойства стабильных изотопов кремния высокой химической и изотопической чистоты [Электронный ресурс] / А.В. Гусев, В.А. Гавва, А.М. Гибин // URL:<http://www.myshared.ru/slide/636165/> (дата обращения 17.04.2018).

81. Разделение изотопов [Электронный ресурс] // URL:[wikipedia.org/w/index.php?title=Разделение\\_изотопов&oldid=62541612](http://wikipedia.org/w/index.php?title=Разделение_изотопов&oldid=62541612) (дата обращения 25.03.2020).

82. Kato, J. Host isotope effect on the localized vibrational modes of oxygen in isotopically enriched  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{Si}$  and  $^{30}\text{Si}$  single crystals / Jiro Kato, Kohei M. Itoh // Physical Review B 68, 035205 (2003).

83. Герасименко, Н.Н. Кремний – материал нанoeлектроники / Н.Н. Герасименко, Ю.Н. Пархоменко – М.: Техносфера, 2007. - 352 С.

84. Zhuravleva, L.M. Improving the quality of photodetectors using isotopic nanoengineering methods / L.M. Zhuravleva, N.M. Legkiy // Nanotechnologies in Russia – 2019. – № 14 – P. 3-4.

85. Журавлева, Л.М. Изотопитроника – новое направление нанонауки / Л.М. Журавлева, В.Г. Плеханов // Нанотехника – 2012. – № 1 – С.88-93.

86. Верещагин, И.К. Введение в оптоэлектронику / И.К. Верещагин, Л.А. Косяченко, С.М. Кокин. – М. : Высшая школа, 1991. — 191 С.

87. Богданова, В.А., Эффективная масса электронов в сильно легированном арсениде галлия при упорядочении примесных комплексов /В.А. Богданова, Н.А. Давлеткильдеев, Н.А. Семиколенова, Е.Н. Сидоров // Физика и техника полупроводников – 2002. – Том № 36 – № 4. – С. 407- 411.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

БДП – безопасность движения поездов;

ДТП – дорожно-транспортное происшествие;

ж/д – железная дорога;

СИВ – система интеллектуального видеонаблюдения;

МБЖДП – модуль безопасности железнодорожного переезда;

ПРС – поездная радиосвязь;

ЕДЦУ – единый диспетчерский центр управления;

ДНЦ – поездной диспетчер;

ДСП – дежурный по станции;

СИРДП-Е – система интервального регулирования движения поездов по радиоканалу;

с/ш – отношение мощностей сигнала и шума;

ОРУ – оптимальное решающее устройство;

ВОСП – волоконно-оптическая система передачи информации;

СПД ОТН – сеть передачи данных оперативно-технологического назначения;

xDSL – цифровая абонентская линия;

БС – базовая станция;

БОКС – беспроводной оптический канал связи;

ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи;

MUX – мультиплексор;

ФС – фотосенсор;

ФП – фотоприёмник;

ФМ – фотоматрица;

ФД – фотодетектор;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

ПЗС – прибор с зарядной связью;

МКЯ – множественные квантовые ямы;



КЯ – квантовая яма;

ФП на МКЯ – квантово-размерный фотоприёмник на множественных квантовых ямах;

ВФЭ – внутренний фотоэффект;

АИМ – амплитудно-импульсно-модулированный сигнал;

ПРВ – плотность распределения вероятностей;

ИКМ – импульсно-кодовая модуляция;

ОК – объемный кристалл;

СВР – сверхрешётка;

$\delta_\varepsilon^2$  – приведенная дисперсия суммарной погрешности;

$\delta_{\text{фс}}^2$  – приведенная дисперсия погрешности сигнала на выходе ФС;

$\delta_{\text{кв}}^2$  – приведенная дисперсия погрешности квантования;

$\delta_{\text{анфс}}^2$  – приведенная дисперсия аномальной погрешности ФС;

$\delta_{\text{л}}^2$  – приведенная дисперсия погрешности, вносимой линией связи;

$\delta_{\text{анфп}}^2$  – приведенная дисперсия аномальной погрешности ФП;

$\delta_{\text{и}}^2$  – приведенная дисперсия погрешности интерполяции;

$\alpha_{\text{вх}}^2$  – отношение с/ш на входе ОРУ;

$\rho_{\text{вых}}^2$  – отношение с/ш на выходе канала передачи информации;

$\rho_{\text{выхфм}}^2$  – отношение с/ш на выходе ФМ;

$\rho_{\text{выхфд}}^2$  – отношение мощностей сигнал/шум на выходе ФД

$\eta$  – квантовая эффективность;

$\sigma_{\text{фп}}$  – фотопроводимость материала ФД;

$\lambda$  – длина волны света;

$S_i$  – интегральная чувствительность пикселя;

$I_{\text{тем}}$  – темновой ток;

$q$  – заряд электрона;

$D$  – обнаруживающая способность ФД;

$h$  – амплитуда шума пикселя;

$\Delta_{кв}$  – шаг квантования;

$L_{кв}$  – число уровней квантования;

$\sigma_{hfn}^2$  – дисперсия (мощность) шума ФД;

$R$  – чувствительность ФД;

$g$  – коэффициент усиления;

$\alpha$  – коэффициент поглощения света;

$\lambda_{зр}$  – длинноволновая граница фотоэффекта;

$m_{эф}$  – эффективная масса электрона;

$\psi(x)$  – волновая функция электрона;

$\mu_n$  – подвижностью электрона;

$p_0$  – концентрация электронов в отсутствии света;

$\tau$  – время жизни носителя заряда;

$N$  – число КЯ;

$\Delta f$  – ширина полосы детектирования;

$P_{ш}$  – мощность шума ФД (порог чувствительности);

$P_{вх}$  – мощность излучения на входе ФД;

$E_g$  – ширина запрещенной зоны полупроводника;

$E_n$  – уровень квантования;

$\Delta E_{щ}$  – ширина щели СВР;

$K$  – выигрыш в отношении с/ш на выходе ФД за счёт обогащения материала;

$m$  – выигрыш в качестве сигнала на выходе ФП за счёт обогащения материала;

$n$  – выигрыш в качестве сигнала на выходе ФС за счёт обогащения материала;

$\chi$  – выигрыш в качестве сигнала канала передачи информации;

$P_{ошфс}$  – вероятности ошибки на выходе ФС;

$P_{ошфп}$  – вероятности ошибки на выходе ФП;

$P_{лож.обн.}$  – вероятность ложного обнаружения СИВ;

$P_{прав.обн.}$  – вероятность правильного обнаружения СИВ;

$P_{пропуск}$  – вероятность пропуска.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

1. Решение трансцендентного уравнения с помощью численных методов для прямоугольной КЯ из *GaAs* с одним разрешенным энергетическим уровнем

Основные константы

Масса электрона  $m_e := 9.1093897 \cdot 10^{-31}$

Заряд электрона  $q_e := 1.60217733 \cdot 10^{-19}$

Постоянная планка с чертой  $\hbar := \frac{6.6260755 \cdot 10^{-34}}{2\pi}$

Свойства соединения  $Al_x Ga_{1-x} As$

$m_n(x) := (0.067 + 0.083 \cdot x) \cdot m_e$   $\Gamma$  - Минимум

$E_g(x) := \text{if}(x < 0.45, 1.424 + 1.247x, 1.9 + 0.125x + 0.143x^2) \cdot q_e$

$a_0(x) := (0.56533 + 0.00078 \cdot x) \cdot 10^{-9}$  - постоянная решетки

Квантовая яма со стенками конечной высоты

$$j := \sqrt{-1}$$

Условия задачи:

Полупроводниковый материал  
квантовой ямы:

$$x_A := 0 \quad m_A := m_n(x_A)$$

Полупроводниковый материал  
потенциального барьера:

$$x_B := 0.3 \quad m_B := m_n(x_B)$$

Ширина квантовой ямы -  $a$  периодов решетки

$$a := 6 \cdot a_0(x_A) = 3.392 \times 10^{-9}$$

$$a \cdot 10^9 = 3.392$$

Зонная диаграмма структуры (в электрон-вольтах, энергия отсчитывается от дна зоны проводимости в яме)

$$V := E_g(x_B) - E_g(x_A)$$

$$V_{эв} := \frac{V}{q_e} = 0.374$$

Высота потенциального барьера

$$E_c(z) := \text{if}\left(|z| < \frac{a}{2}, 0, V_{эв}\right)$$

$$U(z) := E_c(z) \cdot q_e$$

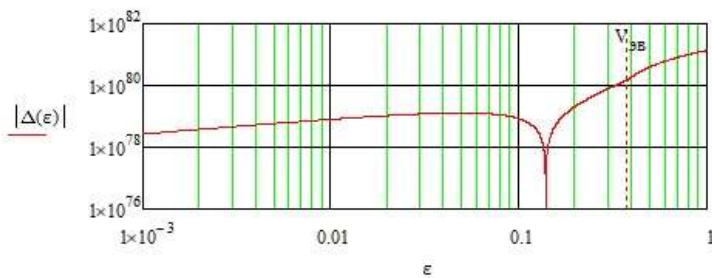
$$\gamma(E_z) := \frac{\sqrt{2m_A \cdot E_z}}{\hbar}$$

$$\beta(E_z) := \frac{\sqrt{2m_B \cdot (V - E_z)}}{\hbar}$$

$$D(E) := \begin{pmatrix} e^{-\beta(E) \cdot \frac{a}{2}} & -j \cdot \gamma(E) \cdot \frac{a}{2} & j \cdot \gamma(E) \cdot \frac{a}{2} & 0 \\ \frac{\beta(E)}{m_B} \cdot e^{-\beta(E) \cdot \frac{a}{2}} & \frac{j \cdot \gamma(E)}{m_A} \cdot e^{-j \cdot \gamma(E) \cdot \frac{a}{2}} & \frac{j \cdot \gamma(E)}{m_A} \cdot e^{j \cdot \gamma(E) \cdot \frac{a}{2}} & 0 \\ 0 & e^{j \cdot \gamma(E) \cdot \frac{a}{2}} & -e^{-j \cdot \gamma(E) \cdot \frac{a}{2}} & -e^{-\beta(E) \cdot \frac{a}{2}} \\ 0 & \frac{j \cdot \gamma(E)}{m_A} \cdot e^{j \cdot \gamma(E) \cdot \frac{a}{2}} & \frac{j \cdot \gamma(E)}{m_A} \cdot e^{-j \cdot \gamma(E) \cdot \frac{a}{2}} & \frac{\beta(E)}{m_B} \cdot e^{-\beta(E) \cdot \frac{a}{2}} \end{pmatrix}$$

$\varepsilon_1 := 0.00$  ( $\Delta \varepsilon_1 := 2\varepsilon_1$ ) Нули определителя ищутся графически.

$$\xi_{\text{min}} := \varepsilon_1, \Delta \varepsilon_1 \dots 3 \quad \Delta(E) := ||D(E \cdot q_e)|| \rightarrow |1.287568875198778486e80e^{-3.2164497519303}$$



$$B_2(E) := A_1(E) \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + j \cdot \frac{\beta(E)}{\gamma(E)} \cdot \frac{m_A}{m_B} \right) \cdot e^{-(j \cdot \gamma(E) + \beta(E)) \cdot \frac{a}{2}}$$

$$B_3(E) := A_1(E) \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot \left( 1 - j \cdot \frac{\beta(E)}{\gamma(E)} \cdot \frac{m_A}{m_B} \right) \cdot e^{j \cdot \gamma(E) \cdot a} + \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + j \cdot \frac{\beta(E)}{\gamma(E)} \cdot \frac{m_A}{m_B} \right) \cdot e^{-j \cdot \gamma(E) \cdot a} \right]$$

$$\psi_1(E, z) := A_1(E) \cdot e^{\beta(E) \cdot z}$$

$$\psi_2(E, z) := A_2(E) \cdot e^{j \cdot \gamma(E) \cdot z} + B_2(E) \cdot e^{-j \cdot \gamma(E) \cdot z}$$

$$\psi_3(E, z) := B_3(E) \cdot e^{-\beta(E) \cdot z}$$

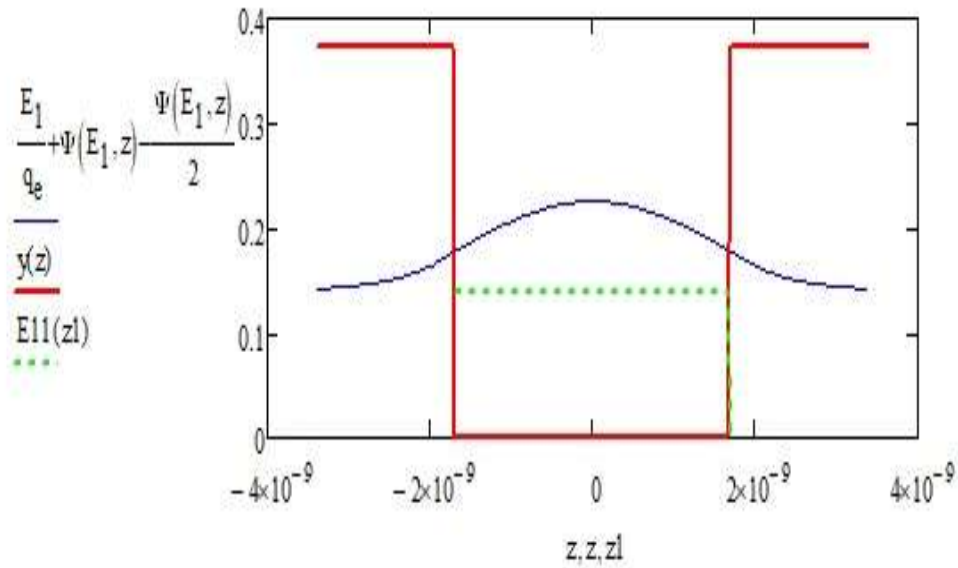
$$\Psi(E, z) := \text{if} \left[ z < -\frac{a}{2}, (|\psi_1(E, z)|)^2, \text{if} \left[ z > \frac{a}{2}, (|\psi_3(E, z)|)^2, (|\psi_2(E, z)|)^2 \right] \right]$$

$$E11(z) := \text{if} \left( z < -\frac{a}{2}, 0, \text{if} \left( z > \frac{a}{2}, 0, \frac{E_1}{q_e} \right) \right)$$

$$z := -a, -a \cdot 0.99 \dots a$$

$$z1 := \frac{-a}{2}, \frac{-a \cdot 0.99}{2} \dots \frac{a}{2}$$

$$y(z) := \text{if} \left( z < -\frac{a}{2}, V_{эБ}, \text{if} \left( z > \frac{a}{2}, V_{эБ}, 0 \right) \right)$$



## 2. Решение трансцендентного уравнения с помощью численных методов для прямоугольной КЯ из *GaAs* с двумя разрешенными энергетическими уровнями

Масса электрона  $m_e := 9.1093897 \cdot 10^{-31}$

Заряд электрона  $q_e := 1.60217733 \cdot 10^{-19}$

Постоянная планка с чертой  $\hbar := \frac{6.6260755 \cdot 10^{-34}}{2\pi}$

Свойства соединения  $Al_x Ga_{1-x} As$

$m_n(x) := (0.067 + 0.083 \cdot x) \cdot m_e$   $\Gamma$  - Минимум

$E_g(x) := \text{if}(x < 0.45, 1.424 + 1.247x, 1.9 + 0.125x + 0.143x^2) \cdot q_e$

$a_0(x) := (0.56533 + 0.00078 \cdot x) \cdot 10^{-9}$  - постоянная решетки

Квантовая яма со стенками конечной высоты

$$j := \sqrt{-1}$$

Условия задачи:

Полупроводниковый материал квантовой ямы:

$$x_A := 0 \quad m_A := m_n(x_A)$$

Полупроводниковый материал потенциального барьера:

$$x_B := 0.3 \quad m_B := m_n(x_B)$$

Ширина квантовой ямы - 20 периодов решетки

$$a := 20 \cdot a_0(x_A) = 1.131 \times 10^{-8}$$

$$a \cdot 10^9 = 11.307$$

Зонная диаграмма структуры (в электрон-вольтах, энергия отсчитывается от дна зоны проводимости в яме)

$$V = \frac{E_g(x_B) - E_g(x_A)}{2} \quad V_{зв} = \frac{V}{q_e} = 0.187$$

Высота потенциального барьера

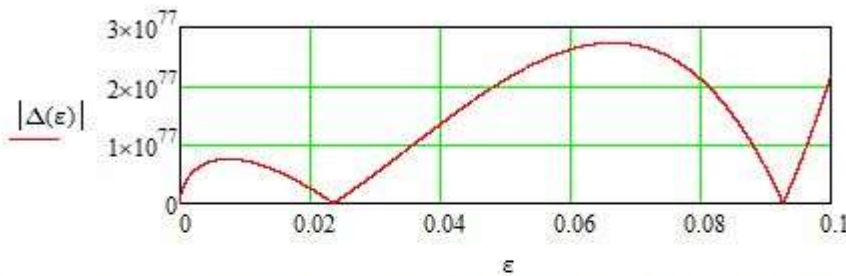
$$E_c(z) = \begin{cases} 0 & |z| < \frac{a}{2} \\ V_{зв} & |z| > \frac{a}{2} \end{cases} \quad U(z) = E_c(z) \cdot q_e$$

$$\gamma(E_z) = \frac{\sqrt{2m_A \cdot E_z}}{h} \quad \beta(E_z) = \frac{\sqrt{2m_B \cdot (V - E_z)}}{h} \quad +$$

$$D(E) = \begin{pmatrix} e^{-\beta(E) \cdot \frac{a}{2}} & -j \cdot \gamma(E) \cdot \frac{a}{2} \cdot e^{-\beta(E) \cdot \frac{a}{2}} & j \cdot \gamma(E) \cdot \frac{a}{2} \cdot e^{-\beta(E) \cdot \frac{a}{2}} & 0 \\ \frac{\beta(E)}{m_B} \cdot e^{-\beta(E) \cdot \frac{a}{2}} & -j \cdot \gamma(E) \cdot \frac{a}{2} \cdot e^{-\beta(E) \cdot \frac{a}{2}} & j \cdot \gamma(E) \cdot \frac{a}{2} \cdot e^{-\beta(E) \cdot \frac{a}{2}} & 0 \\ 0 & j \cdot \gamma(E) \cdot \frac{a}{2} \cdot e^{-\beta(E) \cdot \frac{a}{2}} & -j \cdot \gamma(E) \cdot \frac{a}{2} \cdot e^{-\beta(E) \cdot \frac{a}{2}} & -\beta(E) \cdot \frac{a}{2} \cdot e^{-\beta(E) \cdot \frac{a}{2}} \\ 0 & j \cdot \gamma(E) \cdot \frac{a}{2} \cdot e^{-\beta(E) \cdot \frac{a}{2}} & -j \cdot \gamma(E) \cdot \frac{a}{2} \cdot e^{-\beta(E) \cdot \frac{a}{2}} & \frac{\beta(E)}{m_B} \cdot e^{-\beta(E) \cdot \frac{a}{2}} \end{pmatrix}$$

Нули определителя ищутся графически.

$$\varepsilon_{\omega} = 0.00000001, 0.00001 \dots 0.1 \quad \Delta(E) = ||D(E \cdot q_e)|| \rightarrow |6.4378443759938924303e79 \cdot e^{-1.0721}$$



Из графика зависимости определителя системы от энергии электрона можно определить приближенные значения разрешенных энергий электрона в квантовой яме

$$E_1 = 0.0236q_e \quad E_2 = 0.09266 \cdot q_e \quad E_3 = 0.18521q_e$$

$$A_1(E) = 3$$

$$A_2(E) = A_1(E) \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( 1 - j \cdot \frac{\beta(E)}{\gamma(E)} \cdot \frac{m_A}{m_B} \right) \cdot e^{(j \cdot \gamma(E) - \beta(E)) \cdot \frac{a}{2}} \quad +$$

$$B_2(E) = A_1(E) \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + j \cdot \frac{\beta(E)}{\gamma(E)} \cdot \frac{m_A}{m_B} \right) \cdot e^{-(j \cdot \gamma(E) + \beta(E)) \cdot \frac{a}{2}}$$

$$B_3(E) := A_1(E) \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot \left( 1 - j \cdot \frac{\beta(E)}{\gamma(E)} \cdot \frac{m_A}{m_B} \right) \cdot e^{j \cdot \gamma(E) \cdot a} + \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + j \cdot \frac{\beta(E)}{\gamma(E)} \cdot \frac{m_A}{m_B} \right) \cdot e^{-j \cdot \gamma(E) \cdot a} \right]$$

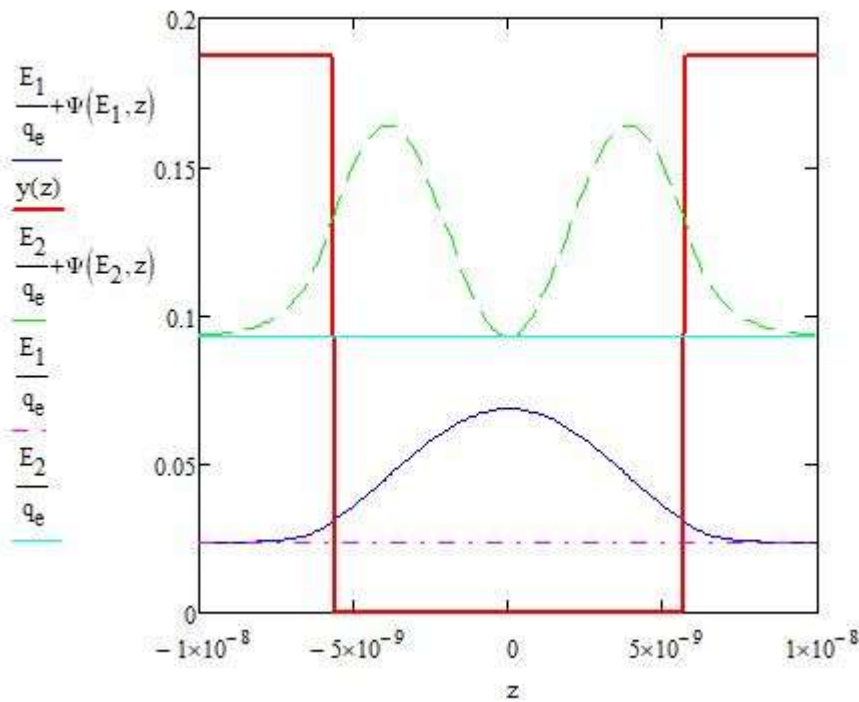
$$\psi_1(E, z) := A_1(E) \cdot e^{\beta(E) \cdot z}$$

$$\psi_2(E, z) := A_2(E) \cdot e^{j \cdot \gamma(E) \cdot z} + B_2(E) \cdot e^{-j \cdot \gamma(E) \cdot z}$$

$$\psi_3(E, z) := B_3(E) \cdot e^{-\beta(E) \cdot z}$$

$$\Psi(E, z) := \text{if} \left[ z < -\frac{a}{2}, (|\psi_1(E, z)|)^2, \text{if} \left[ z > \frac{a}{2}, (|\psi_3(E, z)|)^2, (|\psi_2(E, z)|)^2 \right] \right]$$

$$z := -10 \cdot 10^{-9}, -9.9 \cdot 10^{-9} .. 10 \cdot 10^{-9} \quad y(z) := \text{if} \left( z < -\frac{a}{2}, V_{\text{zB}}, \text{if} \left( z > \frac{a}{2}, V_{\text{zB}}, 0 \right) \right)$$



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Исследования энергетических характеристик сверхрешеток (СВР)

1. Решение трансцендентного уравнения с помощью численных методов в Mathcad:

$$\begin{aligned}
 \hbar &:= 1.602 \cdot 10^{-19} \\
 h &:= 1.055 \cdot 10^{-34} \\
 m_0 &:= 9.11 \cdot 10^{-31} \\
 V &:= 0.3 \\
 m &:= 0.067 m_0 \\
 k_0(E) &:= \sqrt{\frac{2m \cdot E \cdot e}{h^2}} \\
 q(E) &:= \sqrt{\frac{2m \cdot (V - E) \cdot e}{h^2}} \\
 f_1(E, a, b) &:= \left( \frac{q(E)^2 - k_0(E)^2}{2 \cdot q(E) \cdot k_0(E)} \right) \cdot \sinh(q(E) \cdot b) \cdot \sin(k_0(E) \cdot a) + \cosh(q(E) \cdot b) \cdot \cos(k_0(E) \cdot a)
 \end{aligned}$$

Given

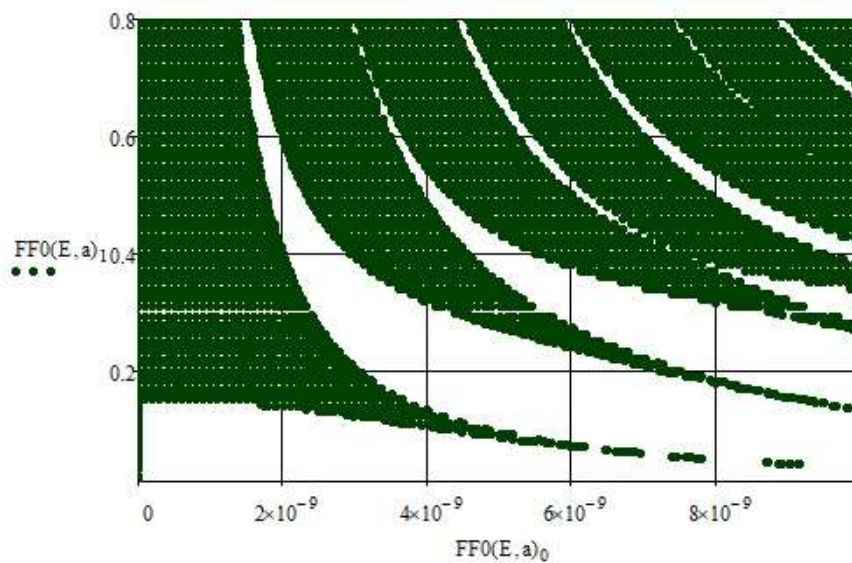
$$|f_1(E, a, a)| \leq 1$$

$$FF_0(E, a) := \text{Find}(a, E)$$

$$E := 0, 0.01 \dots 0.8$$

$$a := 0, 0.1 \cdot 10^{-9} \dots 10 \cdot 10^{-9}$$

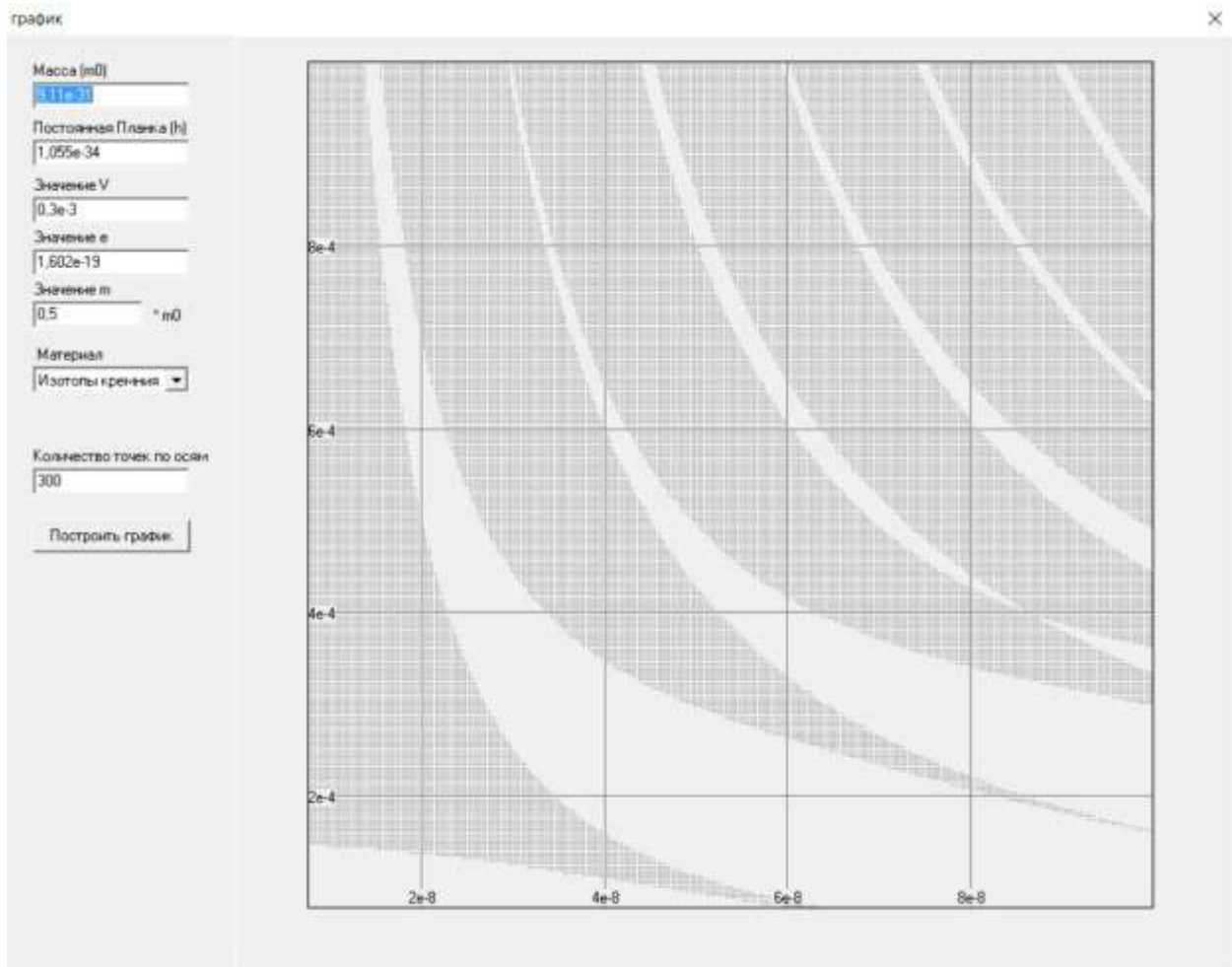
$$f_1(E, a, b) := \left( \frac{q(E)^2 - k_0(E)^2}{2 \cdot q(E) \cdot k_0(E)} \right) \cdot \sinh(q(E) \cdot b) \cdot \sin(k_0(E) \cdot a) + \cosh(q(E) \cdot b) \cdot \cos(k_0(E) \cdot a)$$





## 2. Решение трансцендентного уравнения с помощью численных методов в

Delphi:

**Текст программа Delphi:**

```

unit MainForm;
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, ExtCtrls, math;
type
  TfmMain = class(TForm)
    leM0: TLabeledEdit;
    leH: TLabeledEdit;
    leV: TLabeledEdit;
    leE: TLabeledEdit;
    btDraw: TButton;
    leCnt: TLabeledEdit;
    pnMain: TPanel;
    pbPlot: TPaintBox;
    leM: TLabeledEdit;
    Label1: TLabel;
    Label2: TLabel;
    cbMaterial: TComboBox;
    procedure pbPlotPaint(Sender: TObject);
    procedure btDrawClick(Sender: TObject);
  end;

```

```

    procedure FormResize(Sender: TObject);
    procedure cbMaterialChange(Sender: TObject);
private
    { Private declarations }
public
    { Public declarations }
end;
var
    fmMain: TfmMain;
implementation
uses cmplx;
{$R *.dfm}
function UniStrToFloat(Value: string): extended;
var
    OldDecSep: char;
    s : string;
    function ReplaceStr(const S, Srch, Replace: string): string;
    var
        I: Integer;
        Source: string;
    begin
        Source := S;
        Result := "";
        repeat
            I := Pos(Srch, Source);
            if I > 0 then begin
                Result := Result + Copy(Source, 1, I - 1) + Replace;
                Source := Copy(Source, I + Length(Srch), MaxInt);
            end
            else Result := Result + Source;
        until I <= 0;
    end;
begin
    Value := Trim(Value);
    if Value="" then
        begin
            Result:=0;
            Exit;
        end;
    //s := value;
    s := ReplaceStr(Value, ',', '.');
    try
        Result := StrToFloat(s);
    except
        OldDecSep := DecimalSeparator;
        DecimalSeparator := '.';
        try
            Result := StrToFloat(s);
        finally
            DecimalSeparator := OldDecSep;
        end;
    end;
end;
procedure TfmMain.pbPlotPaint(Sender: TObject);
var e,m0,h,V,m,EE,a,b,amin,amax, Emin, Emax, stepa,stepE, tmp: TComplex;
    SegmentCnt, PlotX, PlotY, i,j: integer;
    drawx, drawx1, drawx2, drawx3: boolean;

```

```

draw, draw1, draw2, draw3: boolean;
XLinesValues: array [1..4] of extended;
XLinesValuesName: array [1..4] of string;
YLinesValues: array [1..4] of extended;
YLinesValuesName: array [1..4] of string;
function Cmplx(x,y: extended): TComplex;
begin
  Result.x := x;
  Result.y := y;
end;
procedure DrawHorizLine(ValueText: string);
var y: integer;
begin
  with pbPlot.Canvas do
    begin
      y := pbPlot.Height - round(j *(pbPlot.Height/SegmentCnt));
      moveTo (0, y);
     .lineTo (pbPlot.Width-1, y);
      pbPlot.Canvas.TextOut(0, pbPlot.Height - round(j *(pbPlot.Height/SegmentCnt)) - 5, ValueText);
    end;
  end;
procedure DrawVertLine(ValueText: string);
var x: integer;
begin
  with pbPlot.Canvas do
    begin
      x := round(i *(pbPlot.Width/SegmentCnt));
      moveTo (x, pbPlot.Height-1);
     .lineTo (x, 0);
      pbPlot.Canvas.TextOut(round(i *(pbPlot.Width/SegmentCnt))-10, pbPlot.Height-15 , ValueText);
    end;
  end;
function k0: TComplex;
var tmp: TComplex;
begin
  tmp := cMul(h, h);
  Result := cMul(TwoComplex, m);
  Result := cMul(Result, e);
  Result := cMul(Result, EE);
  Result := cDiv(Result, tmp);
  Result := cSqrt(Result);
end;
function q: TComplex;
var tmp: TComplex;
begin
  Result := cMul(TwoComplex, m);
  Result := cMul(Result, e);
  tmp := cSub(V, EE);
  Result := cMul(Result, tmp);
  tmp := cMul(h, h);
  Result := cDiv(Result, tmp);
  Result := cSqrt(Result);
end;
function f1: TComplex;
var t1,t2,t3: TComplex;
    tmp,tmp1: TComplex;
begin

```

```

t1 := q;
t2 := b;
t3 := k0;
Result := cMul(t1, t2);
Result := cSinh(Result);
tmp := cMul(t3, a);
tmp := cSin(tmp);
Result := cMul(Result, tmp);
tmp := cMul(t1, t1);
tmp1 := cMul(t3, t3);
tmp := cSub(tmp, tmp1);
Result := cMul(Result, tmp);
tmp := cMul(TwoComplex, t1);
tmp := cMul(tmp, t3);
Result := cDiv(Result, tmp);
tmp := cMul(t1, t2);
tmp := cCosh(tmp);
tmp1 := cMul(t3, a);
tmp1 := cCos(tmp1);
tmp := cMul(tmp, tmp1);
Result := cSum(Result, tmp);
end;
begin
SegmentCnt := StrToInt(leCnt.Text);
e := Cmplx(UniStrToFloat(leE.Text), 0);
m0 := Cmplx(UniStrToFloat(leM0.Text), 0);
h := Cmplx(UniStrToFloat(leH.Text), 0);
V := Cmplx(UniStrToFloat(leV.Text), 0);
m := cMul(Cmplx(UniStrToFloat(leM.Text), 0), m0);
case cbMaterial.ItemIndex of
0: begin
amin := Cmplx(8e-9, 0);
amax := Cmplx(10e-8, 0);
Emin := Cmplx(8e-5, 0);
Emax := Cmplx(10e-4, 0);
XLinesValues[1] := 2e-4;
XLinesValuesName[1] := '2e-4';
XLinesValues[2] := 4e-4;
XLinesValuesName[2] := '4e-4';
XLinesValues[3] := 6e-4;
XLinesValuesName[3] := '6e-4';
XLinesValues[4] := 8e-4;
XLinesValuesName[4] := '8e-4';
YLinesValues[1] := 2e-8;
YLinesValuesName[1] := '2e-8';
YLinesValues[2] := 4e-8;
YLinesValuesName[2] := '4e-8';
YLinesValues[3] := 6e-8;
YLinesValuesName[3] := '6e-8';
YLinesValues[4] := 8e-8;
YLinesValuesName[4] := '8e-8';
end;
1: begin
amin := Cmplx(8e-10, 0);
amax := Cmplx(10e-9, 0);
Emin := Cmplx(8e-2, 0);
Emax := Cmplx(10e-1, 0);

```

```

XLinesValues[1] := 2e-1;
XLinesValuesName[1] := '0.2';
XLinesValues[2] := 4e-1;
XLinesValuesName[2] := '0.4';
XLinesValues[3] := 6e-1;
XLinesValuesName[3] := '0.6';
XLinesValues[4] := 8e-1;
XLinesValuesName[4] := '0.8';
YLinesValues[1] := 2e-9;
YLinesValuesName[1] := '2e-9';
YLinesValues[2] := 4e-9;
YLinesValuesName[2] := '4e-9';
YLinesValues[3] := 6e-9;
YLinesValuesName[3] := '6e-9';
YLinesValues[4] := 8e-9;
YLinesValuesName[4] := '8e-9';
end;
end;
stepa := Cmplx((amax.x-amin.x)/SegmentCnt, 0);
stepE := Cmplx((Emax.x-Emin.x)/SegmentCnt, 0);
a := amin;
drawx:=true;
drawx1:=true;
drawx2:=true;
drawx3:=true;
for i := 0 to SegmentCnt-1 do
begin
  b := a;
  EE := EMin;
  if (a.x >= YLinesValues[1]) and drawx then
  begin
    drawx := false;
    DrawVertLine(YLinesValuesName[1]);
  end;
  if (a.x >= YLinesValues[2]) and drawx1 then
  begin
    drawx1 := false;
    DrawVertLine(YLinesValuesName[2]);
  end;
  if (a.x >= YLinesValues[3]) and drawx2 then
  begin
    drawx2 := false;
    DrawVertLine(YLinesValuesName[3]);
  end;
  if (a.x >= YLinesValues[4]) and drawx3 then
  begin
    drawx3 := false;
    DrawVertLine(YLinesValuesName[4]);
  end;
  draw:=true;
  draw1:=true;
  draw2:=true;
  draw3:=true;
  for j := 0 to SegmentCnt-1 do
  begin
    if (EE.x >= XLinesValues[1]) and draw then
    begin

```

```

draw := false;
DrawHorizLine(XLinesValuesName[1]);
end;
if (EE.x >= XLinesValues[2]) and draw1 then
begin
draw1 := false;
DrawHorizLine(XLinesValuesName[2]);
end;
if (EE.x >= XLinesValues[3]) and draw2 then
begin
draw2 := false;
DrawHorizLine(XLinesValuesName[3]);
end;
if (EE.x >= XLinesValues[4]) and draw3 then
begin
draw3 := false;
DrawHorizLine(XLinesValuesName[4]);
end;
tmp := f1;
if cAbs(tmp) <= 1 then
begin
with pbPlot.Canvas do
begin
pen.Color := clGray;
pen.width := 1;
PlotX := round(i *(pbPlot.Width/SegmentCnt));
PlotY := pbPlot.Height - round(j *(pbPlot.Height/SegmentCnt));
moveTo (PlotX, PlotY);
lineTo (PlotX+1, PlotY+1);
end;
end;
EE := cSum(EE, stepE);
end;
a := cSum(a, stepa);
end;
with pbPlot.Canvas do
begin
//рисуем границы графика
pen.Color := clBlack;
moveTo (0, 0);
lineTo (pbPlot.Width, 0);
moveTo (pbPlot.Width-1, 0);
lineTo (pbPlot.Width-1, pbPlot.Height-1);
moveTo (pbPlot.Width-1, pbPlot.Height-1);
lineTo (0, pbPlot.Height-1);
moveTo (0, pbPlot.Height-1);
lineTo (0, 0);
end;
end;
procedure TfmMain.btDrawClick(Sender: TObject);
begin
pbPlot.Repaint;
end;
procedure TfmMain.FormResize(Sender: TObject);
begin
pbPlot.Repaint;
end;
end;

```

```
procedure TfmMain.cbMaterialChange(Sender: TObject);
begin
  case cbMaterial.ItemIndex of
    0: begin
      leV.Text := '0,3e-3';
      leM.Text := '0,5';
    end;
    1: begin
      leV.Text := '0,3';
      leM.Text := '0,067';
    end;
  end;
end;
end.
end.
```

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Оценка повышения эффективности СИВ на основе оптоэлектронных устройств  
нового поколения согласно критерию Неймана-Пирсона

$n := \sqrt{4}$      $\alpha := \sqrt{5}$   
 $j := n \cdot \alpha$      $j^2 = 20$   
 $i := 0.1..35$   
 $P1_i := 10^{-i}$

$\beta := 0.1..23$   
 $P3_\beta := 10^{-\beta}$   
 $n1 := \sqrt{2}$      $\alpha1 := \sqrt{5}$   
 $j1 := n1 \cdot \alpha1$      $j1^2 = 10$

-22.694495142003040085
8.1052437721510051737
14.713115823719109284
19.54434517305017645
23.521125499508838161
26.973537761359863099
30.0632950021839453
32.883498167684439568
35.493412326582169123
37.933462267119999322
40.232652448775411128
42.412614426388262891
44.489982103131148402
46.477867490038066871
48.386820609091679052
50.225477833266755929
52.001013824273939594
53.719465125382338522
55.38596726711831795
57.00493202509494455
58.580182292972388193
60.115056319859791841
61.612489353465449596
63.07507843781789493
64.505128858609082968
65.904712456993188667
67.27517541180494946
68.61415713226963152
69.932901937177912406
71.103157492302114319
71.103157492302114319
71.103157492302114319
71.103157492302114319
71.103157492302114319
71.103157492302114319

$$\frac{1}{2} - \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{\alpha H}{2 \cdot n \alpha^2}\right)}{2} = P1_i \text{ solve } H \rightarrow$$

-22.694495142003040085
8.1052437721510051737
14.713115823719109284
19.54434517305017645
23.521125499508838161
26.973537761359863099
30.0632950021839453
32.883498167684439568
35.493412326582169123
37.933462267119999322
40.232652448775411128
42.412614426388262894
44.4899821031311484
46.477867490038066882
48.386820609091676804
50.225477833266785569
52.001013824273939594
53.719465125382338522
55.38596726711831795
57.00493202509494455
58.580182292972388193
60.115056319859791841
61.612489353465449596
63.07507843781789493

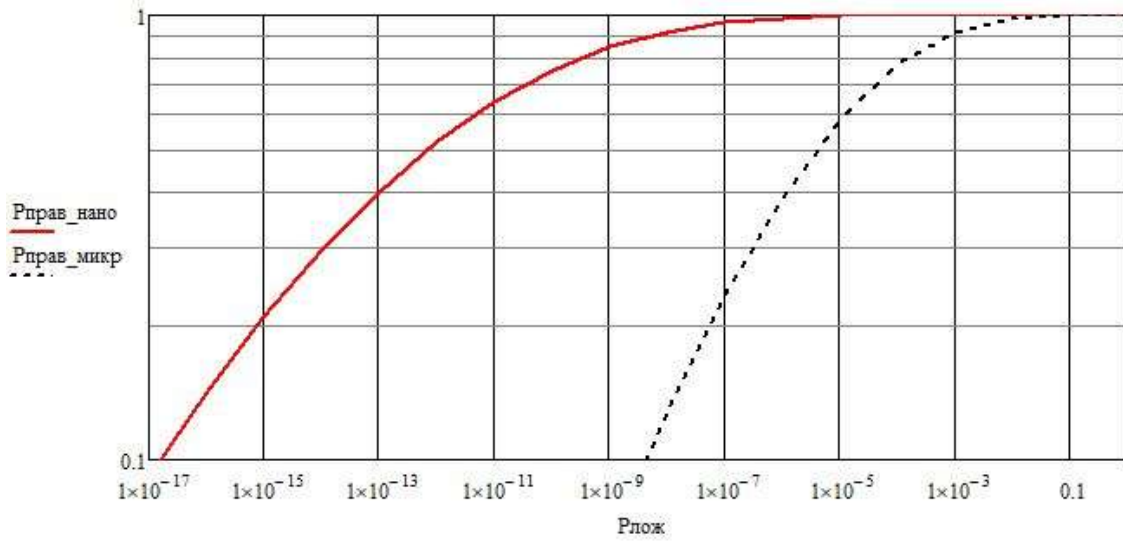
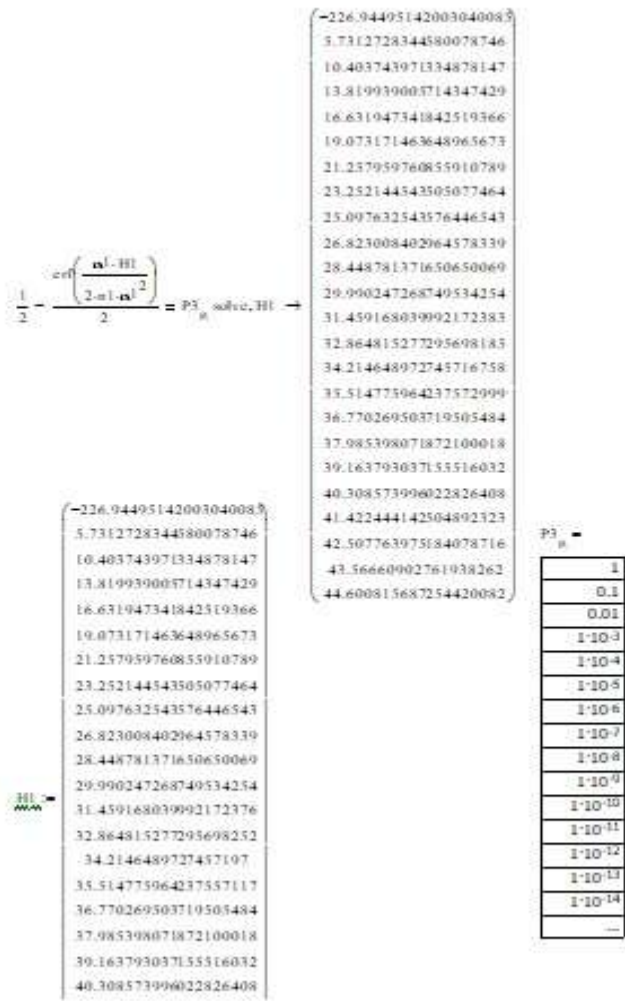
0	
0	1
1	0.1
2	0.01
3	1·10 <sup>-3</sup>
4	1·10 <sup>-4</sup>
5	1·10 <sup>-5</sup>
6	1·10 <sup>-6</sup>
7	1·10 <sup>-7</sup>
8	1·10 <sup>-8</sup>
9	1·10 <sup>-9</sup>
10	1·10 <sup>-10</sup>
11	1·10 <sup>-11</sup>
12	1·10 <sup>-12</sup>
13	...

$$P2 := \frac{1}{2} - \frac{\operatorname{erf}\left[\frac{\alpha(H - 2 \cdot n^2 \cdot \alpha^2)}{2 \cdot n \alpha^2}\right]}{2}$$

71.103157492302114319	
71.103157492302114319	
0	
0	1.0000000000000000
1	0.99999977085987250
2	0.99996808799831020
3	0.99939034266751270
4	0.99541350629056560
5	0.98028468855398000
6	0.94192388971426810
7	0.86975161084054340
8	0.76193913103696560
9	0.62807086930235080
10	0.48532798505598200
11	0.35142806696636920
12	0.23887423642372263
13	...

0	
0	1
1	0.9992900731599459
2	0.9840550549994387
3	0.9164993562773827
4	0.7743109371085655
5	0.5820908003011114
6	0.38924462107937124
7	0.23355122477850565
8	0.12717121403172432
9	0.06354590264434429
10	0.0294321860339502
11	0.01274524797593346
12	0.00519835621794734
13	0.0020095409774936
14	0.00074021616503778
15	...





## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### Акты внедрения результатов кандидатской диссертации

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
"РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА"  
РУТ (МИИТ)

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор,  
д.т.н., профессор



В.В. Виноградов  
(Ф.И.О.)

2020 г.

**АКТ**

#### практического использования результатов диссертационного исследования

Результаты научных исследований, проведенных М.Р. Ивашевским при выполнении диссертационной работы на соискание учёной степени кандидата технических наук на тему «Системы видеонаблюдения для повышения безопасности движения на железнодорожном транспорте» по направленности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций, внедрены и используются в учебном процессе Российского университета транспорта РУТ (МИИТ) кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» (АТС на ж.д. тр-те) при проведении занятий по дисциплинам «Теория передачи сигналов», «Нанотехнологии в телекоммуникациях», а также в дипломном проектировании.

Заведующий кафедрой  
«АТС на ж.д. тр-те»  
к.т.н., доцент

А.А. Антонов

Профессор кафедры  
«АТС на ж.д. тр-те»  
директор ИТТСУ  
д.т.н., профессор

П.Ф. Бестемьянов

Профессор кафедры  
«АТС на ж.д. тр-те»  
д.т.н., профессор

А.А. Волоков

УТВЕРЖДАЮ:

Технический директор

ООО «Наука-связь», к.т.н.



Петров А.А.

«10» июля 2020г


## АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертационной работы  
Ивашевского М.Р. «Системы видеонаблюдения для повышения безопасности  
движения на железнодорожном транспорте»

Настоящим актом комиссия в составе: Толмачева Петра Николаевича, Ярухина Олега алексеевича и Кручинина Александра Сергеевича подтверждает, что разработанные Ивашевским М.Р. методики оценок качества и достоверности информации систем видеонаблюдения, полученные в результате работы над кандидатской диссертацией, использованы при реализации проекта по предоставлению видеоизображения для системы технологического обеспечения региональной общественной безопасности и оперативного управления «Безопасный регион» на территории сельского поселения Булатниковское Ленинского муниципального района.

## Члены комиссии:

1. Начальник инженерно-монтажного управления, к.т.н.
2. Начальник управления развития и системной интеграции
3. Начальник отдела проектов по системной интеграции, к.т.н.


 Толмачев П.Н.


 Ярухин О.А.


 Кручинин А.С.



Общество с ограниченной ответственностью  
«Связьпроект групп»

Россия, 129344, г. Москва,  
ул. Енисейская, дом 12, 161  
Тел.: +7 (964) 725-22-10  
E-mail: info@spgrupp.ru  
www.spgrupp.ru

18.07.2020 № А-01/20

АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертационной работы  
Ивашевского М. Р. «Системы видеонаблюдения для повышения безопасности  
движения на железнодорожном транспорте»

Настоящим актом подтверждаем, что разработанные Ивашевским М. Р. методики оценок качества и достоверности информации систем видеонаблюдения, полученные в результате работы над кандидатской диссертацией, использованы при реализации проекта по титулу «*Видеонаблюдение на открытых участках и наземных объектах ГУП «Московский метрополитен» для целей обеспечения транспортной безопасности.*»

С Уважением,  
Генеральный директор  
ООО «Связьпроект групп»

Беленова Д. С.



**ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»  
ЦЕНТРАЛЬНАЯ СТАНЦИЯ СВЯЗИ**

ул. Новая Басманная, 2  
г. Москва, 107174,  
Тел.: (499) 262-34-52, (499)262-42-72  
факс: (499) 262-90-95, (499)262-66-19  
E-mail: css@css.rzd.ru, www.css-rzd.ru

16 сентября 2020 № ЦССЖС-9/1

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

**АКТ**

использования результатов  
диссертационного исследования Ивашевского М.Р. на тему  
«Системы видеонаблюдения для повышения безопасности движения на  
железнодорожном транспорте»

Настоящим актом комиссия в составе: первого заместителя начальника Центральной станции связи Азерникова Д.В., начальника службы эксплуатации Чечеля А.В., начальника сектора технической политики Лапунова С.И. подтверждает, что разработанные в кандидатской диссертации Ивашевского М.Р. принципы оценки эффективности работы систем интеллектуального видеонаблюдения (СИВ), а также предложенные варианты организации СИВ, будут рекомендованы к использованию при проектировании и внедрении систем видеонаблюдения на труднопроходимых участках железных дорог и участках с нерегулируемыми железнодорожными переездами.

Первый заместитель  
начальника

Начальник службы  
эксплуатации

Начальник сектора  
технической политики



Азерников Д.В.

Чечель А.В.

Лапунов С.И.