Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 004.725.5

НОЖНИКОВ
Евгений Александрович

МОДЕРНИЗАЦИЯ СЕТИ СБОРА И ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯ СВЯЗИ

Автореферат
на соискание степени магистра
по специальности 1–45 80 01 Системы и сети инфокоммуникаций

_____

Научный руководитель
Кандидат технических наук,
доцент ХАЦКЕВИЧ
Олег Александрович

_____

Минск 2026

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами

Тема диссертационной работы соответствует пункту 1 приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2021–2025 гг., утвержденных Указом Президента Республики Беларусь №156 от 7 мая 2020 г. «Цифровые информационно-коммуникационные и междисциплинарные технологии, основанные на их производстве». Работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Цель и задачи исследования

Целью магистерской диссертации является исследование способов повышения эффективности сети сбора и обработки данных ЦОД предприятия связи, а также повышение отказоустойчивой комплексной централизованной системы с более высоким уровнем производительности.

Для достижения поставленной цели в диссертации решены следующие задачи:

1 Рассмотрены принципы построения сетей сбора и передачи данных.

2 Рассмотрены тенденции модернизации сети сбора и передачи данных предприятия связи.

3 Разработана инженерная инфраструктура дата-центра.

4 Разработана система мониторинга, безопасности, контроля, управления доступом и видеонаблюдения.

5 Выбрано оборудование для ЦОД.

6 Рассчитаны основные технические параметры модернизированной сети сбора и передачи данных.

7 Выбрана технология виртуализации ЦОД.

Личный вклад соискателя ученой степени

Содержание диссертации отображает личный вклад автора. Он заключается в научном обосновании модернизации сети сбора и передачи данных предприятия связи на базе создания центра обработки данных и технологии виртуализации, представляющей собой комплексное решение, позволяющее существенно снизить расходы на расширение серверной инфраструктуры и на ее обслуживание.

Определение целей и задач исследований, интерпретация и обобщение полученных результатов проводились совместно с научным руководителем к.т.н., доцентом О.А. Хацкевичем.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: 60-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, г. Минск.

Опубликование результатов диссертации

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликована 1 печатная работа.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка.

Общий объем диссертационной работы составляет 93 страницы, 29 рисунков, список использованных библиографических источников (33 наименование на 3 страницах), список публикаций автора по теме диссертации: 1 наименование.

Проверка на уникальность

Проведена экспертиза диссертации Ножникова Евгения Александровича «Модернизация сети сбора и передачи данных предприятия связи» на корректность использования заимствованных материалов с применением сетевого ресурса «Антиплагиат» (адрес доступа: https://antiplagiat.ru) в *on-line* режиме 3 декабря 2024 г. В результате проверки установлена корректность использования заимствованных материалов (оригинальность диссертационной работы составляет 73,91 %).

ВВЕДЕНИЕ

Тенденции к централизации вычислительной мощности, а также растущий уровень автоматизации поднимают сегодня проблемы построения вычислительных систем высокой доступности на новый уровень. Единый, целостный информационный ресурс предприятия с гарантированными уровнями достоверности, доступности и безопасности данных обеспечивается центром обработки данных (ЦОД), где все данные и приложения централизованным образом хранятся и исполняются в специальной структуре. В данной работе предложен проект модернизации центра обработки данных предприятия связи.

Актуальность темы связана с тем, что, в связи с увеличением спроса на услуги, предоставляемые сетью сбора и обработки данных ЦОД предприятия связи, а также изменением структуры трафика сети, возникает острая необходимость в проектирование отказоустойчивой комплексной централизованной системы с более высоким уровнем производительности.

В общем случае, понятие ЦОД включает в себя следующие элементы:

– серверы с высокой надежностью и кластеризацией;

– сетевое оборудование;

– системы хранения данных с возможностью локальной репликации;

– систему резервного копирования;

– программное обеспечение конфигурирования, управления и контроля;

– системы обеспечения бесперебойного питания;

– систему обеспечения микроклимата;

– систему контроля доступа;

– систему пожаротушения.

Исходя из опыта эксплуатации ЦОД столкнулись с рядом проблем, решение которых видится основной целью данной работы.

Во-первых, недостаточная эффективность использования мощностей серверного оборудования программными продуктами. На данный момент в среднем на наших серверах и на серверах наших клиентов утилизация серверной инфраструктуры составляет порядка 15…20%, при экономически оправданной 70…75%.

Во-вторых, нехватка площадей серверных залов, места в стойках, кабельных каналов, высокие требования к энергопотреблению при нехватке мощностей линий.

В-третьих, низкие сроки внедрения и модернизации серверных мощностей, сложности резервного копирования и восстановления данных.

И, наконец, в-четвертых, неэффективная система мониторинга нагрузки на сеть и использования системных ресурсов серверов.

Технология виртуализации представляет собой комплексное решение возникших проблем, позволяя существенно снизить расходы на расширение серверной инфраструктуры и на ее обслуживание.

Виртуализация – это технология представления вычислительных ресурсов и их логического объединения, вне зависимости от реализации, географического положения или конфигурации составных частей.

Виртуализация абстрагирует приложения и информацию от сложностей базовой серверной инфраструктуры, в результате чего ИТ-среда представляется как внутреннее приложение, администрируемое программными средствами системы виртуализации, т.е. благодаря виртуализации можно централизованно управлять аппаратными ресурсами. Это исключает разрастание количества серверов, позволяя достичь экономии капитальных и операционных затрат, благодаря меньшему количеству платформ, поддерживающих рабочие нагрузки. Более того, исключается также и возможность неконтролируемого разрастания числа виртуальных машин без четких прав собственности и требований к использованию благодаря внедрению единообразного автоматизированного процесса управления временем жизни виртуальных машин – от настройки до функционирования и остановки.

Таким образом, целью данной работы является разработка отказоустойчивой, масштабируемой, динамически управляемой сети сбора и обработки данных ЦОД предприятия связи.

Основной задачей работы является разработка системы виртуализации ресурсов сети и динамического распределения нагрузки, позволяющие оптимизировать ресурсы сети и осуществить эффективное управление нагрузкой и защитой информации на сети.

Объектом исследования является сеть сбора и обработки данных ЦОД предприятия связи.

Предметом исследования стали методы построения и оптимизации центров сбора и обработки данных, технологии виртуализации.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Для решения поставленных задач и раскрытия темы диссертации необходимо дать само понятие сетей передачи данных. Сеть передачи данных является основой глобальных и региональных компьютерных сетей и представляет собой совокупность каналов передачи данных и узлов коммутации.

Сеть передачи данных является сложной системой, на которую возлагается выполнение достаточно большого числа задач, связанных с надежностью, помехозащищенностью передачи данных и долговечностью ее работы. Эти функции возлагаются на специальную службу управления сетью передачи данных, которая осуществляет контроль работы и управление сетью. Контроль работы сети передачи данных включает: определение состояния аппаратных средств сети; контроль абонентских систем и их подключение к сети передачи данных; проведение статистики и учета состояния функциональных элементов сети и т.п. Управление сетью включает локализацию неисправностей, изменение конфигурации сети, распределение сетевых ресурсов, маршрутизацию и управление информационными потоками.

Построение сетей передачи данных на базе архитектуры *IMS* позволяет предприятию связи минимизировать потери при проведении структурных преобразований и модернизации, вызванных изменением потребностей рынка.

Проведенный анализ в первом разделе позволяет сделать следующие выводы:

1 Сеть передачи данных является основой глобальных и региональных компьютерных сетей и представляет собой совокупность каналов передачи данных и узлов коммутации. Сеть передачи данных является сложной системой, на которую возлагается выполнение достаточно большого числа задач, связанных с надежностью, помехозащищенностью передачи данных и долговечностью ее работы.

Управление сетью передачи данных может быть централизованное и осуществляться одной компьютерной системой, либо децентрализованное – несколькими компьютерными системами.

2 Сети следующего поколения *NGN* являются «надстройкой» над существующими технологиями транспортных сетей и позволяют обеспечить гибкость управления сетевыми услугами.

IMS обеспечивает взаимодействие с другими сетями, инвариантность доступа, создание услуг и управление ими, роуминг, защиту информации,

начисление платы. *IMS* обеспечивает следующие функциональные возможности: взаимодействие с другими сетями, инвариантность доступа, создание услуг и управление ими, роуминг, защиту информации, начисление платы. Несмотря на довольно широкий спектр услуг, предоставляемый *IMS*, до сих пор наиболее важную роль играет двусторонняя аудио/видео связь. Для этого архитектура *IMS* должна поддерживать сеансы мультимедийной связи в *IP*–сетях.

3 Для эффективного и надёжного управления сетью и обеспечения высокоскоростного доступ к ресурсам необходимо построение центра обработки данных (ЦОД).

4. Системы передачи информации на основе *GPRS* открывает возможности для развития распределённой системы сбора данных и управления.

Во второй главе «Тенденции модернизации сети сбора и передачи данных предприятия связи» рассмотрено проектирование и создание центров обработки данных. Центры обработки данных (ЦОД) – это отказоустойчивая комплексная централизованная система, обеспечивающая автоматизацию бизнес-процессов с высоким уровнем производительности и качеством предоставляемых сервисов.

В соответствии со своим назначением центры обработки данных можно разделить на две группы. Первая – это частные (или корпоративные) центры данных, которые работают исключительно в рамках конкретной компании. Вторую группу составляют центры обработки данных общего пользования, которые зачастую принадлежат поставщикам интернет-услуг.

В настоящее время существует два стандарта, определяющих принципы построения инфраструктуры центров обработки данных. Это разработанный в США стандарт *TIA/EIA*-942 и европейский стандарт *EN* 50173-5, в основном определяющий кабельные решения для центров обработки данных.

Стандарт *TIA/EIA*-942 рассматривает несколько вариантов построения кабельной инфраструктуры. Базовая топология наилучшим образом подходит для любого ЦОД – и для корпоративного, размещенного на одной площадке, и для центра общего пользования, рассредоточенного по нескольким площадкам.

В Центрах Обработки Данных (ЦОД) современных предприятий системы кондиционирования воздуха должны обеспечивать работу в режиме 24 часа в сутки, 7 дней в неделю (24/7) на протяжении 365 дней в году при удельной мощности в среднем от 540 Вт/м^2 до 1080 Вт/м^2.

По второму разделу можно сделать следующие выводы:

1 ЦОД работает по принципу централизованной обработки данных. Он принимает информацию из различных источников, после происходит обработка полученных данных. После обработки данные могут быть сохранены в ЦОДе или переданы обратно в источники для дальнейшего использования.

Организация ЦОДа требует постоянного мониторинга инженерной инфраструктуры. Мониторинг позволяет контролировать работу оборудования, отслеживать производительность и обнаруживать возможные проблемы. Для этого используются специальные системы мониторинга, которые следят за состоянием оборудования, температурой, энергопотреблением и другими параметрами.

2 Модернизацию сети сбора и передачи данных предприятия связи можно проводить на базе стандарта *TIA/EIA*-942. Стандарт *TIA/EIA* 942 предусматривает обязательное выделение специализированных помещений и организацию рабочих зон.

3 Инфраструктура центра данных четвертого уровня является оптимальной рабочей средой для реализации высоконадежных ИТ-решений, таких как кластерные вычислительные системы, системы хранения и отказоустойчивые компьютерные сети.

4 Проект кондиционирования воздуха обеспечивается предусматриваемой возможностью охлаждения наиболее напряженной группы вычислительного оборудования, характеризующегося наибольшей расходуемой мощностью.

В третьем разделе рассмотрены вопросы разработки инженерной инфраструктуры дата-центра.

ЦОД представляет собой технологическое помещение, содержащее различное «активное» комплектующее оборудование.

Корпоративные ЦОД вмещают системы хранения и обработки данных, а также сетевое и телекоммуникационное оборудование.

Инженерная инфраструктура является тем фундаментом, на котором базируется нормальная работа всего комплекса оборудования ЦОД. От правильности ее построения зависит надежность работы вычислительного центра.

Основные подсистемы инженерной инфраструктуры ЦОД:

– подсистема гарантированного электроснабжения;

– климатическая подсистема;

– кабельная подсистема;

– подсистема монтажных шкафов;

– подсистема мониторинга и управления объектом;

– контроль доступа;

– видеонаблюдение;

– охранная сигнализация;

– газовое пожаротушение.

По третьему разделу можно сделать следующие выводы:

1 Разработана инженерная инфраструктура дата-центра. Корпоративные ЦОД вмещают системы хранения и обработки данных, а также сетевое и телекоммуникационное оборудование.

2 Разработана система мониторинга, позволяющая проводить слежение как за коммутаторами, маршрутизаторами разных производителей, так и серверов различных платформ.

3 Оборудование должно соответствовать текущим и будущим потребностям ЦОД в вычислительных мощностях и пропускной способности, а также обладать высокой отказоустойчивостью.

3 За счет автоматизации контроля состояния портов СКС исключены дорогостоящие и трудоемкие операции по ручному администрированию кабельной системы. Это, в свою очередь, уменьшает эксплуатационные расходы, ускоряет обслуживание пользователей при переездах и добавлении рабочих мест, уменьшает простои сети при ремонтных работах и обеспечивает ее большую безопасность.

Заключающий четвёртый раздел содержит расчеты основных технических параметров модернизированной сети сбора и передачи данных. Рассмотрена технология виртуализации ЦОД и сделаны следующие выводы:

1 Произведенные расчеты модернизированной системы сбора и передачи данных подтверждают правильность принятых решений.

2 Особенность виртуализации на базе *VMware* состоит в собственной файловой системы *VMFS*. В то время как обычные файловые системы обеспечивают доступ на чтение и запись к одному файлу только одному серверу в каждый момент времени, кластерная файловая система *VMFS* задействует возможности общего хранилища данных и дает возможность нескольким экземплярам *VMware ESX* одновременно считывать и записывать данные в одно хранилище.

3 Использование виртуализации на базе технологии *VMware* и кластеризации данных на дисковых массивах *HP EVA* 8000, обеспечивает существенную экономию на аппаратном обеспечении, обслуживании, повышается гибкость инфраструктуры, упрощает процедуру резервного копирования и восстановления после сбоев. Для повышения надёжности работы особо важных виртуальных серверов предлагается использовать квотирование производительности дисковых систем по технологии *SIOC*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модернизация сети сбора и передачи данных предприятия связи была направлена на повышение объема передачи данных. При модернизации учтены перспективы развития сети и изменения в области технологии.

Практическая ценность проекта модернизации сети сбора и обработки данных предприятия связи заключается в том, что он позволяет оптимизировать ресурсы сети, реализовать её масштабируемость, добиться эффективного управления нагрузкой и защитой информации на сети. Использование системы виртуализации позволило существенно сократить временные издержки на развёртывание новых серверов, упростило процесс миграции и резервного копирования данных. По итогам можно сделать следующие выводы.

Сеть передачи данных является основой глобальных и региональных компьютерных сетей и представляет собой совокупность каналов передачи данных и узлов коммутации. Сеть передачи данных является сложной системой, на которую возлагается выполнение достаточно большого числа задач, связанных с надежностью, помехозащищенностью передачи данных и долговечностью ее работы.

Для эффективного и надёжного управления сетью и обеспечения высокоскоростного доступ к ресурсам необходимо построение центра обработки данных (ЦОД).

Модернизацию сети сбора и передачи данных предприятия связи можно проводить на базе стандарта *TIA/EIA*-942. Стандарт *TIA/EIA* 942 предусматривает обязательное выделение специализированных помещений и организацию рабочих зон.

Использование виртуализации на базе технологии *VMware* и кластеризации данных на дисковых массивах *HP EVA* 8000, обеспечивает существенную экономию предприятию связи.

Практическая ценность данной работы заключается в том, что можно произвести модернизацию сетей сбора и передачи данных с учетом перспективности нагрузки и наименьшими затратами. Предложенный вариант значительно увеличивает производительность сети, упростит администрирования сети, сократит персонал.

Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшей модернизации сетей сбора и передачи данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

[1] Букрина, Е. В. Сети связи и системы коммутации : Учебное пособие. – Екатеринбург : УрТИСИ ГОУ ВПО «СибГУТИ», 2007. – 186 с.

[2] Преимущества сетей нового поколения IMS Белтелеком. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://providers.by/2013/03/provajdery-minska/beltelecom/beltelekom-rasskazal-o-preimushhestvax-setej-novogo-pokoleniya-ims/?ysclid=m21zzqhqwp56267799 – Дата доступа: 14. 10.2024.

[3] Сети следующего поколения NGN / Под ред. А. В. Рослякова. – М. : Эко-Трендз, 2001. – 282 с.

[4] Принципы построения и функционирования сетей NGN // NGN Laboratory [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://ngn-lab.ru/principy-postroeniya-ifunkcionirova / – Дата доступа: 12. 10.2024

[5] Гольдштейн, Б.С. Протокол SIP: справочник / Б.С. Гольдштейн, А.А. Зарубин, В.В. Саморезов. – СПб. : 2015. – 390 с.

[6] Архитектура IMS. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://intuit.ru/studies/courses/1150/157/lecture/28726?page=2 – Дата доступа: 14. 10.2024.

[7] Новые технологии беспроводной передачи данных. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.cta.ru/articles/cta/oborudovanie/modemy/ – Дата доступа: 14. 10.2024.

[8] Центр обработки данных. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://mws.ru/blog/chto-takoe-cod/ – Дата доступа: 14. 10.2024.

[9] Стандарты Центров обработки данных. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://itboss.ru/?p=65/ – Дата доступа: 14. 10.2024.

[10] Уровни надежности стандарта TIA/EIA-942. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://ozlib.com/tehnika/urovni_nadezhnosti – Дата доступа: 14. 10.2024.

[11] Тутова, Ворожцов А.С. Модели оптимизации технологий обработки данных в сетях электронного бизнеса / А.В. Тутова, А.С Ворожцов. // «Труды Московского технического университета связи и информатики». – М.: МТУСИ. – 2007.–№6 – С. 249 - 254.

[12] Abdelzaher, Performance Guarantees for Web Server End-Systems: A Control-Theoretical Approach. / T., Shin, K. G., Bhatti, N. Abdelzaher // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems 13. – 2007. – №1 – С.11-19.

[13] Анализ технических решений по организации современных центров обработки данных. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-tehnicheskih-resheniy-po-organizatsii-

sovremennyh-tsentrov-obrabotki-dannyh?ysclid=m46ysqjvk8321379624 / – Дата доступа: 14. 10.2024.

[14] Охлаждение и вентиляция ЦОД: требования и современные решения. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.kp.ru/guide/okhlazhdenie-i-ventiljatsija-tsod.html – Дата доступа: 14. 10.2024.

[15] Система электроснабжения ЦОД. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://max-motors.ru/articles/elektrosnabzhenie-cod.html / – Дата доступа: 14. 10.2024.

[16] Кабельная инфраструктура и эксплуатация ЦОДов. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.osp.ru/lan/2015/05-06/13046204?ysclid=m471um30n984005081 / – Дата доступа: 14. 10.2024.

[17] Система мониторинга ЦОД. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.iso-energo.ru/products/cod/monitoring/?utm_source / – Дата доступа: 14. 10.2024.

[18] Прецизионные кондиционеры Stulz CyberAir. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.vktechno.ru/catalog/product/pretsizionnye_

konditsionery_stulz_cyberair_3_asd_191_1072_a/ _/ – Дата доступа: 14. 10.2024.

[19 ИБП APC Symmetra PX 160kW. [Электронный ресурс] – Режим https://ibp-apc.ru/ibp-apc-symetra-px/apc-symmetra-px-160kw-sy160k160h/ – Дата доступа: 14. 10.2024.

[20] Система управления кабельной инфраструктурой AMPTRAC. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.pvsm.ru/upravlenie/45584?ysclid=m4735njn2y785471099 _/ – Дата доступа: 14. 10.2024.

[21] Использование Zabbix для мониторинга: основные возможности и применение. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.it-lite.ru/blog/iaas/zabbix-dlya-monitoringa/ – Дата доступа: 14. 10.2024.

[22] Ломовицкий, В. В. Основы построения систем и сетей передачи информации : учеб. пособие для вузов / В. В. Ломовицкий [и др.]. – М. : Горячая линия – Телеком, 2015. – 382 с.

[23] Резервное копирование при помощи компонента Windows Server Backup. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://serverspace.ru/support/help/backing-up-using-the-windows-server-backup-component/? – Дата доступа: 14. 10.2024.

[24] HP StorageWorks EVA 4400. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.karma-group.ru/catalog/snyatye-s-proizvodstva-skhd-

hpe/hp_storageworks_eva_4400/?ysclid=m48a8llkfm415605047 – Дата доступа : 14. 10.2024.

[25] Технология Fibre Channel. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.nix.ru/computer_hardware_news/hardware_news_viewer.html?id=213053 – Дата доступа: 14. 10.2024.

[26] Хелд, Г. Технологии передачи данных. 7–е изд. / Г. Хелд. – СПб. : БХВ, 2013. – 720 с.

[27] Росляков, А.В. Сети доступа: учебное пособие для вузов./ А.В. Росляков. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 57 с.

[28] Тарченко, Н. В. Курсовое проектирование цифровых сетей телекоммуникаций на основе оборудования SDH : учебно - метод. пособие по дисциплине «Проектирование цифровых систем передачи» для студентов специальности I-45 01 01 «Многокан. системы телекоммуникаций» днев. и заоч. форм обучения / Н. В. Тарченко. – Минск : БГУИР, 2007. – 84 с.

[29] Основы построения телекоммуникационных систем и сетей : Учебник для вузов / В. В. Крухмалев, В. Н. Гордиенко, А. Д. Моченов и др.; Под ред. В. Н. Гордиенко и В. В. Крухмалева. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 510 с.

[30] Кучерявый, Е. А.. Управление трафиком и качество обслуживания в сети ИНТЕРНЕТ. – СПб.: Наука и Техника, 2004 – 336 с.

[31] Боровиков С.М. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности. – Мн, : Дизайн ПРО, 1998. – 336 с. /Г.

[32] Технологии в сетях. Официальный сайт ЧУПП «ТелеМикс»/. – Режим доступа : http://telemiks.by/MOP_E116B.html/ – Дата доступа: 20.10.2024.

[33] Современные технологии для модернизации сети. – Режим доступа: http://naviny.by rubrics/computer/2012/01/11/ic_news – Дата доступа: 20.10.2024.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

[1] Ножников, Р. А. Модернизация внутризоновых сетей связи на базе современных технологий = Modernization of intrazone communication networks based on modern technologies / Р. А. Ножников, Е. А. Ножников // Информационная безопасность : сборник материалов 60-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 22–26 апреля 2024 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2024. – С. 151–156.