

АННОТАЦИЯ
диссертационной работы Сансызбай Канибек Муратбекулы
на тему: «Обеспечение информационной безопасности для систем
железнодорожной автоматики и телемеханики», представленной на
соискание степени доктора философии (PhD) по специальности 6D070300
– Информационные системы

Актуальность работы. За последние 10 лет информационные технологии стали активным участником деятельности множества предприятий в мире, повышая их эффективность работы и оптимизируя производственные и управленческие процессы. Послание Президента Республики Казахстан от 10 января 2018 года ставит комплексную задачу по развитию традиционных базовых отраслей, в том числе, и логистики, путем повсеместного внедрения элементов Четвертой промышленной революции. В результате, Правительству Республики Казахстан была поручена задача по разработке комплекса мер технологического перевооружения базовых отраслей до 2025 года, ставшая инициатором Государственной программы «Цифровой Казахстан» (далее – Цифровой Казахстан). Согласно программе Цифрового Казахстана для обеспечения дальнейшего роста транспортно-логистической отрасли требуется внедрение транспортной системы, которая бы содействовала увеличению транзитного потенциала путем управления транспортными средствами, усилению безопасности на транспорте путем оперативной обработки информации и выработки оптимальных и рациональных решений и управляющих воздействий.

Качественная транспортная и логистическая инфраструктура дает мощный толчок развитию экономики за счет повышения связности территории и снижения накладных расходов на доставку товаров до места назначения.

В настоящее время в стране ведется активная работа по реформированию и развитию транспортного комплекса Республики.

В силу обширной территории и отраслевого дифференцирования Республики Казахстан для большинства крупных отечественных предприятий железнодорожный транспорт играет ключевую роль в логистической цепочке.

Расположение Казахстана в центре Евразийского континента, между емкими и динамично развивающимися рынками Европы и Юго-восточной Азии, в перспективе позволяет отечественному железнодорожному транспорту добиться эффективного раскрытия высокого транспортно-логистического потенциала.

Таким образом, единство экономического пространства, целостность государственности, оборона и безопасность страны в значительной степени зависят от устойчивой и надежной работы железнодорожного транспорта.

Новые железнодорожные линии обеспечили внутренние коммуникации между регионами, увеличили экспортный и транзитный потенциал Казахстана. Мегапроектами, реализованными в Казахстане за последние 25

лет, которые в народе окрестили «Дорогами независимости», «Дорогами жизни и надежды», стали железнодорожные линии Аксу – Дегелен, Хромтау – Алтынсарино, Шар – Усть-Каменогорск, Узень – Государственная граница с Туркменистаном, Жетыген – Коргас, Жезказган – Бейнеу, Аркалык – Шубарколь и Боржакты – Ерсай.

В настоящее время в «транспортных коридорах» и в пригородных зонах больших городов наблюдается стабильный рост объема грузовых и пассажирских перевозок. По прогнозам специалистов потребности в транспортировке продукции имеют тенденцию к росту. Между тем запас по пропускной способности на многих участках железной дороги фактически исчерпан. Поэтому, в очередной раз, но уже в новых экономических, технологических и организационных условиях, актуальна задача определения рациональных, в экономическом смысле, методов повышения провозной и пропускной способности сети железных дорог Республики Казахстан.

В настоящее время на сети железных дорог АО «Национальная компания «Қазақстан темір жолы» с целью ее непрерывного функционирования передаются значительные объемы ответственной конфиденциальной информации с помощью различных систем приема и передачи данных. Под ответственной информацией здесь понимается информация, используемая в дискретной системе, искажение которой переводит систему в неработоспособное состояние, при котором происходит опасное искажение алгоритма функционирования. Команды, несущие ответственную информацию, непосредственно влияют на функциональную безопасность перевозок. Кроме этого, высокую коммерческую ценность представляет логистическая информация о графике движения и местонахождении поездов. Основой обеспечения безопасности движения поездов являются системы железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ).

СЖАТ представляют собой совокупность технических средств, обеспечивающих контроль и управление с установленным уровнем безопасности движения стационарными путевыми и подвижными объектами железнодорожного транспорта, в которых роль и требования к каналам передачи информации существенно повышаются. Тенденция развития систем передачи информации на основе зарубежного и отечественного опыта указывает, что помимо традиционных средств, например рельсовых цепей, необходимо использовать новые системы, например – цифровые радиоканалы. При этом немаловажным фактором являются аспекты информационной безопасности и помехозащищенности беспроводных систем.

В настоящее время повышение эффективности работы железнодорожного транспорта в новых экономических условиях невозможно без надежной и безопасной высококачественной связи как основы внедрения новейших автоматизированных систем управления и обеспечения

оперативной и периодической информации, необходимой для управления перевозочным процессом и контроля за его осуществлением.

В программе развития железнодорожного транспорта Казахстана на долгосрочную перспективу внедрению новейших информационных технологий отведено одно из приоритетных мест. С учетом качественных, скоростных и объемных характеристик современные инфокоммуникационные устройства не только решают проблемы предоставления традиционных услуг железнодорожной связи, движения поездов, перевозок грузов и пассажиров, но и позволят существенно расширить их спектр за счет реализации программ автоматизации перевозочного процесса, обеспечивая слежение за продвижением груза и других видов услуг, оказание которых в настоящее время ограничивается техническими возможностями существующих устройств связи.

Как известно, для защиты информации в СЖАТ требуется совместное применение законодательных, организационных и программно-технических мер. Основными этапами обеспечения информационной безопасности СЖАТ являются выявление основных угроз безопасности информации, разработка ее политики, основных направлений, системы обеспечения и организационно-правовых мероприятий, выбор и адаптация технологий информационной защиты.

Целью диссертационной работы является обеспечение информационной безопасности впервые разрабатываемой национальной системы управления движением поездов KTCS (Kazakhstan Train Control Systems).

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются нижеследующие **задачи**:

- анализ состояния существующих систем железнодорожной автоматики и телемеханики;
- обоснование и исследование модели покрытия базовой станции для железнодорожной транкинговой связи;
- определение методов защиты информации в радиоканале TETRA национальной системы управления движения поездов KTCS;
- разработка архитектура национальной системы управления движения поездов KTCS;
- анализ безопасности протокола аутентификации наземного транкингового радио (TETRA);
- проведение экспериментальных исследований с целью практического применения системы радиоблокировки для обеспечения информационной безопасности на магистральной сети.

Научная новизна диссертационной работы определяется следующими полученными результатами:

1. Проведен анализ состояния существующих систем железнодорожной автоматики и телемеханики.
2. Впервые разработана архитектура национальной системы управления движения поездов KTCS.

3. Разработан алгоритм взаимодействия по радиоканалу, обеспечивающий информационную безопасность движения поездов.

4. Предложена обобщенная структура системы управления и обеспечения безопасности движения поездов.

Методы исследований. При решении задач, поставленных в научной работе, использованы классические методы теории сложности алгоритмов, теории связи и передачи информации, теории надежности информационных систем и математическое моделирование.

Объект исследования. Объектом исследования являются устройства автоматики и телемеханики, передачи информации и обеспечения безопасности перевозок на железнодорожном транспорте.

Предметом исследования является аутентификация и генерация ключей при передаче данных по радиоканалу.

Достоверность полученных результатов диссертационной работы определяется корректным использованием выбранного математического аппарата на современном уровне математической строгости, апробированием результатов диссертационных исследований на научных конференциях, семинарах и их внедрением.

Практическая ценность. Полученные в диссертации результаты актуальны при сравнении принятых на железных дорогах разных стран мира норм безопасности при передаче данных, а также их анализ с последующим предложением для АО «НК «КТЖ» рекомендаций, необходимых для подготовки к замене устройств централизаций на более современные, включая задачи, которые решены в рамках хозяйственного договора «Концепция модернизации и производства систем железнодорожной автоматики и телемеханики».

Положения, выносимые на защиту. По результатам исследования были решены нижеследующие задачи:

- проведен анализ состояния существующих систем железнодорожной автоматики и телемеханики;
- впервые разработана архитектура национальной системы управления движения поездов KTCS;
- разработан алгоритм взаимодействия по радиоканалу, обеспечивающий информационную безопасность движения поездов;
- предложена обобщенная структура системы управления и обеспечения безопасности движения поездов.

Структура диссертации включает введение, 4 раздела, заключение, список использованных источников и приложения.

Во введении дано обоснование актуальности выбранной темы диссертационной работы. Сформулированы цель, объект, предмет и задачи научно-исследовательской работы. Описаны результаты проведенных исследований, показаны их научная новизна и практическая значимость. Приведены данные об апробации основных результатов диссертационной работы.

В первом разделе диссертационной работы проведен анализ текущего состояния и обоснование необходимости модернизации СЖАТ на магистральной железнодорожной сети Республики Казахстан. Приведена общая характеристика проблемы и постановка задач исследования.

Большинство существующих системы управления движением поездов, а именно электрическая централизация, автоблокировка, диспетчерская централизация введены в эксплуатацию в 60-70-80-х годах XX века. Основой этих систем является релейная аппаратура, которая требует регулярного планово-предупредительного обслуживания, приводящего к увеличению эксплуатационных расходов на комплектующие и на содержание значительного штата работников, занятых текущим содержанием и ремонтом данной аппаратуры.

На магистральной сети железной дороги Казахстана устройства железнодорожной автоматики и телемеханики обслуживают 35 дистанций сигнализации и связи. При этом перечень обслуживаемых систем железнодорожной автоматики и телемеханики, обеспечивающих **управление** и контроль за движением поездов, безопасность движения составляет:

- системы электрической централизации управления стрелками и сигналами (ЭЦ);
- системы интервального регулирования движением поездов (автоматическая блокировка (АБ), полуавтоматическая блокировка (ПАБ) и радиоблокировка (РБ));
- системы автоматического управления переездной сигнализацией (АПС);
- системы диспетчерской централизации (ДЦ) и диспетчерского контроля (ДК).

В таблице 1 приведены основные характеристики составляющих системы ЖАТ в Республике Казахстан.

Таблица 1 – Современное состояние существующей системы ЖАТ

№	Наименование технических средств	Ед. изм.	Общая мощность технических средств	Мощности, введенные в эксплуатацию (После 2000 г.)	Мощности, введенные в эксплуатацию В период (1980- 2000 г.)	Мощности, эксплуатируемые более 37 лет (До 1980 г.)
1	Автоматическая блокировка	км.	11346	2681,5	5163,92	3501,5
2	Радиоблокировка	км	1629	1629	-	-
3	Полуавтоматическая блокировка (ПАБ)	км.	2825	1327,47	832,62	664,9
4	Электрическая централизация ЭЦ (в т.ч. МПЦ, РПЦ)	стр.	15817 (1216)	2076 (1216)	7888	5853
5	Ключевая зависимость	стр.	412	25	146	241
6	Диспетчерская централизация (в т. ч. МПДЦ)	км.	12057 (7702)	7702 МПДЦ	2435	1920
7	Горочная централизация	стр.	361	43	208	110

На основании представленных данных, железные дороги Казахстана при общей протяженности железнодорожной сети 15,8 тыс. км, оборудованы:

системами интервального регулирования движением поездов - автоблокировкой АБ – 11346 км (71,8%), современными системами радиоблокировки (СИРДП-Е) – 1629 км (11,5%), полуавтоматической блокировкой ПАБ – 2825 км (16,6%). Диспетчерской централизацией ДЦ оборудовано – 12057 км (76,3%). В электрическую централизацию станций включено – 15817 стрелок (92%).

По своему качественному уровню существующие системы СЦБ на железной дороге Республики Казахстан не удовлетворяют современным требованиям комплексной автоматизации перевозочного процесса, сдерживают массовое внедрение информационных технологий, не обеспечивают внедрение безлюдных технологий по их обслуживанию, не всегда обеспечивают совместимость с системами среднего и верхнего уровня, а также не обеспечивают оптимальный уровень эксплуатационных затрат на их обслуживание и ремонт.

С использованием критериев морального старения оценивается состояние следующих систем СЦБ на перегонах и станциях: устройства ЭЦ, устройства АБ и ПАБ, РЦ, АПС, и ДЦ.

Решение о полной замене систем СЦБ целесообразно применять с учетом одного или совокупности факторов:

- система морально устаревшая;
- объем монтажных работ с учетом браковочных признаков (электроизоляционные пластмассовые изделия), составляет более 20% от всех монтажных работ;
- стоимость замены изношенных элементов системы составляет более 25% от стоимости современных систем.

Анализ показывает, что практически эксплуатируемые средства СЦБ, введенные до 1990 г., имеют длительный срок службы, высокий уровень износа, по своему качественному уровню не удовлетворяют современным требованиям комплексной автоматизации перевозочного процесса, сдерживают массовое внедрение информационных технологий, не обеспечивают внедрение малообслуживаемых технологий (по системам ЭЦ – рисунок 1, по системам АБ – рисунок 2 и по системам ДЦ – рисунок 3).

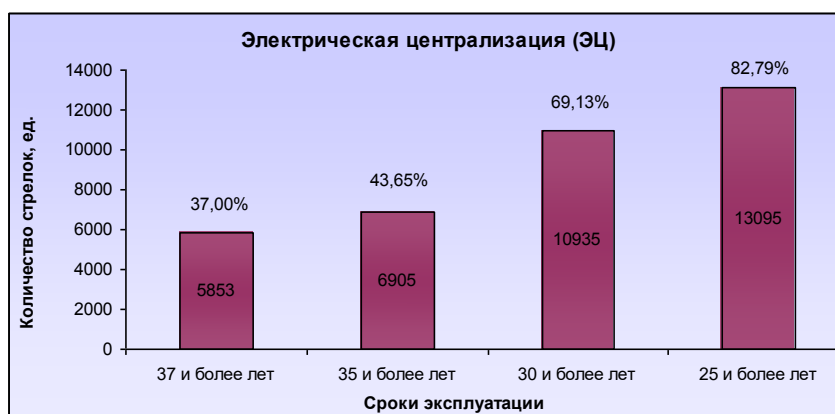


Рисунок 1 – Диаграмма по срокам эксплуатации систем электрической централизации

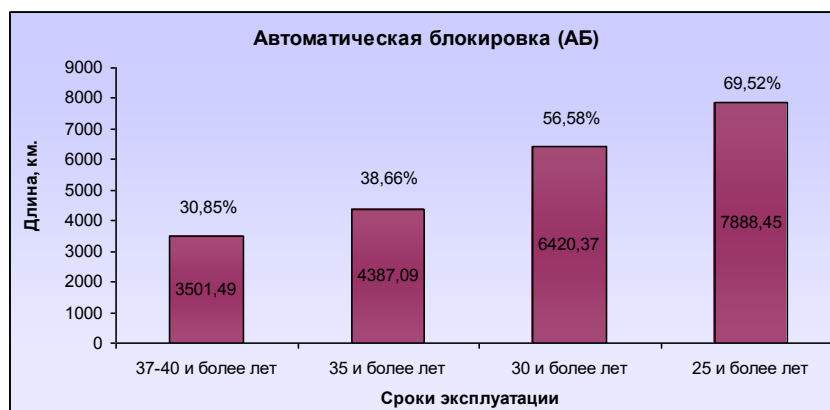


Рисунок 2 – Диаграмма сроков эксплуатации систем интервального регулирования движения поездов

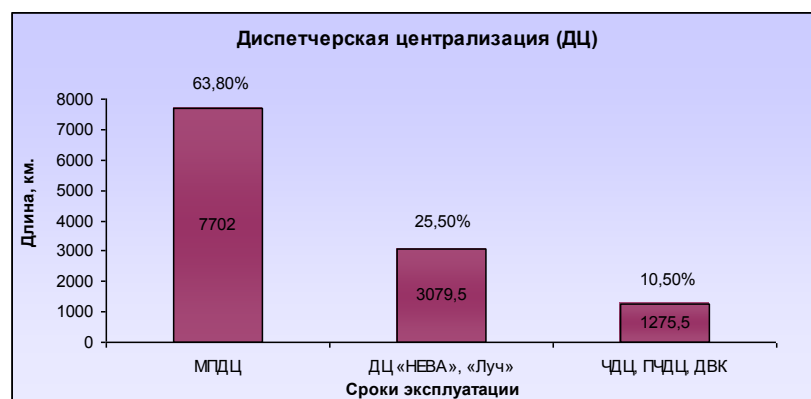


Рисунок 3 – Диаграмма сроков эксплуатации систем диспетчерской централизации

Анализ показывает, что общее состояние средств ЖАТ близка к критической. Более 70% основных устройств ЖАТ, которые непосредственно обеспечивают безопасность и управление движением поездов эксплуатируются с длительным сроком службы. Если в ближайшее время не будут предприняты меры по реконструкции и модернизации железнодорожных участков, оборудованных существующими системами СЦБ, то к 2025 году эта цифра может превысить 80%.

Большой объем устройств с длительным сроком службы, большая потребность в замене старой релейной аппаратуры на новую, отсутствие средств диагностики ведет к росту эксплуатационных затрат на их содержание. Риск их отказов увеличивается с каждым годом. Использование релейных систем не позволяют обеспечить современный уровень автоматизации перевозочного процесса, диагностику и мониторинг работы автоматизированных систем. Отсутствие нормативного аварийно-восстановительного запаса снятого с производства ряда релейной элементной базы и невозможности его восстановления является существенным фактором угрозы полной остановке деятельности железнодорожного транспорта.

Существующая структура и состояние технических средств ЖАТ являются сдерживающим фактором при решении задач по развитию железнодорожного транспорта. Поэтому в последние годы назрела

необходимость внедрения современных микропроцессорных систем ЖАТ, наиболее полноценно отвечающих задачам создания интегрированной системы, как основы формирования многоуровневой системы безопасности и единой автоматизированной системы управления, в совокупности с созданием сервисных центров, организации удаленного мониторинга и постоянного администрирования технических средств ЖАТ.

Кроме того, модернизация СЖАТ окажет эффекты на сокращение оборота вагонов, локомотивов, снижения задеймованности маневровых локомотивов на станции. В пассажирском движении позволит увеличить скорость проследования поездов по прямым участкам до 200 км/час, что в национальном масштабе и позволит повысить мобильность населения Республики Казахстан за счет обеспечения времени нахождения в пути не более 12 часов между крайними точками, что ведет к необходимости разработки национальной системы управления движением поездов KTCS.

Во втором разделе впервые разработана архитектура национальной системы управления движением поездов KTCS. На основе применения известных средств защиты достигаются следующие характеристики, связанные с безопасностью: аутентичность, целостность, своевременность и последовательность сообщений. Решены задачи информационной безопасности и защиты информации в системе цифровой технологической радиосвязи стандарта TETRA. Эффективность предложенных алгоритмов показана на модели архитектуры системного протокола TETRA.

При разработке прототипа системы «KTCS» были проведены пилотные испытания на участках Узень-Болашак и Хоргос-Жетыген, где была внедрена многофункциональная система для автоматизации процесса интервального регулирования движением поездов в режиме реального времени с применением цифровых радиосистем. Полученный эффект характеризуется следующим:

- существенное сокращение первоначальных капитальных вложений. Полная стоимость внедрения первого пилотного проекта, включая затраты на адаптацию, тестирование и строительно-монтажные работы по СЦБ и Связи, на 3,8% ниже стоимости строительства традиционной АБ;
- существенное сокращение сроков строительства (более чем на 20%);
- существенное снижение эксплуатационных затрат (сокращение численности эксплуатирующего персонала на 27% от кол-ва определенного Проектом строительства традиционной АБ, сокращение общего кол-ва авто транспортных средств почти в 2 раза, уменьшение объема проверок устройств СЦБ в соответствии с инструкцией ЦШ-720 почти в 3 раза);
- высокая надежность и готовность системы - «горячее резервирование» основных элементов системы, когда в случае выхода из строя основных средств управления система переходит в защищенное состояние с безопасным контролем занятия и освобождения поездом перегона.

Таким образом, KTCS являющаяся самой современной системой командного управления и сигнализации на железной дороге, представляет

собой коммуникационную систему, которая управляет и контролирует движение поездов. Принцип работы системы поясняется на рисунке 4.

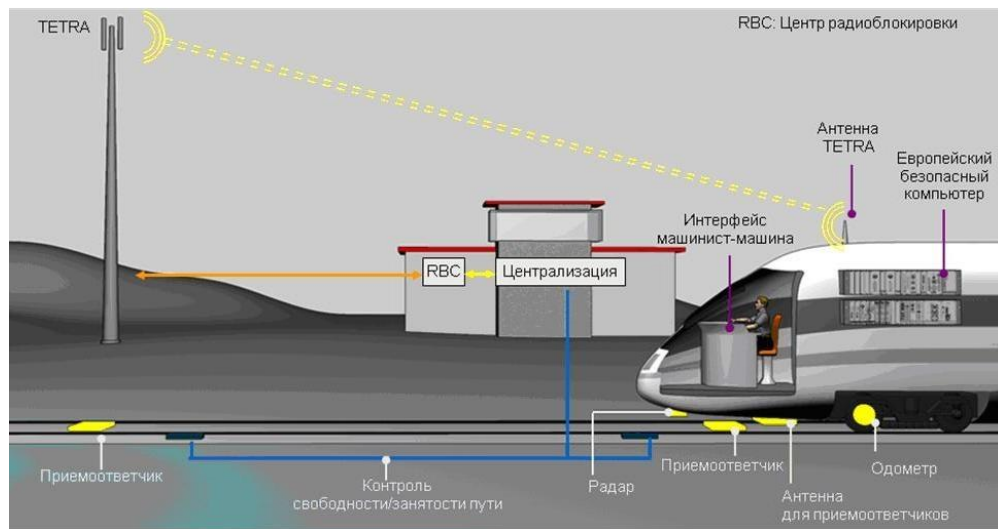


Рисунок 4 – Принцип работы системы KTCS

На рисунке 5 представлена упрощенная структура МПЦ на примере одной станции. На верхнем уровне управления и контроля имеются АРМ для дежурного по станции, поездного диспетчера и электромеханика СЦБ. На среднем уровне находится интегрированное с центром радиоблокировки центральное процессорное устройство с двумя комплектами РМ, ниже которого располагаются модули управления напольными устройствами. На этом же уровне обеспечивается интерфейс с соседними централизациями.

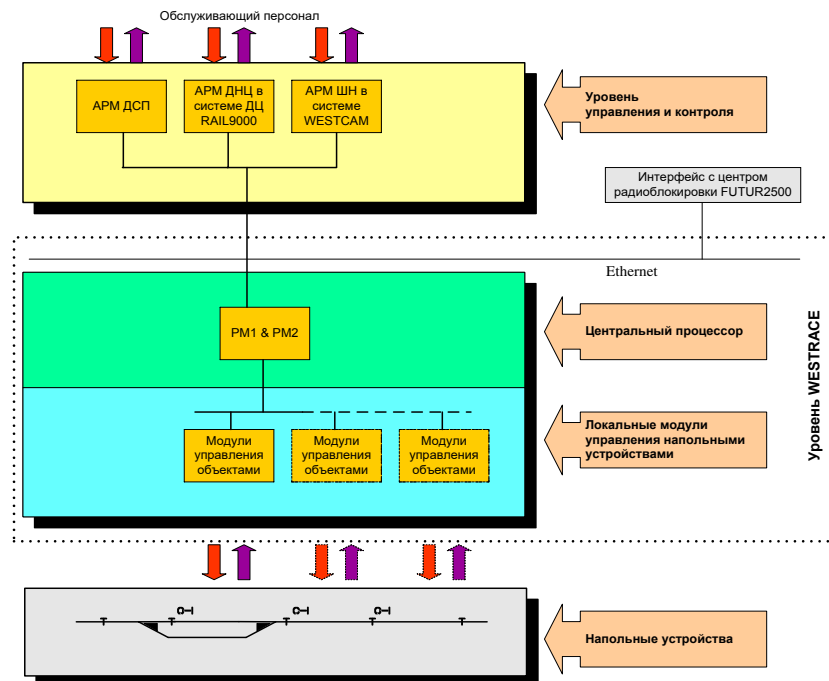


Рисунок 5 – Структура МПЦ на примере одной станции

Рассмотрим пример передачи данных. Стационарное устройство, использующее локальный радиоканал, в порядке очередности посылает сообщения на локомотивы, находящиеся в зоне его действия и получает квитанции уведомления от локомотивов о получении сообщений. Предположим, что сообщение длиной $M=252$ бита содержательной информации в телеграмме на локомотив, дополнительная каждая посылка кодируется методом CRC длины $N=48$ (обнаруживающая способность которого составляет $3,6 \cdot 10^{-15}$), посылается на поезд по радиоканалу со скоростью 900 бит/сек (т.е. 10800 сообщений в час). При этом процесс передачи предусматривает механизм повтора посылок и соответствующий запаздывающий учет, получаемых на борту данных на период повторов передачи.

Опасный отказ при передаче с учетом повторов возникает в том случае, если при первой попытке ошибка в передаче не была обнаружена проверкой контрольных условий, либо первая ошибка была обнаружена, а вторая не обнаружена, либо первые две были обнаружены, а третья нет и т.д.

Общая эффективность применения кода CRC в соответствии со стандартом CENELEC EN 50159 оценивается вероятностью необнаруженной ошибки 2^{-N} , где N -разрядность кода. Распространенное значение параметра потока отказов составляет 10^{-3} , 10^{-4} , и учитывает среднюю вероятность искажения (не обязательно одиночного) на бит передаваемой посылки. Отсюда вероятность ошибки (не обязательно одиночной) в посылке длины $M+N$ рассчитывается по формуле $(M + N) \cdot 10^{-4}$.

Тогда вероятность опасного отказа при передаче посылки составит:

$$P_{оп} = 2^{-N} P_1 + 2^{-N} P_1^2 + \dots + 2^{-N} P_1^L = 2^{-N} P_1 \frac{1 - P_1^L}{1 - P_1} \quad (1)$$

где $L=8$ – количество допустимых повторов (согласно нормам МККТТ); $P_1 = (M + N) \cdot 10^{-4}$ – вероятность не передачи посылки за рабочий цикл.

Интенсивность опасного отказа вычисляется по формуле:

$$\lambda_{оп} = 10800 \cdot P_{оп} = 10800 \cdot 1,57 \cdot 10^{-16} = 1,7 \cdot 10^{-12} \text{ 1/ч} \quad (2)$$

Метод «циклического избыточного кода» надежно обнаруживает случайные изменения в данных, однако недостаточно эффективен в случае несанкционированного изменения информации.

Третий раздел посвящен анализу многоуровневой модели безопасной передачи данных KTCS. Приведен обмен информацией между элементами KTCS. Проанализированы архитектуры сети GSM-R и TETRA, выявлены факторы, влияющие на передачу KTCS в TETRA. Предложена последовательность аутентификации и генерации ключей при передаче данных по радиоканалу и криптографический анализ MAC.

Одним из главных требований на железнодорожном транспорте является безопасность. Обеспечение защиты данных в системах управления является задачей, влияющей на безопасность системы. Поэтому данные, передаваемые по радиоканалу должны быть защищены от несанкционированного воздействия и искажений.

На основе криптографических методов реализуется аутентификация в протоколе Euroradio, используемом в системе KTCS. В протоколе Euroradio в качестве функции MAC используется метод на основе блочного шифра, называемый СВС-МАС. Основная идея алгоритма СВС-МАС заключается в шифровке сообщения m с помощью блочного шифра в режиме сцепления шифрованных блоков (СВС – cipher block chaining) и отбрасывании всех блоков шифрованного текста кроме последнего. Для сообщения, состоящего из блоков $P_1, \dots, P_k$, значение МАС вычисляется на основе следующих формул:

$$\begin{aligned} H_0 &= 0; \\ H_i &= E_k(P_i \oplus H_{i-1}) \\ MAC &= H_k. \end{aligned} \quad (3)$$

При установлении сессии в момент подключения происходит процедура аутентификации, показанная на рисунке 6.

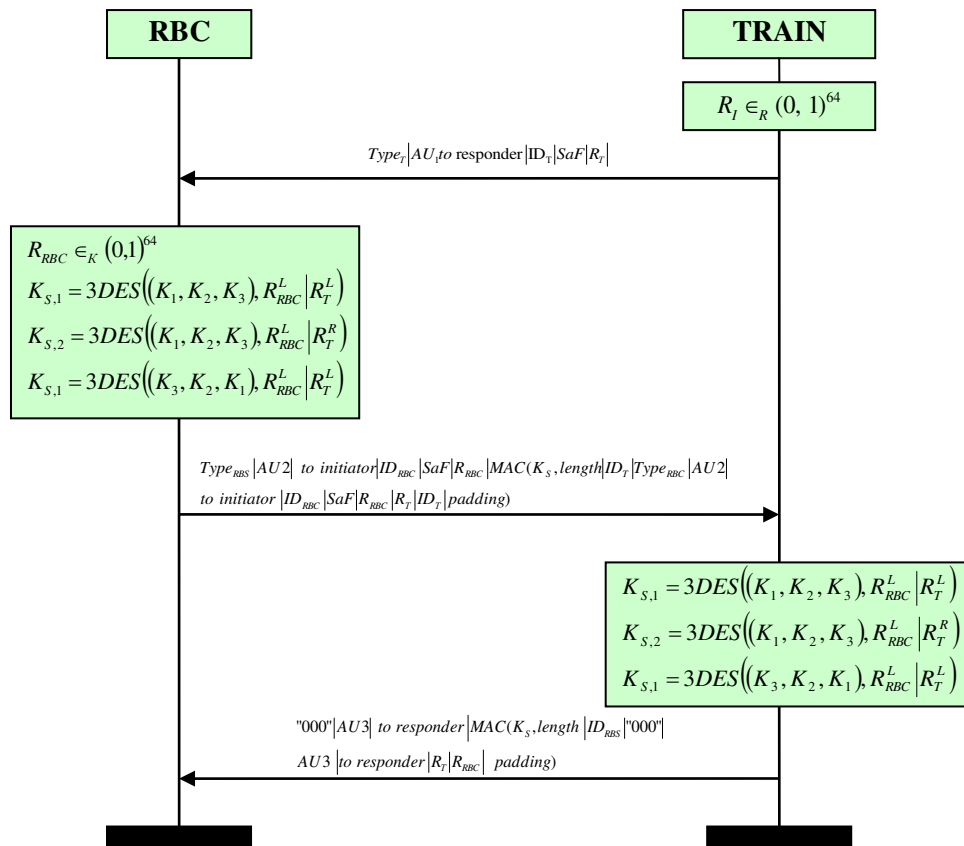


Рисунок 6 – Последовательность аутентификации и генерации ключей

Сторона Б передает случайное число R_b длиной 64 бита, которое генерируется Б. Число R_b сохраняется на стороне Б. После получения этого

сообщения сторона А генерирует случайное число Ra длиной 64 бита и вычисляет MAC по полю Текст3, случайным числам Ra и Rb, идентификатора DA и битов заполнения. MAC (message authentication code), который представляет собой число, мешающее злоумышленнику подделывать сообщения. Фактически код аутентичности сообщения (MAC) – это функция, которая принимает на вход два аргумента (ключ K фиксированной длины и сообщение m произвольной длины) и выдает значение фиксированной длины.

Для вычисления MAC рассчитывается сессионный ключ Ks на основе параметров Ra, Rb и аутентификационного ключа Kab в соответствии со следующей процедурой:

- числа Ra, Rb делятся на 32 битные блоки.

$$\begin{aligned} R_A &= R_A^L | R_A^R \\ R_B &= R_B^L | R_B^R \end{aligned} \quad (4)$$

Три 64 битных ключа Ks1, Ks2, Ks3 вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} K_{s1} &= MAC(R_A^L | R_B^L, K_{AB}) = DES(K_3, DES^{-1}(K_2, DES(K_1, R_A^L | R_B^L))) \\ K_{s2} &= MAC(R_A^R | R_B^R, K_{AB}) = DES(K_3, DES^{-1}(K_2, DES(K_1, R_A^R | R_B^R))) \\ K_{s3} &= MAC(R_A^L | R_B^L, K'_{AB}) = DES(K_1, DES^{-1}(K_2, DES(K_3, R_A^L | R_B^L))) \end{aligned} \quad (5)$$

где $K_{MAC} = (K_1, K_2, K_3)$.

Вычисление MAC в протоколе Euroradio основано на использовании стандарта шифрования TripleDES, который является симметричным блочным шифром. При проектировании протокола для нужд АО «Национальная компания «Казахстан темир жолы» предполагается заменить TripleDES на стандарт симметричного шифрования ГОСТ 28147-89 «Системы обработки информации. Защита криптографическая. Алгоритм криптографического преобразования».

В системе KTCS защиту передаваемых данных осуществляет протокол Euroradio, предназначенный для передачи данных, связанных с безопасностью, по радиоканалу с использованием открытых сетей связи.

В четвертом разделе приведено описание разработанной системы и модели радиоблокировки. Разработана модель покрытия базовой станции для железнодорожной транкинговой связи. Путем эксперимента определены процент потери пакетов в радиосети, потери на трассе и доплеровский сдвиг в зависимости от местоположения на частоте 450 МГц.

Практическое применение системы радиоблокировки рассмотрено на участке Жетыген – Алтынколь Алматинского отделения магистральной сети. При практическом применении рассмотрены вопросы связи центра радиоблокировки и центра коммутации TETRA, увязки центра радиоблокировки с системами электрической централизации, модернизации бортового оборудования локомотива, проверки алгоритмов работы бортового и стационарного оборудования.

На первом этапе эксперименты проводятся согласно схеме, представленной на рисунке 7.

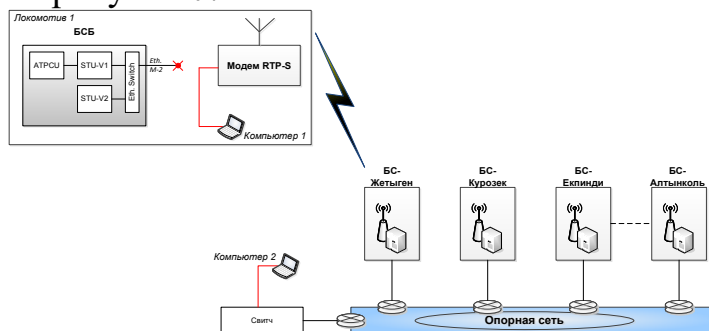


Рисунок 7 – Схема проведения экспериментов – этап 1

Результаты измерений, включающие в себя данные о пропускной способности канала, время прохождения пакетов, данные о потере пакетов в радиосети TETRA представлены на рисунках 8-10.

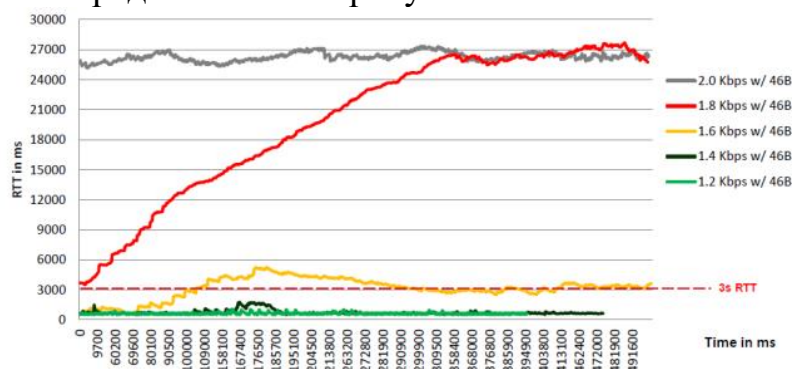


Рисунок 8 – Время прохождения пакета размером 46 байт

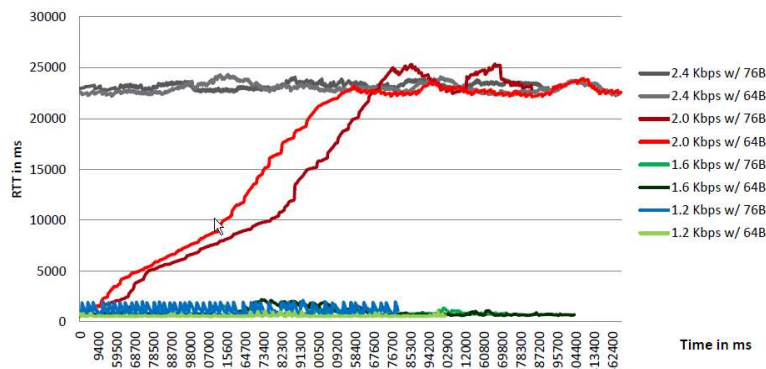


Рисунок 9 – Время прохождения пакета размером 64 и 76 байт

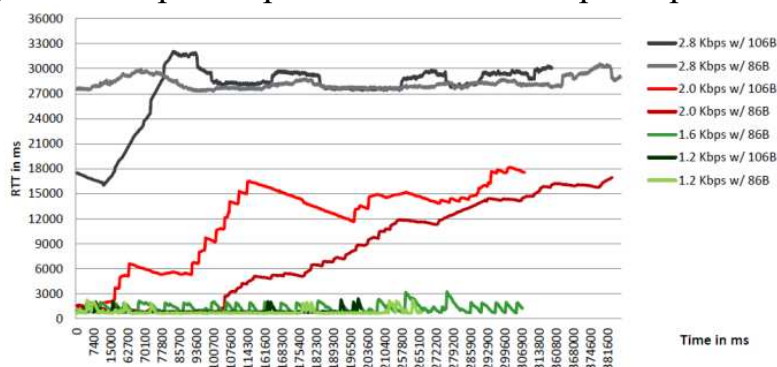


Рисунок 10 – Время прохождения пакета размером 86 и 106 байт

На втором этапе эксперименты проводятся согласно схеме, представленной на рисунке 11.

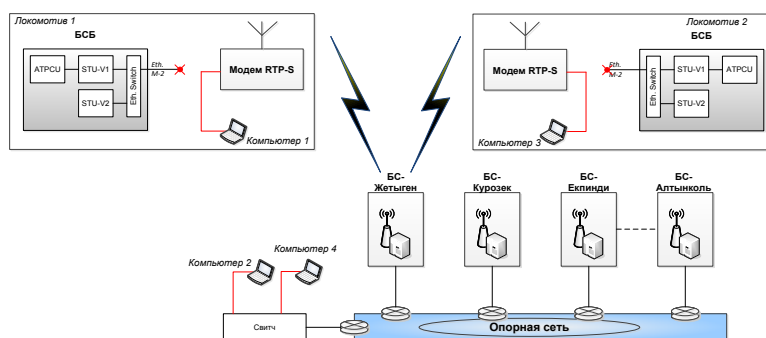


Рисунок 11 – Схема проведения экспериментов – этап 2

Результаты измерений, включающие в себя данные о пропускной способности канала, время прохождения пакетов, данные о потере пакетов в радиосети TETRA представлены на рисунке 12.

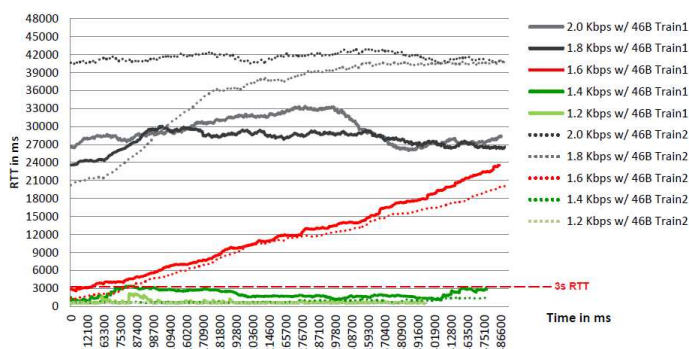


Рисунок 12 – Время прохождения пакета размером 46 байт

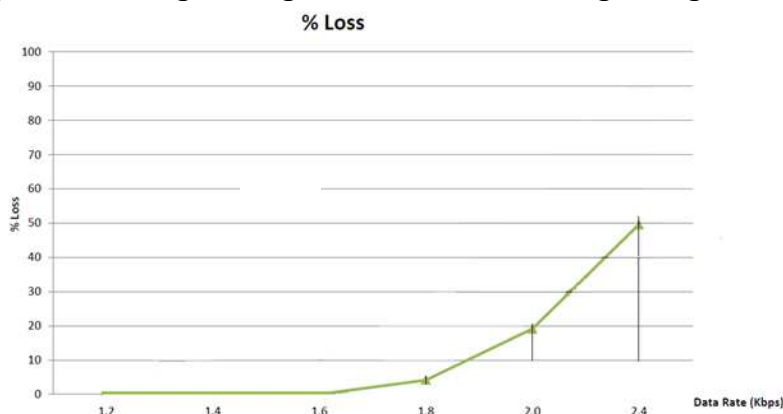


Рисунок 13 – Процент потери пакетов в радиосети

Проведенные эксперименты показывают, что при любом размере пакета в системе цифровой радиосвязи стандарта TETRA при увеличении нагрузки на систему увеличивается время прохождения пакетов. Для скорости передачи до 1,4 кбит/с система удовлетворяет требованиям для времени прохождения пакетов. Начиная с нагрузки 1,6-2,0 кбит/с время прохождения пакетов становится неприемлемо большим и достигает 30-40 секунд, что не соответствует предъявляемым требованиям. Одновременно с этим, растет процент потерянных пакетов (до 50%), причем наблюдаются

потери нескольких пакетов подряд.

Разработанная модель покрытия БС для транкинговой связи приведена на рисунке 14. Базовые станции расположены вдоль железной дороги с разнесением друг от друга на расстояние $2R$, что представляет расстояние обслуживания одной БС. Поезд движется с постоянной скоростью v вдоль рельса.

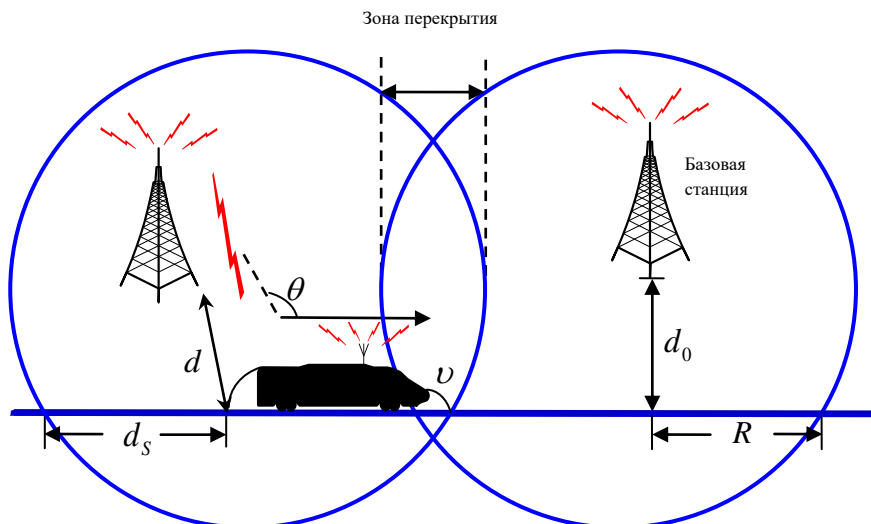


Рисунок 14 – Модель покрытия базовой станции для железнодорожной транкинговой связи

Когда поезд находится в положении d_s текущей ячейки для $0 \leq d_s \leq 2R$, расстояние между БС и поездом составляет, $d = \sqrt{d_0^2 + (d_s - R)^2}$, где d_0 - расстояние между БС и железнодорожной линией. Исходя из предположения об игнорировании разницы высот между антенной БС и железнодорожной антенной, потери при прохождении трассы прямой видимости в свободном пространстве определяются:

$$L = 20 \log_{10} \left[\frac{4\pi df}{c} \right], \quad (6)$$

где f и c – излучаемая частота и скорость света соответственно.

Из (6) видно, что потери на трассе L связаны с расстоянием d и частотой f .

Для проведения эксперимента базовая станция расположена в точке 0, радиус ячейки R равен 1500 м, а скорость движения поезда v равна 100 км/ч.

На рисунке 15(а) показано влияние расстояния и частоты от потерь на трассе. Как видно из рисунка потери на трассе быстро меняются в зависимости от местоположения поезда. Когда поезд движется к краю ячейки, потери на трассе становятся больше, и соответствующее состояние канала ухудшается. Напротив, когда поезд движется к центру ячейки, потери на трассе становятся меньше, и соответствующее состояние канала меняется лучше. Таким образом, периодическое изменение состояния канала приводит

к тому, что управление мощностью по времени оказывает большое влияние на производительность передачи.

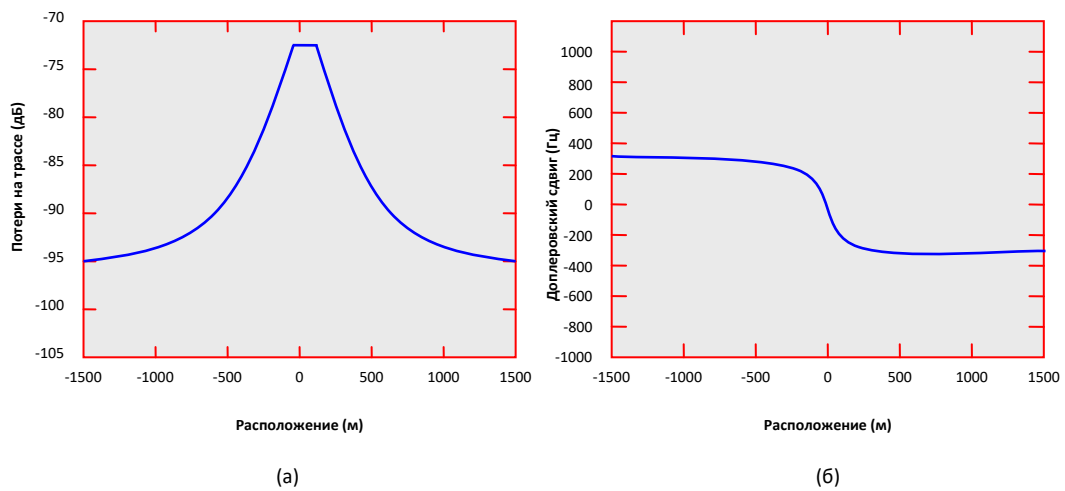


Рисунок 15 – Потери на трассе и доплеровский сдвиг в зависимости от местоположения на частоте 450 МГц

Высокая мобильность вызывает большое доплеровское смещение и распространение. На данном участке отношение энергии в тракте трассы прямой видимости к энергии в многолучевом распространении относительно велико, а задержка многолучевого распространения относительно мала. Как показано на рисунке 14, когда поезд движется вдоль рельса, доплеровское смещение f_p можно рассчитать как

$$f_p = f_d \times \cos \theta, \quad (7)$$

где $f_d = \frac{v}{c} \cdot f$ - максимальная доплеровская частота, θ - угол между прямым направлением поезда и линией визирования от БС до поезда. На основании информации о геометрии, из рисунка 14, мы имеем $\cos \theta = \frac{R - d_s}{d}$, $0 \leq d_s \leq 2R$.

Таким образом, когда БС расположена далеко от рельса, то есть $d_0 \gg R$, f_p относительно низка, поскольку θ будет приблизительно 90° . Однако это приведет к большим потерям на трассе согласно уравнению (6). Таким образом, существует компромисс между потерей на трассе и доплеровским сдвигом при оптимизации назначений БС.

На рисунке 15(б) показано доплеровское смещение вдоль рельса для несущей частоты 450 МГц:

- f_p изменяется во времени от максимального положительного значения до максимального отрицательного значения, когда поезд движется через ячейку;
- в процессе движения существует доплеровское смещение;
- хотя f_p очень мало, когда поезд движется через БС, он столкнется с быстрым доплеровским переходом;

- f_p будет переходить от максимального отрицательного значения к максимальному положительному значению, когда поезд перемещается в область перекрытия между соседними ячейками, как показано на рисунке 15.

Для беспроводной транкинговой связи перед практическим применением необходимо решить серьезные проблемы с доплеровским сдвигом и быстрым доплеровским переходом. Серьезное доплеровское смещение может привести к затруднению синхронизации и частоте появления ошибок по битам. Следует отметить, что хотя доплеровский сдвиг велик, его изменение настолько мало, т.е. его можно точно оценить и легко компенсировать при наличии точной информацией о скорости и местоположении поезда. Также быстрый доплеровский переход в центре ячейки значительно усложняет процесс оценки канала и доплеровского сдвига.

В заключении изложены основные результаты и выводы диссертации.

Обоснованность выносимых на защиту научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректностью использования математического аппарата; корректной постановкой экспериментов и их обработкой; качественным и количественным соответствием результатов теоретических исследований и экспериментальных данных; практическим применением результатов исследований.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались:

- XLI Международной научно-практической конференции на тему «Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика» (Казахстан, Алматы КазАТК им. Тынышбаева, 2017),

- Международной научно-практической конференции «Ауэзовские чтения – 15: Третья модернизация Казахстана – Новые концепция и современные решения», посвященной 120-летию Мухтара Омархановича Ауэзова (Казахстан, Шымкент ЮКГУ им. М.Ауэзова, 2017);

- V Международной научно-практической конференции «Интеллектуальные информационные и коммуникационные технологии – средство осуществления третьей индустриальной революции в свете Стратегии «Казахстан-2030» (Казахстан, Нур-Султан ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, 2018);

- круглый стол в компании Hyukshin Co., Ltd. (Южная Корея, г. Сеул), июнь 2018;

- V Международной конференции «Цифровые технологии в науке и индустрии – 2019» (DTSI-2019), посвященная 10-летию международного университета информационных технологий. (Казахстан, МУИТ, 2019) получен диплом I степени;

- Всероссийский научно-технической конференции с международным участием «Эффективность и безопасность электротехнических комплексов и систем автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте» (Россия, Омский государственный университет путей сообщения, 2019).

Всего доклады сделаны на семинарах, конференциях различного уровня и круглых столах.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 13 статей, 5 работа в изданиях, включенных в перечень ККСОН МОН РК, 7 работ в материалах конференций, симпозиумах, семинарах, 1 статья в журнале, входящего в базу Scopus.

Научные публикации:

1. Бахтиярова Е.А., Сансызбай К.М. О разработке межгосударственного стандарта на системы счета осей // Вестник КазАТК, «Специальный выпуск, посвященный заседанию Межгосударственного технического комитета по стандартизации №524 «Железнодорожный транспорт», Астана – 2016, С. 57-60.

2. Куандыков А.А., Сансызбай Қ.М. Әлемдік масштабтағы теміржол автоматика және телемеханика жүйелерінің даму тенденциялары мен принциптері // Материалы ХLI Международной научно-практической конференции на тему «Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика» Алматы, 3-4 апреля 2017. С. 11-16.

3. Бахтиярова Е.А., Чигамбаев Т.О., Сансызбай К.М. Технология будущего распределенное акустическое зондирование DAS в режиме реального времени // Материалы ХLI Международной научно-практической конференции на тему «Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика» Алматы, 3-4 апреля 2017 г. С. 49-54.

4. Куандыков А.А., Сансызбай К.М. The development of the national microprocessor system «KTCS» // Труды международной научно-практической конференции «Ауэзовские чтения – 15: Третья модернизация Казахстана – Новые концепция и современные решения», посвященной 120-летию Мухтара Омархановича Ауэзова. Шымкент, 13-14 апреля 2017 г. С. 276-279.

5. Куандыков А.А., Сансызбай Қ.М. Еліміздің темір жол желілерінде ұлттық «Kazakhstan Train Control Systems» жүйесін енгізу арқылы пойыздар қозғалысының акпараттық қауіпсіздігін қамтамасыз ету // Труды V Международный научно-практической конференции «Интеллектуальные информационные и коммуникационные технологии – средство осуществления третьей индустриальной революции в свете Стратегии «Казахстан-2030», Астана ЕНУ, 22 февраля 2018г. С. 460-463.

6. Бахтиярова Е.А., Сансызбай К.М. Сравнительный анализ микропроцессорной централизации стрелок и сигналов // Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева, Астана 2018г., №2 (123). С. 30-36.

7. Бахтиярова Е.А., Куандыков А.А., Сансызбай К.М. Стандартизация и сертификация систем автоматики и телемеханики на железных дорогах мира и в Республике Казахстан // Вестник КазАТК, Алматы 2018г., № 4 (107), С. 337-346.

8. Бахтиярова Е.А., Сансызбай К.М. «ҚТЖ» ҰК» АҚ-дағы ТАТ жүйелерін жаңғыртуды жүзеге асырмаған жағдайдағы тәуекелділікті талдау // Материалы ХLIII Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика»,

посвященной 140-летию Мухамеджана Тынышпаева. Том 1, 17 апрель 2019г, С. 120-124.

9. Куандыков А.А., Сансызбай К.М. Темір жол автоматика және телемеханика жүйелерінде акпараттық қауіпсіздікті қорғау әдістері // Қазақстан Британ техникалық университетінің хабаршысы, Алматы 2019г., № 16, С. 353-359.

10. Бахтиярова Е.А., Сансызбай К.М. Анализ рисков в случае неосуществления модернизации существующих систем в Республике Казахстан // Материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Эффективность и безопасность электрических комплексов и систем автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте», Омский государственный университет путей сообщения, 28 ноября 2019г. С. 97-105.

11. Sansyzbay K.M., Kuandykov A.A., Bakhtiyarova Ye.A., Vlasenko S.V., Mamyrbaev O.Zh. Radio communication channel interaction method, maintaining train performance information security // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 31st March 2020. Vol.98. No 06. pp. 957-969.

12. Бахтиярова Е.А., Дуйсебекова К.С., Чигамбаев Т.О., Сансызбай К.М. Практическое применение системы радиоблокировки для обеспечения информационной безопасности на магистральной сети // Промышленный транспорт Казахстана, Алматы 2020г., №1 С.111-117.

13. Куандыков А.А., Сансызбай К.М. Метод взаимодействия по радиоканалу, обеспечивающий информационную безопасность движения поездов // Программа XLIV Международной научно-практической конференции КазАТК им. М. Тынышпаева «Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика», Алматы 2020г., С.56-59.

Акты внедрения:

1. Справка о внедрении результатов научных разработок в компании Nyukshin (Южная Корея, Сеул, 2020);

2. Акт внедрения результатов диссертационной работы в Филиале АО «НК «КТЖ» - «Дирекция автоматизации и цифровизации», 2020.