

На правах рукописи



ИВАШЕВСКИЙ МИХАИЛ РОМАНОВИЧ

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

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

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

МОСКВА – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» (РУТ (МИИТ))

**Научный руководитель:** **Журавлева Любовь Михайловна**  
д.т.н, доцент, профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта (РУТ(МИИТ)), г. Москва.

**Официальные оппоненты:** **Рыжков Анатолий Васильевич**  
д.т.н, профессор, главный научный сотрудник научно-исследовательской части Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ)

**Самойлов Сергей Александрович**  
к.т.н., доцент кафедры «Радиотехника и радиосистемы» Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ)

**Ведущая организация:** АО Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (НИИАС), г. Москва.

Защита диссертации состоится «03» марта 2021 года в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.025.04 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, пр-т Строителей, 3/7, ВлГУ, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке университета и на сайте ВлГУ <http://diss.vlsu.ru>

Автореферат разослан 25.12. 2020 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: ул. Горького, д.87, ВлГУ, РТиРС, 600000, г. Владимир, Самойлову А.Г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



А.Г. Самойлов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 (БДП), 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) для передачи информации в единый диспетчерский центр управления движением (ЕДЦУ) и кабину машиниста, а также устройства распознавания. Для внедрения мониторинга переезда с помощью СИВ необходима оценка возможностей системы по техническому обеспечению БДП. Для получения такой оценки требуется разработка критериев соответствия СИВ поставленной задаче повышения безопасности движения поездов. Основное требование к техническим средствам повышения БДП – 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 качества канала, т.е. величины искажений видеосигнала на входе устройства распознавания СИВ. Отсюда, необходимым критерием является качество видеосигнала, которое оценивается приведенной дисперсией погрешности, внесенной устройствами канала 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 могут обеспечить в настоящее время СИВ ( $P_{лож.обн.} \geq 10^{-3}$ ), свидетельствуют о необходимости повышения технического уровня систем видеонаблюдения. Наиболее эффективный способ – это переход на новую элементную базу нанoeлектроники, позволяющую значительно повысить качественные показатели канала передачи информации СИВ.

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., Журавлева 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 качества видеосигналов.

**Объектом** исследования являются каналы передачи цифровой видеоинформации 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 обеспечения безопасности движения на железнодорожном транспорте.

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

1. Научно-методические основы и принципы разработки и проектирования каналов передачи цифровой видеоинформации 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 БДП:

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 канала передачи информации.

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 БДП.

**Методы исследований** основаны на теории передачи сигналов и оптимального приема, математического моделирования, 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 натурных 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 информации систем видеонаблюдения, в создании способа эффективного использования существующих сетей связи железнодорожного транспорта для передачи видеоинформации в кабину машиниста и центр принятия решений.

**Практическая значимость:**

1. Разработаны научно-методические основы проектирования каналов передачи цифровой видеоинформации 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  $P_{лож.обн.} \leq 10^{-4}$ ;
- 3) вероятность правильного обнаружения повышается  $P_{прав.обн.} \geq 0,9993$ ;
- 4) полученные результаты эффективности СИВ на элементной базе 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, а также доказать эффективность использования СИВ для повышения безопасности движения поездов.

**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 видеоинформации, позволяющих повысить эффективность работы сети (гл.2,3,4).
2. Разработка эффективных путей развития и совершенствования архитектуры сетей, 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 результаты диссертации 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 Всероссийской научно-практической конференции «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 17 публикациях, в том числе 6 статьях в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК.

**Реализация.** Результаты внедрены в новые проекты ООО «Наука-Связь», ООО «Связьпроект групп», НИИАС, 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 введения, четырех глав, заключения в виде выводов, приложения и списка литературы (87 наименований). Основная часть диссертации составляет 140 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.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены объект, предмет и цель исследования, изложены научные результаты, представленные к защите, дана оценка новизны, достоверности, практической

ценности результатов и теоретической значимости, приведены структура и содержание работы, данные по ее апробации, практическому применению и реализации.

**В первой главе** рассмотрены варианты применения систем видеонаблюдения, их возможности и особенности функционирования на железнодорожном транспорте. Дана сравнительная характеристика основных технических средств повышения БДП, применяемых на железных дорогах (ж/д). На основании проведенного анализа сделан вывод, что наиболее перспективным способом повышения БДП является система видеонаблюдения [1]. Предложены критерии и оценки соответствия функциональных возможностей СИВ требованиям БДП. Исходя из условий работы ж/д, с помощью функции потерь определены допустимые значения показателей функционирования СИВ [2]. Для достижения необходимых значений вероятностей обнаружения опасных объектов предложено повысить качество канала передачи информации с помощью оптоэлектронных устройств нового поколения.

Основная функция систем видеонаблюдения заключается в визуальном контроле за объектом, который может осуществляться с помощью оператора и машиниста или в автоматическом режиме с помощью устройства распознавания на основе алгоритмов видеоаналитики [1,3]. Предотвращая аварийные ситуации, системы видеонаблюдения повышают безопасность движения поездов.

В первом варианте видеоизображение подается в кабину локомотива и ЕДЦУ. Решения о наличии опасной ситуации принимают машинист или оператор (диспетчер). Во втором варианте факт перехода движения поезда в опасное состояние распознает устройство видеоаналитики. После обнаружения опасного объекта сигнал «тревоги» вместе с видеоизображением поступает машинисту и диспетчеру ЕДЦУ. Таким образом, система видеонаблюдения в первом варианте состоит из канала передачи видеоизображения (видеокамера, передатчик, линия связи, приемник), во втором варианте – из канала и устройства распознавания опасных ситуаций. При этом канал должен обеспечить требуемое качество сигналов и оперативность доставки видеоинформации [4].

Для объективной оценки соответствия технических возможностей СИВ требованиям БДП проанализирован второй вариант [5].

Оценка эффективности СИВ основана на двух критериях:

- 1) качества видеосигналов в виде приведенной дисперсии суммарной погрешности  $\delta_\varepsilon^2$ , обратной отношению мощностей сигнала и шума (с/ш);
- 2) достоверности информации в виде вероятностей правильного  $P_{\text{прав.обн.}}$ , ложного  $P_{\text{лож.обн.}}$  обнаружений.

В качестве функции потерь рассмотрена величина экономического ущерба из-за пропуска объекта или ложного срабатывания видеоаналитики СИВ [2].

Анализ статистики аварий и экономического ущерба на восстановление подвижного состава, инфраструктуры ж/д, выплаты компенсаций пассажирам, их родственникам и штрафов за срыв графика движения позволил оценить допустимые значения вероятностей правильного  $P_{\text{прав.обн.}} \geq 0,9993$  и ложного обнаружений  $P_{\text{лож.обн.}} \leq 10^{-4}$ . Современные алгоритмы видеоаналитики обеспечивают вероятность ложного обнаружения не выше  $P_{\text{лож.обн.}} \geq 10^{-3}$ . Поэтому для использования СИВ с целью повышения БДП разработаны предложения по снижению величины вероятности  $P_{\text{лож.обн.}}$ .

Причина ложных обнаружений СИВ заключается в недостаточно высоком качестве формирования цифрового видеосигнала, искажениях и ошибках при обработке в устройствах распознавания.

Качество сигнала на выходе канала (с/ш) и результат работы устройства распознавания в виде вероятностей  $P_{\text{прав.обн.}}$  и  $P_{\text{лож.обн.}}$  взаимосвязаны. Чем хуже канал (ниже с/ш), тем сложнее алгоритмы видеоаналитики, тем дольше длительность обработки видеоизображения для достижения требуемых показателей  $P_{\text{прав.обн.}}$  и  $P_{\text{лож.обн.}}$ . Каждому алгоритму распознавания необходимо обеспечить минимальный объем информации (эпсилон-энтропию), который определяется заданным качеством распознавания (вероятностями обнаружения). Этот минимальный объем информации доставляется каналом передачи видеосигналов и гарантирует требуемую достоверность результата видеоаналитики.

Целью работы является разработка методики оценки величины эpsilon-энтропии (равной половине двоичного логарифма от величины с/ш) на входе устройства распознавания для обеспечения заданного качества. Для расчета отношения с/ш исследованы отдельные составляющие канала (фотосенсор, линия связи, приемное устройство). Анализ влияния величины с/ш на вероятности обнаружения произведен с помощью теории обнаружения на основании алгоритма Неймана-Пирсона.

**Во второй главе** разработаны методики исследования качества видеосигналов в каналах передачи информации систем видеонаблюдения. Предложена модель расчета оценки качества с помощью приведенной дисперсии суммарной погрешности видеосигнала на выходе канала и на входе устройства распознавания. Методики учитывают особенности элементных баз микроэлектроники и наноэлектроники [6].

Искажения видеосигналов в канале СИВ оцениваются показателем качества в виде приведенной к мощности полезного сигнала дисперсии суммарной погрешности  $\delta_\epsilon^2$ . Модель оценки погрешности  $\delta_\epsilon^2$  учитывает неустранимые искажения за счет внутренних шумов приемо-передающих устройств, погрешностей оцифровки и линии связи (рисунок 1).

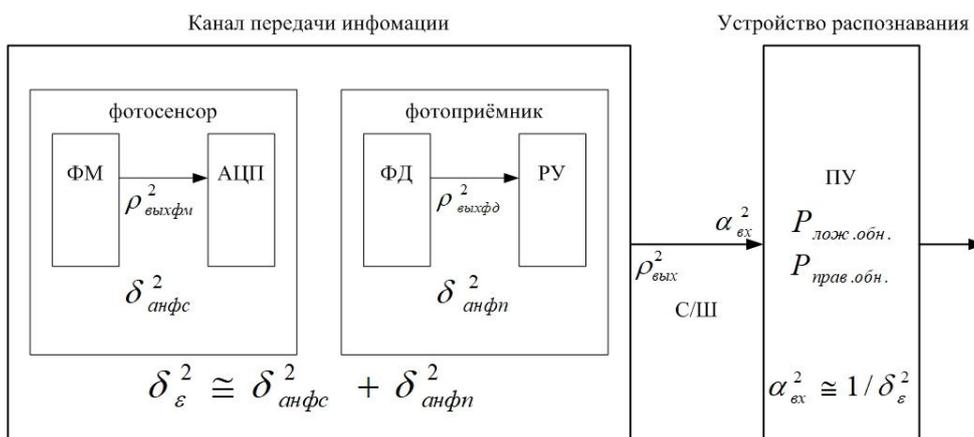


Рисунок 1 – Алгоритм расчета качества сигналов СИВ

В фотосенсоре (ФС) искажения происходят в результате действия внутреннего шума пикселей фотоматрицы (ФМ) и аналого-цифрового преобразования (АЦП) сигнала ФМ [7,8]. Поэтому погрешность ФС  $\delta_{фс}^2$  равна

сумме: 1) приведенной дисперсии аномальной погрешности за счет шума ФМ после АЦП  $\delta_{анфс}^2$ ; 2) приведенной погрешности квантования  $\delta_{кв}^2$ , зависящей от шага квантования, числа уровней квантования  $L_{кв}$ , позиционности кода.

Величина вероятности аномальной ошибки и значение погрешности  $\delta_{анфс}^2$  при условии гауссовского распределения плотности вероятностей (ПРВ) сигналов ФМ рассчитывается следующим образом [5,9]:

$$\delta_{анфс}^2 \cong 6 \exp\left(-\frac{4,5\rho_{выхфм}^2}{L_{кв}^2}\right), \text{ при } P_{ошфс} < 0,1 (\rho_{выхфм}^2 \geq 4 \cdot 10^4), \quad (1)$$

где  $P_{ошфс} = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{4,5\rho_{выхфм}^2}{L_{кв}^2}\right)$ ;

$$\rho_{выхфм}^2 = \frac{\sigma_{\lambda}^2}{\sigma_h^2} - \text{отношение дисперсий (мощностей) с/ш на выходе ФМ.}$$

Анализ зависимости  $\delta_{фс}^2 = f(\rho_{выхфм}^2)$  показал, что для значений  $\rho_{выхфм}^2 \leq 10^6$  приведенная дисперсия погрешности ФС определяется величиной аномальной погрешности  $\delta_{анфс}^2$  за счет внутреннего шума ФМ (рисунок 2).

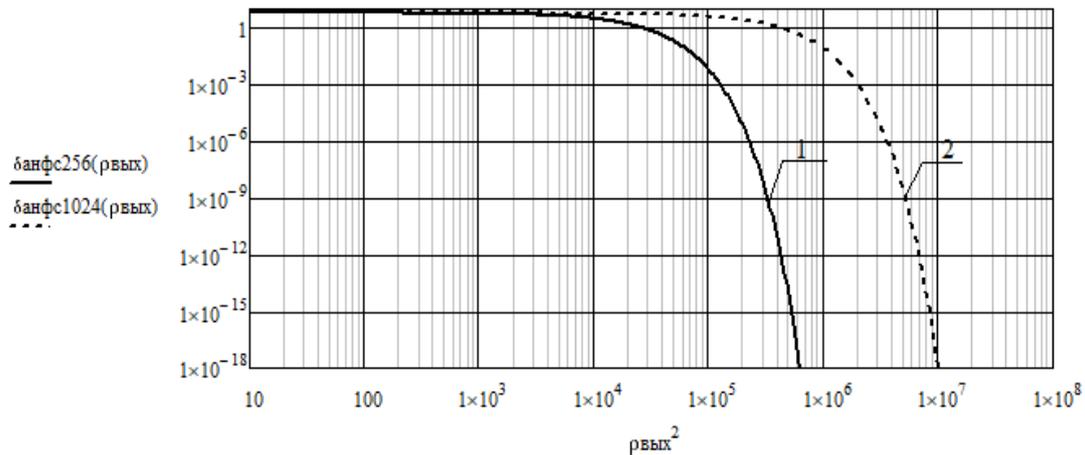


Рисунок 2 – Зависимость погрешности  $\delta_{анфс}^2$  от величины  $\rho_{выхфм}^2$

(1 – при  $L_{кв} = 256$ ,  $\delta_{кв}^2 = 2,86 \cdot 10^{-6}$ ; 2 – при  $L_{кв} = 1024$ ,  $\delta_{кв}^2 = 4,58 \cdot 10^{-5}$ )

Как видно из рисунка 2, чем больше уровней квантования (график 2), тем меньше величина шага квантования, тем сильнее влияние шума, больше

вероятность  $P_{ошфс}$  и значение  $\delta_{анфс}^2$ . Следовательно, величина погрешности  $\delta_{фс}^2$  определяется  $\rho_{выхфм}^2$  и зависит от оптоэлектронных характеристик материала.

В основе методики расчета приведенной дисперсии аномальной погрешности фотоприемника ФП  $\delta_{анфп}^2$  лежит оценка вероятности ошибки  $P_{ошфп}$  при приеме элементарного импульса с помощью анализа  $Q$ -фактора [5,10]:

$$Q = \frac{\rho_{выхфд}}{2}; \rho_{выхфд}^2 = \frac{(P_{вх}R)^2}{\sigma_{нфд}^2}, \quad (2)$$

где  $\rho_{выхфд}^2$  – отношение мощностей с/ш на выходе фотодетектора ФД;

$P_{вх}R$  – произведение входной мощности оптического сигнала и величины чувствительности фотодетектора;

$\sigma_{нфд}^2$  – мощность темнового шума фотодетектора.

Выражение для вероятности ошибки с учетом формулы (2) определяется следующим образом:

$$P_{ошфп} = \frac{2}{\sqrt{2\pi\rho_{выхфд}^2}} \exp\left(-\frac{\rho_{выхфд}^2}{8}\right). \quad (3)$$

Величина аномальной ошибки на выходе ФП для гауссовского закона ПРВ сигнала с учетом выражения (3) и по аналогии с (1) рассчитывается по формуле:

$$\delta_{анфп}^2 \cong \frac{12\sqrt{2}}{\sqrt{\pi\rho_{выхфд}^2}} \exp\left(-\frac{\rho_{выхфд}^2}{8}\right) \text{ при } P_{ошфп} < 0,1 \text{ ( } \rho_{выхфд}^2 \geq 10 \text{)}. \quad (4)$$

Искажения в линии связи, например, за счет затухания сигнала и дисперсионных искажений в волоконно-оптических линиях, при условии постоянного мониторинга качества на три порядка меньше, чем искажения от шумов ФС и ФП.

Отсюда, оценка качества канала передачи информации СИВ, выраженная через приведенную дисперсию суммарной погрешности, с учетом формул (1), (4) принимает вид:

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

Таким образом, суммарная погрешность  $\delta_\varepsilon^2$  (5) в значительной степени зависит от параметра с/ш на выходе ФС и ФП. Для уменьшения погрешности  $\delta_\varepsilon^2$ , вносимой каналом СИВ, необходимо снижать мощность внутренних шумов ФС и ФП за счет улучшения внутренней структуры материала.

Для определения зависимости требуемого количества информации  $\alpha_{\text{вх}}^2$  от заданного качества обнаружения ( $P_{\text{прав.обн.}}$  и  $P_{\text{лож.обн.}}$ ) рассмотрена задача обнаружения с помощью оптимального решающего устройства в виде согласованного фильтра (СФ). Применение алгоритма Неймана-Пирсона позволяет дать аналитическую оценку влияния качества канала на достоверность информации. Для этого задается вероятность  $P_{\text{лож.обн.}}$ , с помощью которой вычисляется порог обнаружения  $H$  с учетом величины  $\alpha_{\text{вх}}^2$  на входе СФ. Затем определяется  $P_{\text{прав.обн.}}$  с помощью интеграла вероятностей. Выбор порога  $H$  носит компромиссный характер: повышение порога  $H$  уменьшает  $P_{\text{лож.обн.}}$ , но ухудшает результат обнаружения (снижается  $P_{\text{прав.обн.}}$ ).

Чтобы добиться требуемого значения  $P_{\text{лож.обн.}}$  и обеспечить необходимую вероятность  $P_{\text{прав.обн.}}$  нужно повышать качество канала СИВ. Это означает перевод канала передачи видеoinформации на новую элементную базу.

**В третьей главе** представлено исследование влияния характеристик полупроводникового материала на параметры фотодетекторов (ФС, ФП) и качество сигналов в канале передачи информации СИВ, проведенное с помощью физико-математического моделирования.

На основании результатов исследования предложены способы улучшения качества сигналов ФС и ФП, оцениваемые соответственно  $\delta_{\text{фс}}^2$  и  $\delta_{\text{анфп}}^2$ , за счет улучшения оптоэлектронных характеристик материалов.

Наиболее перспективными материалами являются множественные квантовые ямы (МКЯ) и сверхрешетки (СВР) [6,11]. Их преимущества по сравнению с объемными полупроводниковыми кристаллами (ОК) заключаются в улучшении чувствительности  $R$ , обнаруживающей способности  $D$  фотодетекторов (ФД) и расширении длинноволновой границы регистрации света  $\lambda_{\text{гр}}$ . Параметры ФД можно дополнительно улучшить за счет операции обогащения природных

полупроводников [5]. Обогащение – это снижение концентрации тяжелых изотопов в исходных химических элементах (например, изотопа  $^{71}Ga$  для арсенида галлия при соответствующем повышении концентрации  $^{69}Ga$ ). Эта операция уменьшает число дефектов кристаллической решетки, эффективную массу электронов  $m_{эф}$ , ширину запрещенной зоны полупроводника  $E_g$ , повышает коэффициенты поглощения  $\alpha$  и квантовой эффективности  $\eta$  [6,12].

Коэффициент поглощения  $\alpha = f(E_g)$  есть функция ширины запрещенной зоны полупроводника  $E_g$ . Например, для арсенида галлия зависимость  $\alpha = f(E_g)$  имеет следующий вид:

$$\alpha = K_\alpha \sqrt{h\nu - E_g}, \quad (6)$$

где  $K_\alpha = 2,827 \cdot 10^4 \text{ (см}^{-1} \cdot \text{эВ}^{-1/2})$  – коэффициент пропорциональности;

$h\nu = 1,5 \text{ эВ}$  – энергия фотона (соответствует длинноволновой границе  $\lambda_{зр}$ ).

После обогащения материала ширина запрещенной зоны снизится до величины  $E_g = 1,36 \text{ эВ}$ , коэффициент поглощения света повысится в 1,325 раза до значения  $\alpha = 1,058 \cdot 10^4 \text{ (см}^{-1})$  (6). Коэффициент поглощения непосредственно влияет на квантовую эффективность материала, поэтому с ростом величины  $\alpha$  повышается значение  $\eta$  материала. На рисунке 3 представлены зависимости  $\alpha = f(E_g)$  и  $\eta = f(E_g)$  для арсенида галлия.

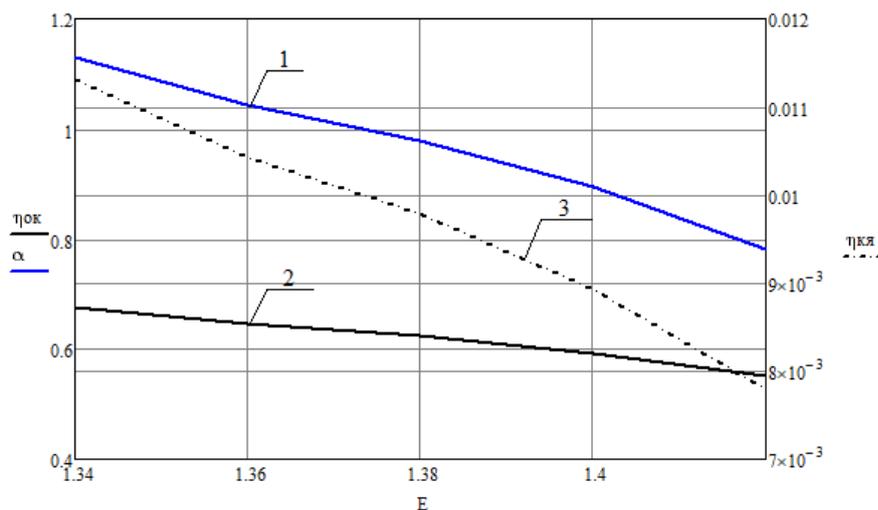


Рисунок 3 – Зависимости  $\alpha = f(E_g)$  (1) и  $\eta = f(E_g)$  для объемных кристаллов (ОК) (2) и квантовых ям (КЯ)

Как видно из рисунка 3, уменьшение ширины  $E_g$  улучшает свойства материала, а именно: квантовая эффективность после обогащения материала повышается в 1,23 раза для ОК и в 1,325 раза для МКЯ.

Математическое моделирование волновых процессов в квантовых структурах на основе аналитической модели в виде стационарного дифференциального уравнения второго порядка (уравнения Шредингера) [6] позволило: 1) описать поведение носителей заряда в квантовых ямах через волновую функцию  $\psi(x)$ ; 2) оценить влияние обогащения материала на количество  $k$  разрешенных энергетических уровней  $E_k$  и расстояние между ними  $\Delta E_k$  в квантовых ямах. Для этого составляется система уравнений, описывающих волновую функцию  $\psi(x)$  для каждого слоя КЯ с учетом условия непрерывности волновой функции и ее производной. Система преобразуется в дисперсионное уравнение трансцендентного вида, которое решается численным методом с помощью программы Mathcad. На основе математического моделирования можно создавать материалы для оптоэлектроники с требуемой величиной  $\Delta E_k$ , определяющей длинноволновую границу фотоэффекта  $\lambda_{ep}$  [6]. Методика проектирования нового материала на МКЯ и СВР из обогащенных полупроводников особенно важна для фотоприемников беспроводных оптических каналов связи (БОКС), работающих в сверхдлинном инфракрасном диапазоне (8-13)  $\mu\text{м}$ . Оптические каналы БОКС можно использовать для передачи информации в кабину машиниста со скоростью в несколько десятков  $\text{Гбит}/\text{с}$ , не ухудшая электромагнитную обстановку на ж/д [13,14].

Однако в природе не существует полупроводников с шириной запрещенной зоны  $E_g$ , измеряемой в  $\text{мэВ}$ , требуемой для диапазона (8-13)  $\mu\text{м}$ . Их можно создать с помощью квантовых структур в виде сверхрешеток (СВР). Квантовая структура СВР отличается от МКЯ более узкой шириной барьеров, измеряемой в  $\text{нм}$ . Из-за этого волновые функции электронов проникают сквозь барьеры соседних КЯ, что отражается на характере распределения энергетических уровней, которые превращаются в энергетические зоны.

Алгоритм решения стационарного уравнения Шредингера для волновых процессов внутри СВР аналогичен случаю МКЯ. Дисперсионное уравнение для

такой многослойной наноструктуры с числом слоев более 100 составляется с помощью модели Кронига-Пенни и волнового вектора блоховской функции [6]. В результате математического моделирования трансцендентного уравнения наблюдается эффект расщепления энергетических уровней и превращения их в зоны проводимости и энергетические щели. Ширина щели  $\Delta E_{щ}$  (запрещенной зоны) определяет границу фотоэффекта для сверхдлинного инфракрасного диапазона. В расширении границы  $\lambda_{гр}$  (уменьшении  $\Delta E_{щ}$ ) помимо размера КЯ большую роль играет эффект обогащения материала. Так, снижение концентрации изотопа  $^{71}Ga$  уменьшает значения  $m_{эф}$ ,  $\Delta E_{щ}$  и увеличивает  $\lambda_{гр}$ . На рисунке 4 представлены зависимости  $\Delta E_{щ} = f(b)$  ( $b$  – ширина барьера КЯ в нм).

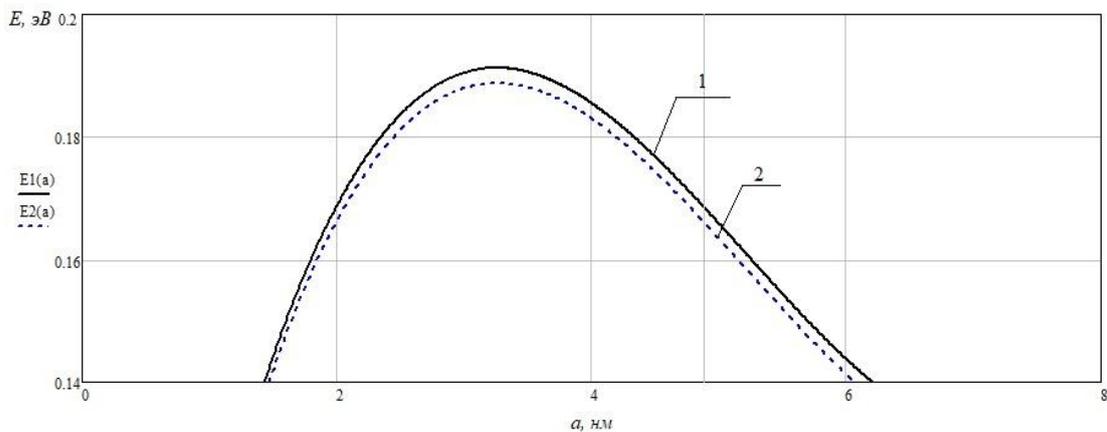


Рисунок 4 – Зависимости ширины щели от размеров КЯ для материалов:

1 – природных полупроводников; 2 – обогащенных полупроводников

Как видно из рисунка 4, при одних и тех же размерах КЯ для материала СВР из обогащенных полупроводников происходит сужение энергетических зон и расширение диапазона фотоэффекта. Так, для ширины ямы и барьера  $a=b=5$  нм первая энергетическая щель уменьшается на 2,5 мэВ, значение  $\lambda_{гр}$  увеличивается на 0,1 мкм. Это происходит потому, что в результате снижения концентрации тяжелого изотопа галлия  $^{71}Ga$  на порядок в арсениде галлия уменьшится в 2 раза величина  $m_{эф}$ , и увеличится на 0,06 эВ высота потенциального барьера  $V$  [6].

Повышение значения  $\lambda_{гр}$  означает возможность фиксации низкоэнергетических фотонов, что важно для видеокамер, работающих в темное время суток. Ширина щели  $\Delta E_{щ} \leq 0,155$  эВ (рисунок 4) соответствует

атмосферному окну (8-13) *мкм*. Приращение  $\lambda_{zp}$  на 0,1 *мкм* в этом диапазоне уменьшает поглощение оптического сигнала на порядок. Это позволит повысить качество канала БОКС или дальность связи с подвижными объектами.

Таким образом, в результате обогащения материала на ОК и МКЯ уменьшаются мощность шума ФД и погрешности  $\delta_{fc}^2$  ФС и  $\delta_{анфн}^2$  ФП. Как следствие, повышаются качество  $\alpha_{вх}^2$  и достоверность информации  $P_{прав.обн.}$ .

**В четвертой главе** представлены результаты анализа улучшения качества сигналов в канале передачи информации СИВ с помощью новых материалов. Фотодетекторы, использующие эти материалы, называемые оптоэлектронными устройствами нового поколения (ОЭУ), повышают эффективность работы устройств распознавания СИВ, оцениваемую  $P_{прав.обн.}$  и  $P_{лож.обн.}$  [5,11,15-17].

Для обеспечения требуемого качества обнаружения СИВ устройствам распознавания необходим минимальный объем информации (эпсилон – энтропии), который доставляется каналом. Элементная база микроэлектроники канала СИВ и современные алгоритмы распознавания гарантируют вероятность  $P_{лож.обн.} \geq 10^{-3}$ . Эта цифра не обеспечивает требуемую величину  $P_{лож.обн.}$  для повышения БДП на ж/д. Уменьшить вероятность ложного обнаружения возможно путем усложнения алгоритмов видеоаналитики, которое отразится на продолжительности работы СИВ. 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  $\rho_{вых}^2$  на выходе канала СИВ с помощью более совершенной элементной базы. Это означает, что с увеличением объема информации, поступающей по каналу, повышается эффективность используемых алгоритмов видеоаналитики.

В работе осуществляется сравнение достоверности обнаружения с помощью разных каналов передачи информации, реализованных на базе микроэлектроники и наноэлектроники с использованием ОЭУ.

Снижение шумов и повышение  $\rho_{вых}^2$  достигается за счет применения ОЭУ нового поколения на основе обогащенных материалов. В качестве иллюстрации

эффективности новых материалов нанoeлектроники на рисунке 5 представлены графики зависимости вероятности ошибки  $P_{ошфп} = f(\rho_{выхфд}^2)$  для квантово-размерных ФП на обогащенных и природных полупроводниках.

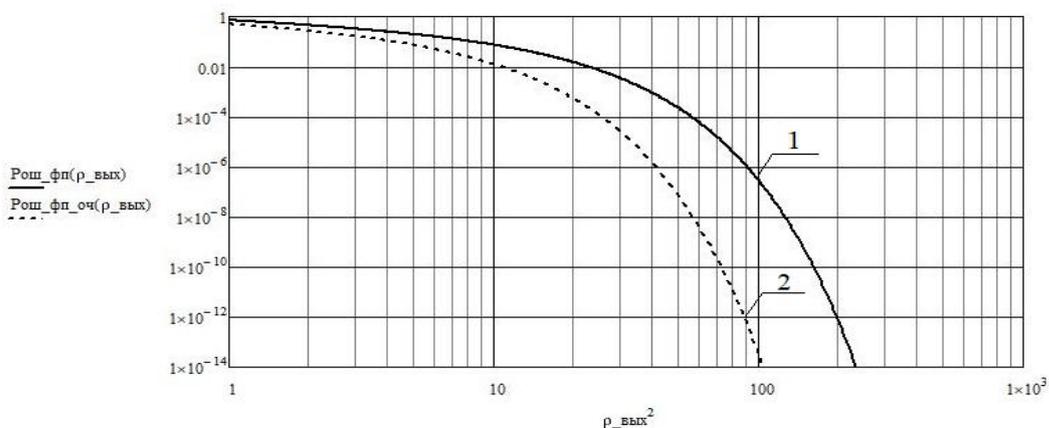


Рисунок 5 – Графики зависимости  $P_{ошфп} = f(\rho_{выхфд}^2)$  для ФП на МКЯ из природных (1) и обогащенных (2) полупроводников

После обогащения материала КЯ вероятность ошибки ФП уменьшается на несколько порядков. Улучшение качества  $\rho_{выхфд}^2$  приведет к увеличению  $\alpha_{вх}^2$ , вероятности  $P_{прав.обн.}$ , и уменьшению вероятности  $P_{лож.обн.}$  (рисунок 6).

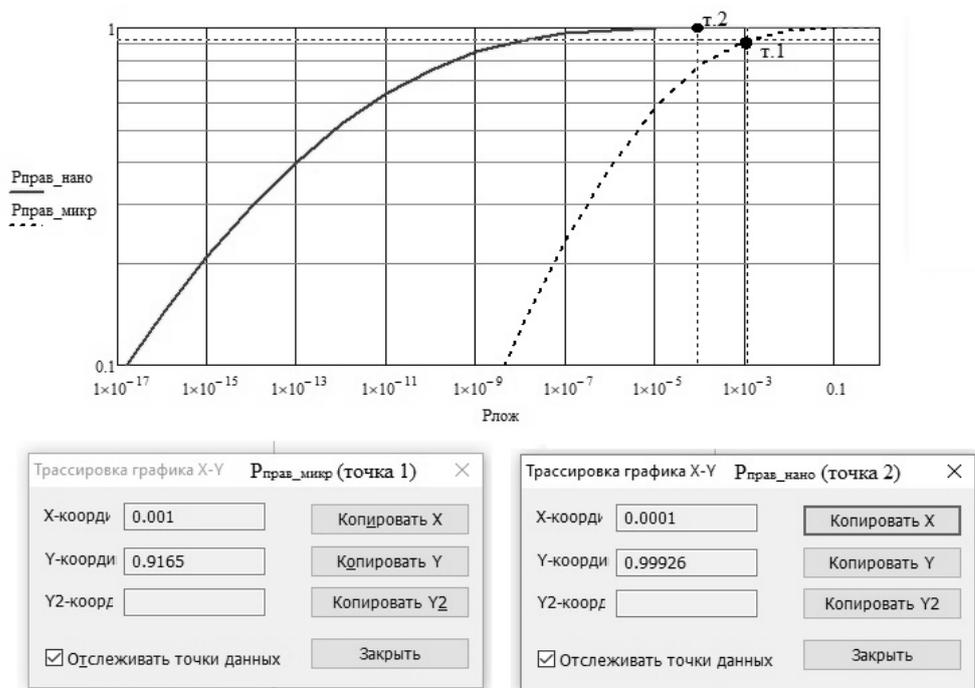


Рисунок 6 – Зависимости  $P_{правобн.} = f(P_{ложобн.})$  вероятностей  $P_{прав\_микр}$  (для микроэлектроники) и  $P_{прав\_нано}$  (для нанoeлектроники) от вероятности  $P_{ложобн.}$

На рисунке 6 представлены две зависимости  $P_{\text{прав.обн.}} = f(P_{\text{лож.обн.}})$  вероятностей правильного обнаружения от ложного обнаружения. Вероятности  $P_{\text{прав.обн.}}$  рассчитаны с помощью критерия Неймана-Пирсона для двух каналов: на МКЯ с использованием новых материалов (наноэлектроника) и ОК на природных полупроводниках (микроэлектроника). Как видно из графиков, обогащение материала дает значительное повышение  $P_{\text{прав.обн.}}$  и уменьшение  $P_{\text{лож.обн.}}$ . Так, с помощью новой элементной базы наноэлектроники можно добиться значений вероятности правильного обнаружения  $P_{\text{прав.обн.}} \geq 0,9993$  при заданных вероятностях ложного обнаружения  $P_{\text{лож.обн.}} \leq 10^{-4}$ .

Таким образом, в результате проведенных исследований по повышению достоверности сигналов СИВ сделан вывод о возможности использования систем видеонаблюдения для повышения безопасности движения поездов при условии применения оптоэлектронных устройств нового поколения.

### Основные результаты и выводы

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

2. Исследованы возможности повышения достоверности информации СИВ путем улучшения качества канала передачи видеосигналов за счет перехода на новую элементную базу (наноэлектронику).

3. Разработаны методики расчета оценок качества сигналов СИВ в виде приведенных дисперсий погрешности: а)  $\delta_{\text{фс}}^2$  фотосенсора; б)  $\delta_{\text{фн}}^2$  фотоприемника; в) суммарной  $\delta_{\text{э}}^2$  канала передачи информации.

4. Предложен метод оценки достоверности сигналов канала СИВ (вероятности  $P_{\text{прав.обн.}}$ ) с помощью величины  $\delta_{\text{э}}^2$  и заданной вероятности  $P_{\text{лож.обн.}}$ .

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

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

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

3) длинноволновая граница  $\lambda_{gr}$  для СВР повысится на величину 0,1 мкм.

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

1) отношение  $\rho_{выхфд}^2$  ФД повысится: для ОК в 1,23 раза, для МКЯ в 1,5 раза;

2) погрешность  $\delta_{анфс}^2$  сигналов ФС на обогащенном материале уменьшится:

а) для ОК в  $\cong 5$  раз, б) для МКЯ в  $\cong 31$  раз (при  $\rho_{выхфс}^2 = 10^5$ ;  $L_{кв} = 256$ );

3) погрешность  $\delta_{анфп}^2$  сигналов ФП на обогащенном материале уменьшится:

а) для ОК в  $\cong 9$  раз, б) для МКЯ в  $\cong 71$  раз;

4) вероятность  $P_{ошфп}$  для обогащенных МКЯ снизится на три порядка;

5) качество канала СИВ при условии  $P_{ошфс} \cong P_{ошфп} \approx 10^{-6}$  повысится :

а) для ОК в  $\cong 8$  раз, б) для МКЯ в  $\cong 51$  раз.

7. В результате проведенных исследований соответствия СИВ требованиям БДП 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.

### Публикации по теме диссертации

#### Публикации в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК:

1. 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.

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

3. Ивашевский, М.Р. Оценка качества передачи сигналов систем интеллектуального видеонаблюдения / Л.М. Журавлева, М.Р. Ивашевский, Н.О. Ефимова, Н.В. Яцкинский // Проектирование и технология электронных средств. – 2017. – № 3. – С.10-15.

4. Ивашевский, М.Р. Влияние сети мобильной связи на качество сигналов видеоизображения / Л.М. Журавлева, М.Р. Ивашевский, Д.Г. Курьянцев, В.Л. Лошкарев, В.В. Левшунов // Телекоммуникации. – 2019. – № 12. – С.25-30.

5. 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.

6. Ивашевский, М.Р. Новые материалы в оптоэлектронике / Л.М. Журавлева, М.Р. Ивашевский, И.Ф. Музафаров // Мир транспорта. – 2018. – № 2. – С.74-83.

**Прочие публикации:**

7. Ивашевский, М.Р. Оценка качества передачи сигналов СИВ / М.Р.

Ивашевский, Я.Ю. Мягков, Н.В. Яцкинский // Проблемы безопасности на транспорте: VIII Международная НТК. Гомель, 23-24 ноября 2017 г. – БелГУТ, 2017. – С.187-188.

8. Ивашевский, М.Р. Оценка качества передачи цифрового видеосигнала / Л.М. Журавлева, М.Р. Ивашевский, Н.О. Ефимова, Н.В. Яцкинский // Перспективные технологии в средствах передачи информации (ПТСПИ-2017): XII Международная НТК. Суздаль, 05-07 июля 2017 г. – ВлГУ, 2017. – С. 116-118.

9. Ивашевский, М.Р. Повышение безопасности движения поездов с помощью СИВ/ Л.М. Журавлева, М.Р. Ивашевский, Д.Г. Курьянцев, В.Л. Лошкарев //Перспективные технологии в средствах передачи информации (ПТСПИ-2019): XIII Международная НТК. Владимир, 03-05 июля 2018 г. – ВлГУ, 2019. – С. 28-30.

10. 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: XIII Международная НТК. Владимир, 03-05 июля 2018 г. – ВлГУ, 2019. – С. 26-28.

11. Ивашевский, М.Р. Оптоэлектронные устройства на основе наноструктур/ Л.М. Журавлева, М.Р. Ивашевский, Н.О. Ефимова, А.А. Григорук // Региональная информатика и информационная безопасность (РИ-2016): Юбилейная XV Санкт-Петербургская международная конференция. Санкт-Петербург, 26-28 окт. 2016 г. – СПб, 2016. – С. 346 – 350.

12. Ивашевский, М.Р. Повышение технического уровня базовых элементов ВОСП / Л.М. Журавлева, М.Р. Ивашевский, Н.О. Ефимова, А.А. Григорук // Региональная информатика и информационная безопасность (РИ-2016): Юбилейная XV Санкт-Петербургская международная конференция. Санкт-Петербург, 26-28 октября 2016 г. – СПб, 2016. – С.297.

13. Ивашевский, М.Р. Перспективный канал связи с движущимся поездом // Инновационные научные исследования в современном мире: II Международная НПК. Уфа, 28 февраля 2020 г. – НИЦ Вестник науки, 2020. – С. 33-39.

14. Система двусторонней беспроводной оптической связи: заявка на изобретение RU 2020130839 А / Л.М. Журавлева, В.Л. Лошкарев, М.Р. Ивашевский, В.В. Левшунов, М.А. Нилов; рег. номер: 2020130839, 18.09.2020 г.

15. Ивашевский, М.Р. Применение СИВ на железнодорожном транспорте / М.Р. Ивашевский, Д.Г. Курьянцев, В.Л. Лошкарев // Безопасность движения поездов: XIX Всероссийская НПК. Москва – МИИТ, 8-9 ноября 2018.– С.П-24.

16. Ивашевский, М.Р. Система интеллектуального видеонаблюдения для повышения БДП / М.Р. Ивашевский // Неделя науки-2019: Труды Всероссийской научно-практической конференции. Москва – РУТ (МИИТ), 25-29 марта 2019.

17. Ивашевский, М.Р. Система видеонаблюдения на ж/д транспорте/М.Р. Ивашевский // Неделя науки-2020: Труды Всероссийской научно-практической конференции. Москва – РУТ (МИИТ), 23-27 марта 2020.

Подписано в печать  
Формат 60×84/16. Усл. печ. л 1,0. Тираж 100. Заказ \_\_\_\_\_  
Издательство Российского университета транспорта  
127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр.7