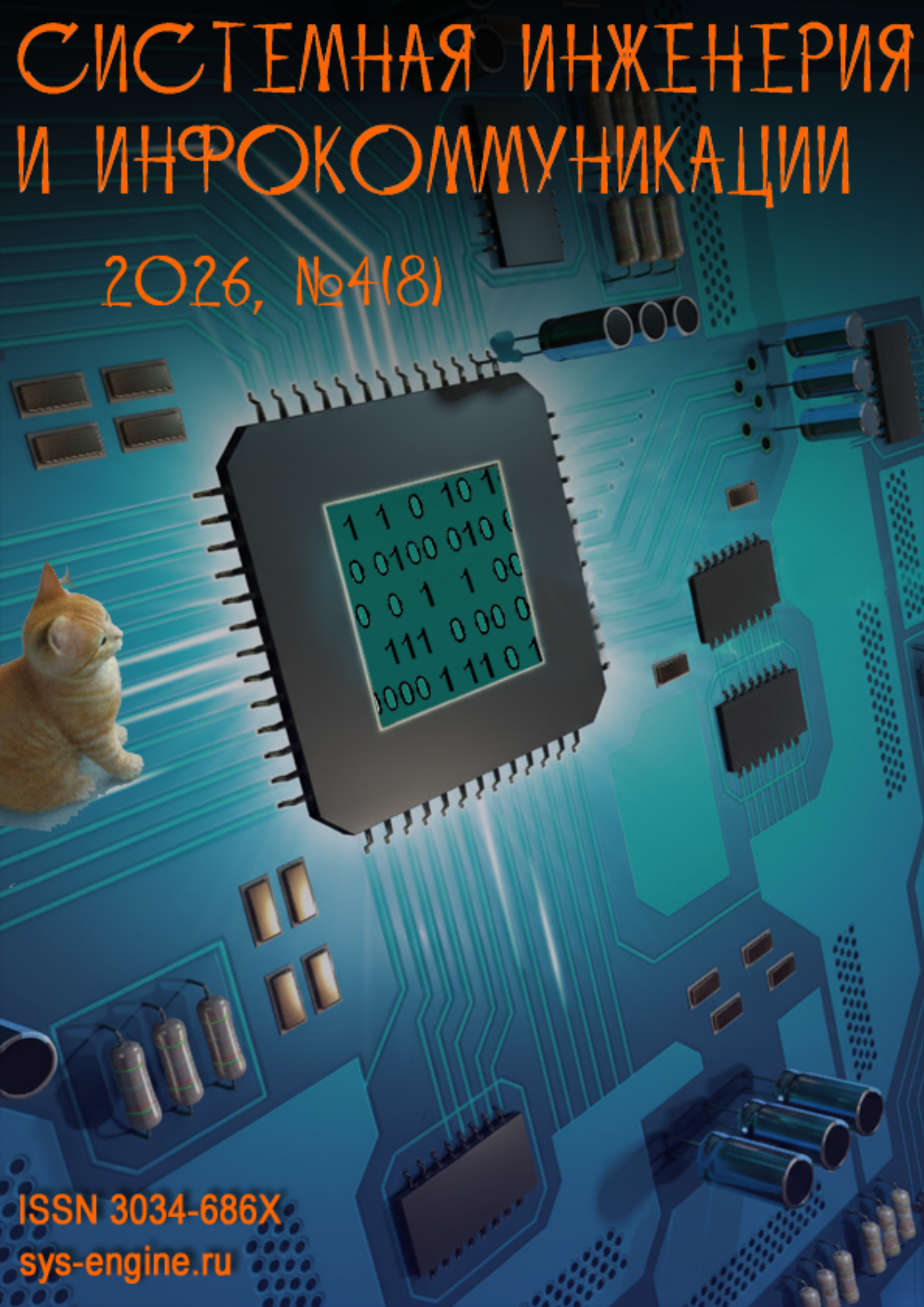
СИСТЕМНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ И ИНФОКОММУНИКАЦИИ

2026, №4(8)



ISSN 3034-686X
sys-engine.ru

Системная инженерия и инфокоммуникации

№4(8), 2026

Главный редактор

Кутузов Денис Валерьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Связь» Астраханского государственного технического университета.

Редакционная коллегия

Осовский Алексей Викторович — выпускающий редактор, канд. техн. наук, доцент кафедры «Связь» Астраханского государственного технического университета.

Богданов Евгений Александрович — руководитель департамента АСУ и РЗА АО «Объединенная энергетическая компания», г. Москва.

Гальперин Артём Давидович — технический директор филиала ПАО МТС в Астраханской области.

Гладышев Андрей Борисович — канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры РЭБ Сибирского федерального университета, профессор Академии военных наук.

Диане Секу Абдель Кадер — канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории №90 Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН.

Дмитриев Дмитрий Дмитриевич — доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры АСУ ВКС Сибирского федерального университета, действительный член Академии военных наук.

Камалетдинова Лилия Рашидовна — системный эксперт-аналитик, АО «БАРС Груп», старший преподаватель кафедры «Информационные системы», Ульяновский государственный технический университет.

Карлова Гелия Фёдоровна — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры радиоэлектроники и систем связи (РСС), Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

Лаврентьев Максим Александрович — начальник отдела информационных технологий и связи, ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть».

Магид Евгений Аркадьевич — PhD, Senior IEEE member, заведующий кафедрой интеллектуальной робототехники Института информационных технологий и интеллектуальных систем (ИТИС), Казанский (Приволжский) федеральный университет.

Мальцева Наталия Сергеевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Связь» Астраханского государственного технического университета.

Сипин Александр Степанович — доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры прикладной математики Вологодского государственного университета.

Старов Дмитрий Владимирович — начальник отдела технического обеспечения научно-образовательного процесса, старший преподаватель кафедры Технологии материалов и промышленной инженерии, Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева.

Стукач Олег Владимирович — доктор техн. наук, профессор кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета.

Султонов Шохрух Холмурзаевич — PhD, доцент, заведующий кафедрой «Информатика и компьютерная графика» Ташкентского государственного транспортного университета, г. Ташкент, Республика Узбекистан.

Сурков Денис Михайлович — канд. техн. наук, ТОО «Maritime Aid Kazakhstan», г. Актау, Республика Казахстан.

Фролов Сергей Владимирович — доктор техн. наук., профессор, заведующий кафедрой «Биомедицинская техника» Тамбовского государственного технического университета, почетный работник высшего профессионального образования.

Хоменко Татьяна Владимировна — доктор техн. наук., профессор кафедры «Индустриальное программирование» Института перспективных технологий и индустриального программирования РТУ МИРЭА.

Шварц Михаил Львович — канд. техн. наук, доцент, заведующий лабораторией «Системы частотно-временного обеспечения сетей связи» Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ), генеральный директор ООО «СТРОЙМИГ СИНХРОНИЗАЦИЯ».

Шилова Галина Николаевна — канд. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой математики и информатики Вологодского государственного университета.

Регистрационный номер: Эл № ФС77-88783 от 22 ноября 2024 г.
ISSN 3034-686X
Сетевое издание размещено по адресу: sys-engine.ru
Возрастная категория: 12+

Содержание

События в профессиональной сфере 5

1 **С.Ю. Медведев, Д.В. Кутузов, А.В. Осовский, М.И. Вексельман**
Пространство профессионального диалога — научно-практический семинар «Решения АО "Время-Ч" в задачах синхронизации в пакетных сетях» 5

Информационные технологии 18

2 **С.А.К. Диане**
Иерархический подход к применению генетического алгоритма в задачах численной оптимизации 18

3 **А.А. Писаренко**
Оптимизация запросов в реляционных базах данных с использованием индексирования на основе B-деревьев 23

4 **А.С. Ситникова, Н.П. Ганюкова**
Разработка предметной онтологической модели системы управления рыбохозяйственным комплексом 29

5 **Э.И. Дукаева, Н.П. Ганюкова**
Интеллектуально-информационная система управления стоимостью ИТ-проектов 35

Телекоммуникации 43

6 **И.А. Сидоров, К.Л. Игнатенкова**
Лабораторный комплекс для подготовки студентов по дисциплине «Локальные инфокоммуникационные сети» 43

7 **А.А. Жаднов, А.Ю. Прокофьева**
Организация высокоскоростной сети в многоквартирных домах на основе технологии Power Line Communication 49

Пространство профессионального диалога - научно-практический семинар «Решения АО «Время-Ч» в задачах синхронизации в пакетных сетях»

С.Ю. Медведев[1], Д.В. Кутузов[2], А.В. Осовский[2], М.И. Вексельман[1]

[1]АО «Время-Ч», г. Нижний Новгород, Россия
[2]Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Россия

Аннотация **– В статье представлены итоги научно-практического семинара «Решения АО «Время-Ч» в задачах синхронизации в пакетных сетях», состоявшегося 20–22 октября 2026 года в Нижнем Новгороде. Рассматриваются ключевые направления развития современных систем частотно-временной синхронизации, обусловленные возрастающими требованиями телекоммуникационных сетей и территориально распределённых технических систем к точности и устойчивости передачи сигналов времени и частоты. Освещены представленные на семинаре технические решения, включая применение протокола PTP (IEEE 1588), технологии White Rabbit, синхронного Ethernet (SyncE), а также специализированных средств передачи эталонных сигналов по волоконно-оптическим линиям связи. Отдельное внимание уделено вопросам обеспечения устойчивости спутниковых источников синхронизации, развитию высокостабильных стандартов частоты и созданию территориально распределённых систем доставки сверхточного времени и частоты. Обобщены основные направления профессионального обсуждения, отражающие актуальные потребности операторов связи, разработчиков оборудования и метрологических организаций. Показано значение подобных мероприятий для обмена техническим опытом, согласования требований потребителей и определения перспектив развития отечественных средств и систем частотно-временного обеспечения.**

Ключевые слова **– частотно-временная синхронизация, пакетные сети связи, точное время, протокол PTP, IEEE 1588, White Rabbit, синхронный Ethernet, SyncE, стандарты частоты, метрологическое обеспечение, АО «Время-Ч».**

ВВЕДЕНИЕ

С 20 по 22 октября 2026 года в Нижнем Новгороде проходил научно-практический семинар «Решения АО «Время-Ч» в задачах синхронизации в пакетных сетях», организованный АО «Время-Ч». Мероприятие объединило представителей профессионального сообщества российских разработчиков, производителей и пользователей оборудования сетевой синхронизации. В работе семинара приняли участие более 50 специалистов, представлявших ведущих операторов связи, предприятия телекоммуникационной отрасли, научно-исследовательские и метрологические организации, а также образовательные учреждения.

Среди участников были представители ПАО «МТС», ПАО «МГТС», ПАО «Ростелеком», ПАО «МегаФон», ПАО «ВымпелКом», ПАО «Таттелеком», ООО "К-ТЕЛЕКОМ", АО «Компания Трансгелеком», ОАО «РЖД», АО «ОЭК», ФГУП «ГТСС», ФГАНУ «ЦИТиС», ФГУП «ВНИИФТРИ», НИЦ «Курчатовский институт», АО «ВНИИР-Прогресс», РУП «Белтелеком», ФГБОУ ВО «АГТУ» и ряда других организаций. Широкий состав участников позволил рассмотреть вопросы сетевой синхронизации с позиций как разработчиков специализированного оборудования, так и специалистов, отвечающих за его внедрение и эксплуатацию в действующих сетях связи.

Основной тематикой семинара стали современные подходы к построению систем частотно-временной синхронизации на базе пакетных сетей передачи данных, а также технические решения, предлагаемые для этого АО «Время-Ч». Программа мероприятия включала доклады о развитии оборудования синхронизации, его технических характеристиках и функциональных возможностях, особенностях применения протоколов передачи точного времени и обеспечении требуемых параметров синхронизации в различных условиях эксплуатации.

Особое значение семинару придала его практическая направленность. Наряду с представлением разработок и технических решений, участники получили возможность обсудить вопросы их применения в инфраструктуре операторов связи, обменяться опытом эксплуатации оборудования и обозначить актуальные требования к его дальнейшему развитию.



Рис. 1. В научно-практическом семинаре «Решения АО «Время-Ч» в задачах синхронизации в пакетных сетях» приняли участие ведущие специалисты отрасли

Таким образом, мероприятие стало пространством профессионального диалога между производителями и потребителями телекоммуникационного оборудования.

I. СИНХРОНИЗАЦИЯ В ПАКЕТНЫХ СЕТЯХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ: СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Развитие телекоммуникационных сетей сопровождается постоянным повышением требований не только к пропускной способности, задержкам и надёжности передачи информации, но и к точности синхронизации сетевого оборудования. Если в традиционных сетях связи задачи синхронизации в значительной степени решались средствами синхронной цифровой иерархии (SDH) и специализированными системами распределения частоты, то переход к пакетным технологиям передачи данных существенно изменил подходы к построению систем частотно-временного обеспечения. В современных сетях, использующих Ethernet и IP/MPLS, синхронизация должна обеспечиваться в условиях переменной задержки передачи пакетов, изменения сетевой нагрузки, маршрутизации трафика и возможных нарушений связности отдельных участков сети [1–11].

При рассмотрении этих задач необходимо различать три взаимосвязанных, но не тождественных понятия: частотную, фазовую и временную синхронизацию. Частотная синхронизация обеспечивает согласованность частот генераторов различных сетевых устройств и позволяет поддерживать заданную скорость передачи информации. Фазовая синхронизация предполагает согласование фаз периодических сигналов, а временная синхронизация обеспечивает согласованность показаний часов различных устройств относительно общей шкалы времени, в частности UTC. В зависимости от назначения сети и используемых технологий требования могут предъявляться к одному или нескольким из этих параметров одновременно. При этом для ряда современных приложений недостаточно обеспечить только стабильность частоты: требуется также поддерживать заданную точность взаимного положения временных шкал сетевых элементов.

Особую сложность представляет реализация синхронизации в пакетных сетях. В отличие от традиционных систем, где опорный сигнал может передаваться по выделенным физическим линиям синхронизации, в пакетной инфраструктуре информация о времени и частоте передаётся совместно с пользовательским трафиком либо восстанавливается с использованием Ethernet-интерфейсов. Время прохождения пакетов зависит от текущей загрузки сети, очередей в коммутаторах и маршрутизаторах, особенностей обработки трафика и конфигурации маршрутов. Возникающая вариация задержки пакетов (Packet Delay Variation, PDV) существенно влияет на точность восстановления временных характеристик опорного сигнала. Поэтому построение надёжной системы синхронизации требует не только применения высокостабильных источников частоты и времени, но и соответствующей организации сетевой инфраструктуры, использования специализированных механизмов компенсации задержек и контроля качества синхронизации.

Важнейшей областью применения высокоточной синхронизации становятся сети мобильной связи пятого поколения (5G). Увеличение плотности размещения базовых станций, использование широких полос частот, развитие технологий антенных систем MIMO, агрегации несущих и различных вариантов организации радиодоступа предъявляют повышенные требования к согласованности работы пространственно распределённых сетевых элементов. Особенно существенны эти требования для сетей с временным дуплексным разделением каналов (TDD), в которых приём и передача осуществляются в разных временных интервалах одного частотного диапазона. Несогласованность временных границ между соседними базовыми станциями может приводить к взаимным помехам и ухудшению характеристик радиоинтерфейса. При использовании MIMO и агрегации несущих точность временного согласования также становится одним из факторов, определяющих возможность реализации предусмотренных стандартами режимов совместной передачи и обработки сигналов.

Требования к точности синхронизации в сетях 5G могут существенно различаться в зависимости от конфигурации радиоинтерфейса и применяемых технологий. Например, при передаче опорной синхронизации до базовой станции по пакетной транспортной сети рекомендация МСЭ Т G.8271.1 устанавливает предел абсолютной ошибки времени 1,1 мкс на границе транспортной сети и оборудования базовой станции.

Этот предел учитывает погрешность источника опорного времени и ошибки, накопленные при передаче по сети. Дальнейшее распределение времени в оборудовании базовой станции также вносит вклад в суммарную ошибку, которую необходимо учитывать при выполнении требований на радиоинтерфейсе.

Рекомендации 3GPPP предусматривают требования порядка 3 мкс для ряда режимов NR TDD и более жёсткие значения (65-250 нс) для отдельных конфигураций агрегации несущих и MIMO. Для отдельных конфигураций агрегации несущих и MIMO дополнительно нормируется взаимное временное выравнивание радиосигналов. Чтобы выполнить требования на радиоинтерфейсе, необходимо распределить допустимый бюджет ошибки времени между источником опорного времени, транспортной сетью и оборудованием базовой станции. Если опорное время передаётся по транспортной сети, её вклад в суммарную ошибку должен укладываться в выделенную ей часть временного бюджета.

Не менее важную роль синхронизация играет в транспортных сетях операторов связи, обеспечивающих передачу больших объёмов информации между территориально распределёнными узлами. Такие сети образуют основу инфраструктуры мобильной и фиксированной связи, центров обработки данных, систем облачных вычислений и межсетевого взаимодействия. В них точное время необходимо для согласованной работы сетевых элементов, корректного формирования временных меток, измерения задержек и контроля качества обслуживания. Кроме того, синхронизация имеет принципиальное значение при построении распределённых систем мониторинга, организации резервирования и переключения каналов, а также при взаимодействии оборудования различных производителей. По мере перехода к полностью пакетным транспортным инфраструктурам обеспечение требуемых характеристик синхронизации становится самостоятельной инженерной задачей, непосредственно влияющей на качество предоставляемых услуг связи.

Существуют и другие области, в которых точность частотно-временного обеспечения приобретает особое значение. В железнодорожной и других транспортных отраслях синхронизация используется при организации систем диспетчеризации, управления движением, мониторинга состояния инфраструктуры и регистрации событий на территориально распределённых объектах. В энергетике согласованная временная шкала необходима для работы систем релейной защиты, противоаварийной автоматики, векторных измерений и анализа переходных процессов в электрических сетях. В промышленной автоматизации она обеспечивает согласованное выполнение операций распределёнными контроллерами, измерительными комплексами и исполнительными устройствами. Для перечисленных приложений требования к точности могут различаться на несколько порядков – от миллисекунд до микросекунд и наносекунд, – однако общим остаётся необходимость иметь достоверную и устойчивую временную основу для функционирования распределённых технических систем.

Таким образом, частотно-временная синхронизация перестаёт быть исключительно вспомогательной функцией телекоммуникационной инфраструктуры и становится одним из условий работоспособности современных информационных и управляющих систем. Её обеспечение требует комплексного подхода, включающего применение высокостабильных первичных источников частоты и времени, технологий распределения синхросигналов по физическим и пакетным каналам, механизмов контроля качества синхронизации, а также средств сохранения точности при временной потере внешнего опорного сигнала.

Для высокоточной синхронизации по пакетным сетям широкое распространение получил протокол PTP (Precision Time Protocol), определённый стандартом IEEE 1588. Он служит общей протокольной основой для нескольких отраслей. Каждая из них определяет правила его применения с учётом архитектуры сети и задач конечного оборудования. Отраслевые профили задают применяемые функции и параметры PTP, например способ передачи сообщений, интервалы их

отправки и правила выбора источника синхронизации. Допустимая ошибка времени и требования к оборудованию определяются в составе соответствующей отраслевой нормативной базы.

В телекоммуникациях такую нормативную базу составляют рекомендации МСЭ Т серий G.826x и G.827x. Они охватывают формирование опорной частоты и времени, их распределение по сети, требования к промежуточным и оконечным устройствам синхронизации, а также допустимые сетевые погрешности. Серия G.826x посвящена частотной синхронизации и охватывает как передачу частоты на физическом уровне с помощью SyncE, так и её восстановление по пакетам PTP по профилю G.8265.1. Серия G.827x охватывает синхронизацию времени и фазы. В неё входят требования к первичным источникам времени и сетевым часам, нормы ошибки времени и профили PTP, в частности G.8275.1 для сетей с полной поддержкой синхронизации и G.8275.2 для сетей с частичной поддержкой.

В электроэнергетике общая шкала времени позволяет сопоставлять измерения и восстанавливать последовательность событий по данным разных устройств цифровой подстанции. Для этих задач применяются профили PTP IEC/IEEE 61850 9 3 и IEEE C37.238. В профессиональном телевидении профиль SMPTE ST 2059 2 обеспечивает распределение опорного времени, а SMPTE ST 2059 1 определяет правила формирования и временного выравнивания аудио- и видеосигналов относительно общей шкалы. В финансовой инфраструктуре синхронизация часов нужна для присвоения сопоставимых временных меток заявкам, сделкам и другим событиям, зарегистрированным разными системами. В центрах обработки данных общая шкала времени позволяет сопоставлять записи журналов и данные телеметрии с разных серверов, восстанавливать ход сбоя и измерять задержки между узлами. В промышленной автоматизации она помогает соотносить измерения и управляющие события, зарегистрированные на разных участках технологического процесса.

Точное время становится инфраструктурным ресурсом везде, где устройства должны действовать согласованно или регистрировать события на общей шкале времени. От задачи зависят допустимая ошибка времени, необходимость привязки к UTC и длительность, в течение которой система должна сохранять заданную точность при потере внешнего опорного сигнала. Эти требования определяют выбор технологии синхронизации и, при использовании PTP, его профиля.

Именно на решение этих задач направлено развитие современных средств синхронизации, способных обеспечить требуемую точность и устойчивость работы оборудования в условиях перехода к пакетным технологиям. Здесь особый интерес представляют разработки АО «Время-Ч», охватывающие как высокостабильные источники частоты и времени, так и специализированные устройства для распределения и контроля синхросигналов в пакетных сетях.

II. СОДЕРЖАНИЕ ДОКЛАДОВ СЕМИНАРА

Программа семинара охватила несколько направлений развития систем частотно-временной синхронизации: совершенствование протоколов передачи точного времени, построение оборудования для пакетных сетей, повышение устойчивости спутниковых источников синхронизации к внешним воздействиям, а также развитие высокостабильных стандартов частоты. Представленные доклады сочетали рассмотрение общих технических принципов с демонстрацией конкретных аппаратных и программных решений.

Доклад М.Л. Шварца «Перспективы и направления развития системы единого и точного времени в национальном масштабе» был посвящён перспективам построения единой системы, способной удовлетворять возрастающим требованиям сетей связи в области синхронизации и точного времени. Рассматривая современные технологии синхронизации, он обратил внимание на сочетание PTP и SyncE, использование пограничных часов, выделенных оптических каналов времени в сетях DWDM, а также резервирование передачи шкалы времени по традиционной инфраструктуре SDH/PDH с помощью аппаратуры АРСВ. Значительная часть выступления была связана с развитием когерентных систем синхронизации и переходом к PTP версии 2.1.



Рис. 2. Выступление Михаила Шварца

В качестве перспективного направления рассматривалось взаимодействие когерентных первичных эталонных источников частоты и времени, формирующих согласованную групповую шкалу времени с участием национальных эталонов UTC(k). При этом докладчик обозначил не только технические, но и организационно-метрологические условия реализации такой архитектуры: необходимость нормативного регулирования присоединения сетей связи к государственным и вторичным эталонам, развития средств измерений и организации регулярного контроля характеристик оборудования. Таким образом, создание единой системы точного времени было представлено как комплексная задача, требующая координации операторов связи, производителей оборудования и метрологических организаций.

В докладе М. Н. Хромова (ФГУП «ВНИИФТРИ») «Создание пилотного участка территориально распределённой волоконной сети доставки сверхточного времени и частоты» была представлена концепция создания территориально распределённой сети, предназначенной для передачи по волоконно-оптическим линиям высокоточной информации о времени и частоте. В качестве основных узлов пилотного участка рассматривались аппаратные комплексы ФГУП «ВНИИФТРИ», НИЦ «Курчатовский институт» и ФИАН им. П. Н. Лебедева. Предусматривается передача как частоты высокостабильного лазерного излучения по выделенным оптическим линиям, так и эталонной частоты и шкалы времени UTC(SU), формируемой государственным первичным эталоном. В составе сети предполагается использовать специализированные оптические модемы, усилители и серверы точного времени, а для пакетной передачи шкалы времени — протокол IEEE 1588. Отдельное внимание докладчик уделил экспериментальной оценке характеристик передачи сигналов по волоконно-оптическим линиям и применению PTP. Представленные результаты демонстрируют принципиальную возможность высокоточной передачи частоты и времени, но одновременно подчёркивают зависимость достигаемой точности от характеристик канала и используемого оборудования. В частности, для достижения субнаносекундной точности при использовании технологии White Rabbit, основанной на PTP и SyncE, требуется специализированная аппаратная реализация. Значимость представленного проекта определяется не только задачами метрологии и телекоммуникаций, в презентации также показана потребность в единой частотно-временной основе для квантовых

вычислений, квантовых коммуникаций и синхронизации научных установок.

Одним из центральных выступлений стал доклад М.И. Вексельмана, представителя АО Время-Ч «Современные технические требования к PTP-устройствам. Развитие протокола PTP по стандарту White Rabbit». В первой части доклада были рассмотрены особенности построения систем синхронизации на основе протокола PTP (IEEE 1588), в том числе взаимодействие устройств Grandmaster, Boundary Clock и Slave в пакетной сети. Отдельное внимание было уделено выбору и резервированию источников опорного времени: использованию многосистемных приёмников ГНСС, высокостабильных стандартов частоты, режиму удержания синхронизации при потере спутникового сигнала, а также формированию групповой шкалы времени с помощью многоканальных комбайнеров. Важным аспектом выступления стало обсуждение особенностей алгоритма Best Master Clock Algorithm (BMCA) и возможных уязвимостей при выборе ведущих часов в сети PTP.

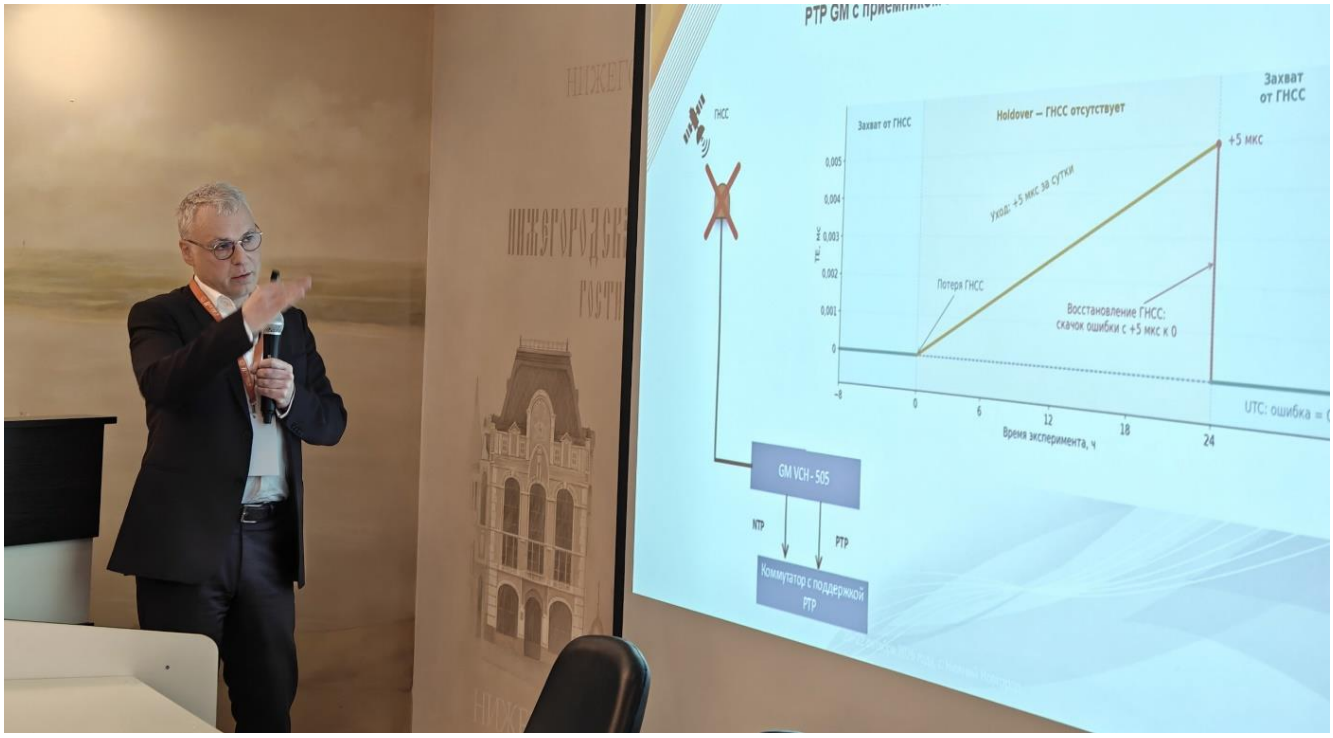


Рис. 3. Доклад Михаила Вексельмана

Вторая часть доклада была посвящена технологии White Rabbit, объединяющей механизмы PTP, синхронного Ethernet (SyncE) и цифрового измерения разности фаз DDMTD. На примере взаимодействия устройств WR Master и WR Slave были последовательно рассмотрены аппаратная калибровка трактов передачи и приёма, компенсация асимметрии задержек в оптическом волокне, восстановление частоты по Ethernet-потоку и высокоточное фазовое выравнивание. Особое значение в этой технологии имеет учёт аппаратных задержек и их изменений при установлении соединения: без соответствующей калибровки точность временных измерений существенно ограничивается. Доклад позволил проследить, каким образом развитие стандартной архитектуры PTP и применение дополнительных механизмов физического уровня расширяют возможности пакетных сетей в задачах высокоточной синхронизации.

Вопросам устойчивости спутниковых источников времени был посвящён доклад Н.Т. Булавского, технического директора АО ВНИИР-Прогресс «Особенности использования антенн „Комета“ для систем временной синхронизации на стационарных объектах». В выступлении рассматривалось влияние помех различного характера на работу глобальных навигационных спутниковых систем и, как следствие, на надёжность получения временной опоры. Были представлены результаты и иллюстративные примеры, показывающие зависимость эффективности антенных подавителей помех от количества воздействующих источников и числа наблюдаемых спутников. Отдельно рассматривались особенности формирования диаграммы направленности цифровой антенной решётки, влияние многолучёвости, а также последствия неоптимального размещения антенных систем на стационарных объектах.

Практическая часть доклада была связана с анализом вариантов размещения антенны «Комета-МН16» и рассмотрением способов повышения помехозащищённости систем временной синхронизации. Среди представленных рекомендаций были выделены применение помехозащищённых цифровых антенных решёток, корректный выбор места их установки, использование пассивной защиты и многосистемных приёмников ГНСС. Также были рассмотрены настройки приёмника, влияющие на обработку сигналов в условиях помех, и возможность использования информации о помеховой обстановке, поступающей от антенной решётки. Тем самым доклад подчеркнул, что надёжность синхронизации от ГНСС определяется не только характеристиками самого приёмника, но и всей антенно-фидерной системой, условиями размещения и алгоритмами обработки навигационных сигналов.

Отдельное выступление было посвящено программным средствам эксплуатации оборудования. В докладе К. А. Кузнецова, представителя АО Время-Ч «Веб-интерфейс синхронизатора сетей связи VCH-505» был представлен встроенный в прибор веб-интерфейс, предназначенный для мониторинга его состояния и управления параметрами. В частности, были продемонстрированы организация доступа к устройству, ролевая модель пользователей и разграничение полномочий операторов, администраторов и специалистов, отвечающих за безопасность. Такой подход позволяет разделить функции наблюдения за состоянием оборудования и изменения его конфигурации, что имеет значение при эксплуатации устройств в сетях с несколькими уровнями ответственности.

Значительная часть выступления была посвящена практическим функциям интерфейса: просмотру текущих измерений, настройке масок контроля, отображению аварий и событий, ведению их истории, а также удалённому обновлению программного обеспечения отдельных модулей VCH-505. Было показано, что веб-интерфейс предоставляет не только средства конфигурирования, но и инструменты оперативного контроля, включая представление измерений в табличной форме и их экспорт для последующего анализа. В докладе также обозначены направления дальнейшего развития программной части, в том числе расширение возможностей взаимодействия с системами мониторинга и управления. Таким образом, внимание было уделено важной для эксплуатации стороне синхронизирующего оборудования — доступности его функций для технического персонала и удобству контроля функционирования.

Доклад Д. С. Кобякова «Телекоммуникационное оборудование УСС VCH-003 и ССС VCH-505 для частотно-временной синхронизации» был посвящён аппаратным решениям АО Время-Ч для построения систем синхронизации в пакетных и традиционных сетях связи. В выступлении были рассмотрены функциональные возможности устройств VCH-003 и VCH-505, варианты их исполнения, состав входных и выходных интерфейсов, поддержка PTPv2, NTP и SyncE. Особое внимание уделялось возможностям оборудования по работе с различными источниками опорных сигналов, включая ГНСС, внешние высокостабильные сигналы 1PPS и 10 МГц. Были представлены варианты применения устройств в режимах Grandmaster, Slave и Boundary Clock, поддерживаемые профили PTP и возможности подключения абонентов пакетной сети.

Важное место в докладе заняли вопросы обеспечения требуемых характеристик синхронизации и сохранения работоспособности при ухудшении условий приёма спутниковых сигналов. В частности, были представлены результаты испытаний PTP Grandmaster с двухчастотным приёмником ГНСС, рассмотрены режим удержания частоты и времени (Holdover), а также алгоритмы компенсации старения внутреннего кварцевого генератора. Отдельно был показан режим граничных часов Boundary Clock, позволяющий принимать временную метку с одного сетевого порта и передавать её далее абонентам через другой порт. Представленные материалы демонстрировали возможности интеграции оборудования VCH-003 и VCH-505 в единую инфраструктуру синхронизации, в которой сочетаются пакетные интерфейсы и традиционные сигналы тактовой сетевой синхронизации.

Выступление А. С. Скрыля «Презентация нового пассивного стандарта частоты VCH-1022. Устройство, характеристики, особенности, графический интерфейс управления» было посвящено разработке малогабаритного прецизионного водородного стандарта частоты, предназначенного для формирования высокостабильных и спектрально чистых сигналов частоты и времени. Были представлены назначение прибора, его основные технические характеристики и сравнение с рядом зарубежных и отечественных аналогов. В частности, рассматривались показатели нестабильности частоты на различных интервалах времени измерения, характеристики фазовых шумов, массогабаритные параметры и особенности конструкции. Согласно материалам доклада, одним из основных направлений разработки стало уменьшение массы и габаритов по сравнению с предшествующим прибором VCH-1008 при сохранении высоких метрологических характеристик.

Значительная часть выступления была посвящена устройству VCH-1022 и инженерным решениям, применённым при его разработке. Были рассмотрены конструкция СВЧ-резонатора и накопительной колбы, системы термостатирования и магнитного экранирования, узел автоматической подстройки

частоты, блоки питания и управления. Отдельно отмечались изменения схемотехники, в частности переход к последовательной шине I²C для обмена данными между функциональными блоками, что позволило сократить количество межблочных соединений и уменьшить влияние цифровых помех. Таким образом, доклад представил не только характеристики нового стандарта частоты, но и инженерные задачи, которые необходимо было решить при создании компактного высокостабильного источника опорного сигнала.

В совокупности представленные выступления охватили различные уровни построения системы синхронизации: от получения первичной временной опоры и её защиты от внешних воздействий до формирования и распределения сигналов частоты и времени в пакетной инфраструктуре, контроля состояния оборудования и обеспечения его устойчивой эксплуатации. Это позволило рассмотреть задачу синхронизации не как отдельную функцию одного устройства или протокола, а как комплексную техническую задачу, требующую согласованной работы источников опорных сигналов, сетевого оборудования, программных средств и систем мониторинга.

III. ОБСУЖДЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И ПЕРСПЕКТИВ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Представление технических разработок АО «Время-Ч» стало основой для обсуждения не только характеристик отдельных приборов, но и более широких вопросов построения и эксплуатации систем частотно-временной синхронизации. Состав участников семинара, объединивший представителей операторов связи, разработчиков оборудования, научных и метрологических организаций, позволил рассмотреть представленные решения с разных профессиональных позиций. Для специалистов, отвечающих за эксплуатацию сетевой инфраструктуры, принципиальное значение имеют не только заявленные метрологические характеристики устройств, но и возможность их интеграции в существующие сети, совместимость с оборудованием других производителей, удобство настройки и мониторинга, а также поведение системы при отказах отдельных источников синхронизации.

В этом отношении показанные разработки затрагивали несколько практически значимых задач. Оборудование VCH-003 и VCH-505 ориентировано на построение узлов частотно-временной синхронизации, в которых сочетаются традиционные сигналы тактовой сетевой синхронизации и современные пакетные протоколы синхронизации шкалы времени PTP и NTP. При этом поддержка SyncE и различных профилей PTP позволяет рассматривать такие устройства как элементы распределённой инфраструктуры синхронизации, а не только как автономные серверы точного времени. Отдельный интерес представляет возможность использования различных типов внутренних опорных генераторов и внешних источников шкалы времени, что позволяет формировать конфигурации с учётом требований конкретного сетевого узла и условий его эксплуатации. Эти особенности соответствуют общей направленности представленных на семинаре решений на интеграцию пакетной и традиционной сетевой синхронизации.

Важным направлением, имеющим значение для дальнейшего развития сетей, стало рассмотрение технологии White Rabbit и её возможностей по обеспечению высокоточной синхронизации в пакетной инфраструктуре. Представленный подход показывает, что развитие PTP не ограничивается совершенствованием программных алгоритмов обмена временными метками: существенный вклад в точность вносят аппаратная обработка сигналов, калибровка трактов и компенсация задержек. Для разработчиков и эксплуатирующих организаций это ставит вопросы о выборе архитектуры синхронизации, требованиях к сетевым интерфейсам и способах контроля фактических характеристик трактов передачи синхросигналов. Обсуждение подобных решений особенно важно на этапе проектирования сетей, в которых точность синхронизации становится одним из требований к качеству предоставляемых услуг.

Отдельное место в общей картине занимают средства мониторинга и управления. Демонстрация интерфейсов управления VCH-003 и VCH-505 позволила рассмотреть вопросы, которые нередко остаются за рамками обсуждения собственно метрологических характеристик: разграничение пользовательских полномочий, контроль аварийных состояний, просмотр измерений, управление конфигурацией и обновление программного обеспечения.

Для крупных распределённых сетей удобство эксплуатации и возможность интеграции оборудования в общую систему управления имеют не меньшее значение, чем точность формирования синхросигнала. В этом смысле программные средства являются необходимой частью комплексного решения, обеспечивающей повседневную работу технического персонала.

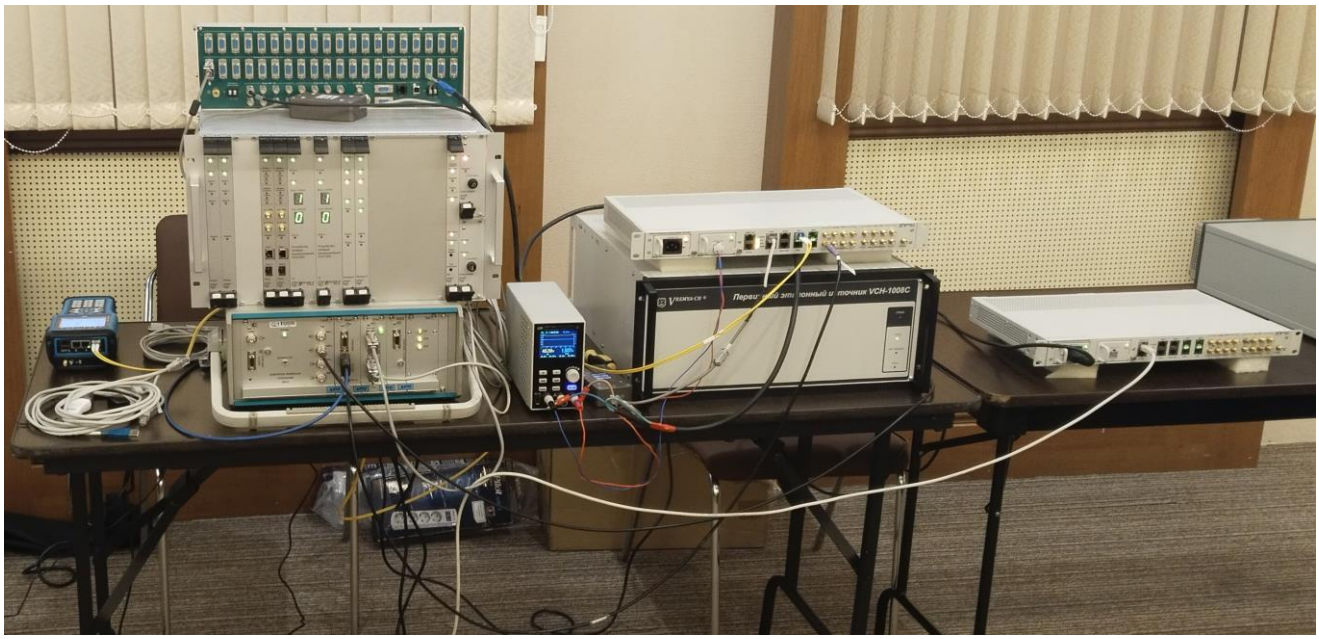


Рис. 4. На оборудовании, представленном АО «Время-Ч» на семинаре, можно было на практике ознакомиться с возможностями аппаратуры

В ходе семинара также была представлена перспектива развития высокостабильной элементной базы на примере водородного стандарта частоты VCH-1022. Рассмотрение его конструкции и метрологических характеристик позволило связать задачи сетевой синхронизации с более фундаментальным направлением деятельности предприятия — созданием прецизионных источников частоты и времени. Наличие собственных разработок в области стандартов частоты, аппаратуры распределения сигналов и телекоммуникационного оборудования формирует технологическую основу для построения комплексных систем синхронизации. Такой профиль деятельности отражён и в номенклатуре продукции АО «Время-Ч», включающей телекоммуникационные устройства, водородные стандарты частоты, компараторы и средства формирования и распределения сигналов.

Существенная ценность семинара заключалась в возможности непосредственного профессионального диалога между разработчиком оборудования и организациями, которые используют подобные решения или отвечают за их внедрение. Для производителя такое взаимодействие позволяет получать обратную связь от специалистов, работающих с реальными сетевыми конфигурациями, учитывать эксплуатационные ограничения и уточнять направления дальнейшего развития продукции. Для операторов и других пользователей участие в обсуждении даёт возможность глубже оценить архитектурные особенности предлагаемых решений, сопоставить их с задачами собственной инфраструктуры и непосредственно задать вопросы разработчикам. Таким образом, семинар стал площадкой двустороннего обмена опытом, в рамках которого практические требования эксплуатирующих организаций дополняли техническую позицию производителя.

IV. Производственная площадка АО «Время-Ч»

Важной частью программы семинара стала экскурсия на производственную площадку АО «Время-Ч», организованная для участников по завершении деловой части мероприятия.



Рис. 5. Экскурсия на производственную площадку АО «Время-Ч»

Для специалистов, занимающихся проектированием, внедрением и эксплуатацией систем синхронизации, такая возможность имела особую практическую ценность. Она позволила познакомиться с предприятием не только как с разработчиком готовых технических решений, но и как с производственной организацией, непосредственно отвечающей за создание специализированной аппаратуры.



Рис. 6. Контроль характеристик узлов квантового генератора в ходе сборки водородного стандарта частоты

В ходе экскурсии участники смогли увидеть организацию производственного процесса, особенности производственного цикла и условия, в которых создаётся оборудование для задач частотно-временной синхронизации.



Рис. 7. Готовые квантовые водородные дискриминаторы продолжают проходить тестирование перед установкой в оборудование

Непосредственное знакомство с производственной площадкой позволило составить более полное представление о работе предприятия и обратить внимание на значение технологической дисциплины и культуры производства при выпуске высокоточной аппаратуры.



Рис. 8. Готовое оборудование непрерывно тестируется до отправки заказчику

Для специалистов эксплуатирующих организаций это особенно важно: понимание того, как организовано изготовление оборудования, дополняет оценку его технических характеристик и возможностей применения в реальных сетях связи.

Таким образом, экскурсия стала содержательным дополнением к докладам и обсуждениям семинара. Она позволила участникам расширить представление о деятельности АО «Время-Ч», увидеть производственную сторону разработки телекоммуникационного оборудования и установить более непосредственный контакт с предприятием-изготовителем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научно-практический семинар АО «Время-Ч» стал площадкой для профессионального обсуждения актуальных задач частотно-временной синхронизации в пакетных сетях передачи данных. Представленные доклады охватили широкий круг вопросов — от формирования и передачи сигналов точного времени до обеспечения устойчивости синхронизации при воздействии помех, применения современных протоколов и разработки высокостабильных стандартов частоты. Такой тематический охват позволил рассмотреть синхронизацию как комплексную инженерную задачу, решение которой требует согласованного развития аппаратных средств, программного обеспечения и сетевой инфраструктуры.

Не менее важной составляющей мероприятия стало прямое общение представителей операторов связи, научных и метрологических организаций, разработчиков и производителей оборудования.

Семинар продемонстрировал востребованность открытого профессионального диалога, в рамках которого технические решения могут рассматриваться с учётом реальных условий эксплуатации, а требования пользователей — становиться ориентиром для дальнейшего совершенствования оборудования. Возможность обсудить представленные разработки непосредственно с их создателями, а также познакомиться с производственной площадкой АО «Время-Ч» придала мероприятию выраженную практическую направленность.

Проведение подобных встреч имеет существенное значение для развития отечественной телекоммуникационной отрасли.

По мере усложнения пакетных сетей и расширения областей применения технологий точного времени возрастают требования к надёжности, точности и управляемости систем синхронизации. Их выполнение предполагает не только совершенствование отдельных технических решений, но и постоянное взаимодействие производителей оборудования с организациями, которые проектируют, внедряют и эксплуатируют сетевую инфраструктуру.

Семинар в Нижнем Новгороде показал, что такой формат взаимодействия способствует обмену практическим опытом, более глубокому пониманию отраслевых задач и формированию предметных ориентиров для дальнейшей работы.

Конструктивная атмосфера мероприятия, содержательные доклады и заинтересованное участие представителей профессионального сообщества позволяют положительно оценить его значение и выразить надежду на продолжение подобных встреч.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Шварц, М. Л. Станционные часы и распределение шкал времени на энергообъектах / М. Л. Шварц, Е. А. Богданов, В. М. Аладин // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. – 2026. – Т. 18, № 3. – С. 54-61. – DOI 10.36724/2409-5419-2026-18-3-54-61.

[2] Лоховин, В. А. Разработка программного обеспечения для имитационного моделирования систем синхронизации шкалы времени / В. А. Лоховин, М. Л. Шварц // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2026. – Т. 17, № 3. – С. 44-50.

[3] Вексельман, М. И. Методы синхронизации шкал времени и частоты с использованием волоконно-оптических линий связи / М. И. Вексельман, М. Л. Шварц // Метрология времени и пространства : Материалы XII Международного симпозиума, Нижний Новгород, 24–26 сентября 2025 года. – Менделеево: Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, 2025. – С. 68-75.

[4] Lokhovin, V. A. Simulation Modeling of Reference Time Scale Transmission Line / V. A. Lokhovin, M. L. Schwartz // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. – 2025. – Vol. 8, No. 1. – P. 187-192. – DOI 10.1109/SYNCHROINFO65403.2025.11079389.

[5] Vekselman, M. I. Synchronization over Optical Communication Channels Using DWDM and PTP. Architecture and Optical Time Channel (OTC) Implementation / M. I. Vekselman, M. L. Schwartz // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. – 2025. – Vol. 8, No. 1. – P. 408-412. – DOI 10.1109/SYNCHROINFO65403.2025.11079350.

[6] Bogdanov, E. A. Variants for Constructing Time Scale Synchronization Systems in the Electric Power Engineering / E. A. Bogdanov, V. M. Aladin, M. L. Schwartz // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. – 2025. – Vol. 8, No. 1. – P. 45-50. – DOI 10.1109/SYNCHROINFO65403.2025.11079321.

[7] Мазуренко, Д. К. Использование алгоритмов предсказания для подстройки частоты в случае прерывистого синхросигнала или перехода в режим удержания / Д. К. Мазуренко, А. С. Фень, М. Л. Шварц // Электросвязь. – 2024. – № 4. – С. 37-40. – DOI 10.34832/ELSV.2024.53.4.013.

[8] Лоховин, В. А. Перспективные направления развития систем связи и синхронизации сложных инфраструктурных объектов / В. А. Лоховин, М. Л. Шварц, А. В. Рыжков // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2024. – Т. 18, № 11. – С. 30-37. – DOI 10.36724/2072-8735-2024-18-11-30-37.

[9] Особенности построения систем единого и точного времени в сетях связи электроэнергетики / М. Л. Шварц, Е. А. Богданов, А. В. Рыжков, В. М. Аладин // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2024. – Т. 18, № 12. – С. 27-33. – DOI 10.36724/2072-8735-2024-18-12-27-33.

[10] Шварц М.Л., Рыжков А.В. Современные тенденции развития систем сетевой синхронизации в сетях электросвязи. От плезиохронных до когерентных сетей // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. Том 4, 2021, С. 27-38

[11] Лоховин В.А., Шварц М.Л., Рыжков А.В. Перспективные направления развития систем связи и синхронизации сложных инфраструктурных объектов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №11. С. 30-37. DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-11-30-37

Информация об авторах

Медведев Сергей Юрьевич, канд. физ.-мат. наук, доцент, начальник отделения АО «Время-Ч», г. Нижний Новгород, Россия, e-mail: medvedev@vremya-ch.su

Кутузов Денис Валерьевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Связь» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, e-mail: d_kutuzov@mail.ru ORCID: 0000-0001-7963-1259

Осовский Алексей Викторович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Связь» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, e-mail: a_osovskiy@mail.ru ORCID: 0000-0002-3174-9765

Вексельман Михаил Ильич, канд. техн. наук, технический эксперт АО «Время-Ч», г. Нижний Новгород, генеральный директор ООО "ВИМ СЕРВИС" г. Москва, Россия, e-mail: miv@vim-srv.ru

A space for professional dialogue: the scientific-practical seminar "Solutions from JSC 'Vremya-Ch' for synchronization tasks in packet-switched networks"

Sergey Y. Medvedev[1], Denis V. Kutuzov[2], Alexey V. Osovsky[2], Mikhail I. Vekselman[1]

[1]Vremya-CH JSC, Nizhny Novgorod, Russia
[2]Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

***Abstract* – This article presents the outcomes of the scientific and practical seminar "Solutions by JSC 'Vremya-Ch' for Synchronization Tasks in Packet-Switched Networks," held from October 20–22, 2026, in Nizhny Novgorod. It examines key development trends in modern frequency and time synchronization systems, driven by the increasingly stringent requirements of telecommunication networks and geographically distributed technical systems regarding the accuracy and stability of time and frequency signal transmission. The technical solutions discussed at the seminar are highlighted, including the use of the PTP (IEEE 1588) protocol, White Rabbit technology, Synchronous Ethernet (SyncE), and specialized equipment for transmitting reference signals over fiber-optic communication lines. Particular attention is given to ensuring the resilience of satellite-based synchronization sources, the development of highly stable frequency standards, and the creation of geographically distributed systems for the delivery of ultra-precise time and frequency. The article summarizes the core topics of professional discussion, reflecting the current needs of telecommunications operators, equipment manufacturers, and metrological organizations. It underscores the importance of such events for exchanging technical expertise, aligning consumer requirements, and defining the future development of domestic frequency and time synchronization tools and systems.**

***Keywords* – frequency and time synchronization, packet-switched communication networks, precise time, PTP protocol, IEEE 1588, White Rabbit, Synchronous Ethernet (SyncE), frequency standards, metrological support, "Vremya-Ch" JSC.**

REFERENCES

[1] Shvarc, M. L. Stancionnye chasy i raspredelenie shkal vremeni na energoob"ektah / M. L. SHvarc, E. A. Bogdanov, V. M. Aladin // Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskih issledovaniyah Zemli. – 2026. – T. 18, № 3. – S. 54-61. – DOI 10.36724/2409-5419-2026-18-3-54-61.

[2] Lohovin, V. A. Razrabotka programmnogo obespecheniya dlya imitacionnogo modelirovaniya sistem sinhronizacii shkaly vremeni / V. A. Lohovin, M. L. SHvarc // Sistemy sinhronizacii, formirovaniya i obrabotki signalov. – 2026. – T. 17, № 3. – S. 44-50.

[3] Veksel'man, M. I. Metody sinhronizacii shkal vremeni i chastoty s ispol'zovaniem volokonno-opticheskih linij svyazi / M. I. Veksel'man, M. L. SHvarc // Metrologiya vremeni i prostranstva : Materialy XII Mezhdunarodnogo simpoziuma, Nizhnij Novgorod, 24–26 sentyabrya 2025 goda. – Mendeleevo: Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut fiziko-tekhnicheskih i radiotekhnicheskih izmerenij, 2025. – S. 68-75.

[4] Lokhovin, V. A. Simulation Modeling of Reference Time Scale Transmission Line / V. A. Lokhovin, M. L. Schwartz // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. – 2025. – Vol. 8, No. 1. – P. 187-192. – DOI 10.1109/SYNCHROINFO65403.2025.11079389.

[5] Vekselman, M. I. Synchronization over Optical Communication Channels Using DWDM and PTP. Architecture and Optical Time Channel (OTC) Implementation / M. I. Vekselman, M. L. Schwartz // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. – 2025. – Vol. 8, No. 1. – P. 408-412. – DOI 10.1109/SYNCHROINFO65403.2025.11079350.

[6] Bogdanov, E. A. Variants for Constructing Time Scale Synchronization Systems in the Electric Power Engineering / E. A. Bogdanov, V. M. Aladin, M. L. Schwartz // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. – 2025. – Vol. 8, No. 1. – P. 45-50. – DOI 10.1109/SYNCHROINFO65403.2025.11079321.

[7] Mazurenko, D. K. Ispol'zovanie algoritmov predskazaniya dlya podstrojki chastoty v sluchae preryvistogo sinhrosignala ili perekhoda v rezhim uderzhaniya / D. K. Mazurenko, A. S. Fen', M. L. SHvarc // Elektrosvyaz'. – 2024. – № 4. – S. 37-40. – DOI 10.34832/ELSV.2024.53.4.013.

[8] Lohovin, V. A. Perspektivnye napravleniya razvitiya sistem svyazi i sinhronizacii slozhnyh infrastrukturnyh ob"ektov / V. A. Lohovin, M. L. SHvarc, A. V. Ryzhkov // T-Comm: Telekommunikacii i transport. – 2024. – T. 18, № 11. – S. 30-37. – DOI 10.36724/2072-8735-2024-18-11-30-37.

[9] Osobennosti postroeniya sistem edinogo i tochnogo vremeni v setyah svyazi elektroenergetiki / M. L. SHvarc, E. A. Bogdanov, A. V. Ryzhkov, V. M. Aladin // T-Comm: Telekommunikacii i transport. – 2024. – T. 18, № 12. – S. 27-33. – DOI 10.36724/2072-8735-2024-18-12-27-33.

[10] SHvarc M.L., Ryzhkov A.V. Sovremennye tendencii razvitiya sistem setevoj sinhronizacii v setyah elektrosvyazi. Ot pleziohronnyh do kogerentnyh setej // Sistemy sinhronizacii, formirovaniya i obrabotki signalov. Tom 4, 2021, S. 27-38

[11] Lohovin V.A., SHvarc M.L., Ryzhkov A.V. Perspektivnye napravleniya razvitiya sistem svyazi i sinhronizacii slozhnyh infrastrukturnyh ob"ektov // T-Comm: Telekommunikacii i transport. 2024. Tom 18. №11. S. 30-37. DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-11-30-37

Information about the author

Sergey Yuryevich Medvedev, Ph.D, Associate Professor, Head of Division, Vremya-CH JSC, Nizhny Novgorod, Russia, e-mail: medvedev@vremya-ch.com

Denis Valeryevich Kutuzov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Communications, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, e-mail: d_kutuzov@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7963-1259

Alexey Viktorovich Osovsky, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Communications, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, e-mail: a_osovskiy@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3174-9765

Mikhail Ilyich Vekselman, Ph.D, technical expert, Vremya-CH JSC, Nizhny Novgorod, Russia, General Director of LLC "VIM SERVICE", Moscow, Russia, e-mail: miv@vim-srv.ru

Иерархический подход к применению генетического алгоритма в задачах численной оптимизации

С.А.К. Диане

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

Аннотация **– Предложен способ метаэвристической оптимизации настроек генетического алгоритма за счет выбора его метапараметров при помощи дополнительного генетического алгоритма, внешнего по отношению к основному. Исследован вопрос повышения сходимости генетического алгоритма на типовом примере дискретной оптимизации: One Max Problem 16 бит. Экспериментально показано, что преднастройка существенно повышает скорость поиска решения тестовой задачи. Обсуждаются перспективы дальнейшего развития и применения предложенного подхода.**

Ключевые слова **– генетический алгоритм, метаэвристическая оптимизация, иерархические вычисления, многоуровневое программирование.**

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с середины XX века методы эволюционного программирования, и, в частности, генетические алгоритмы (ГА), зарекомендовали себя как удобное, надежное и достаточно эффективное с вычислительной точки зрения средство решения задач численной оптимизации, в том числе задач поиска экстремумов многомерных функций [1, 2].

Неполный список прикладных применений данной группы методов включает: поиск маршрутов перемещения подвижных объектов и синтез систем управления автономными мобильными роботами [3], формирование расписаний в системах массового обслуживания, синтез мультимедийной звуковой и визуальной информации, символьную регрессию аналитических зависимостей [4].

Основные сложности применения ГА заключаются, с одной стороны, в необходимости корректной формализации процесса поиска решения – выбора схем кодирования элементов решения в виде генов, а с другой – в формировании функционала пригодности, который адекватно оценивал бы практическую применимость потенциальных решений. Кроме того, требуется тонкая настройка метапараметров, отвечающих за число особей в популяции (N_p,), число элементарных мутаций (N_m), процент особей, выживающих при отборе, (K_s) и др.

Решением могут служить метаэвристические алгоритмы в их классической парадигме применения [5], но они требуют существенного участия эксперта на этапе выделения частных случаев и приближений.

Для преодоления обозначенной проблемы предлагается реализовать схему многоуровневого эволюционного программирования (МЭП), где верхний уровень будет отвечать за выбор метапараметров, а нижний – за непосредственный поиск решений прикладной задачи. Причем потенциально реализуемы последовательная и параллельная версии такого подхода. В данном исследовании основное внимание уделяется последовательной работе уровней.

I. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Предлагаемый принцип МЭП, нацеленный на иерархическое применение генетического алгоритма, отражен в блок-схеме, представленной на Рис. 1.

На нижнем уровне (ГА 1) производится непосредственно генерирование и отбор решений целевой задачи численной оптимизации. На верхнем же уровне (ГА 2) проводится преднастройка основной поисковой процедуры, а именно – выбираются метапараметры N_p, N_m, K_s. Причем соблюдается терминологическая эквивалентность: параметры, выбираемые на верхнем уровне, являются метапараметрами для нижестоящего уровня.

Следует ожидать, что алгоритм нижнего уровня после преднастройки покажет лучшую сходимость, нежели при первоначальном запуске со случайно выбранными метапараметрами.

Входом алгоритма является начальное приближение решения для рассматриваемой прикладной задачи, а также пользовательский функционал оценивания пригодности. Выходом двухуровневого алгоритма являются оптимизированные параметры, кодирующие решение целевой прикладной задачи.

Исследуем подробнее схему кодирования решений и функционалы оценивания для двух уровней предлагаемого метода МЭП.

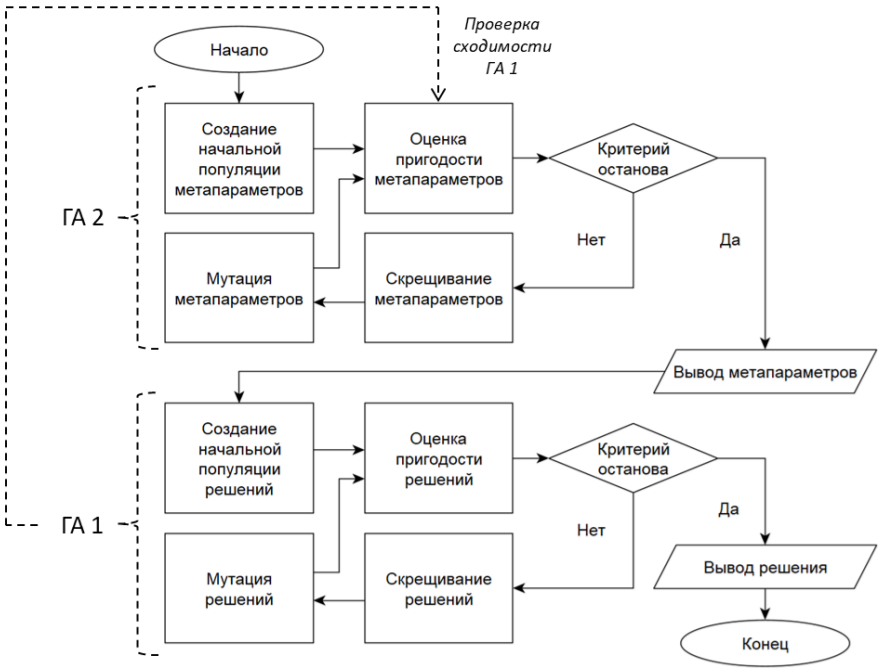


Рис. 1. Архитектура двухуровневого генетического алгоритма

II. РЕАЛИЗАЦИЯ ДВУХУРОВНЕВОГО ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

В качестве модельной проблемы рассматривалась широко известная задача «One Max Problem» («All Ones Problem») [6], где итеративно отыскивается число с двоичным представлением, состоящим из единиц.

Несмотря на то, что данная задача имеет тривиальное аналитическое решение, метод эволюционного программирования справляется с ней лишь за некоторое число шагов – тем меньшее, чем аккуратнее подобраны метапараметры поиска.

Генотип особей ГА 1, нацеленного на непосредственное решение указанной тестовой задачи, описывался в виде набора битов искомого числа:

$$C_1 = \{b_1, \ldots, b_{16}\},$$

имеющего длину L_1=16.

В свою очередь формат особей ГА 2 описывался в виде набора метапараметров, упомянутых в разделе 1:

$$P_2 = \{N_p, N_m, K_s\}.$$

При этом двоичное представление формировалось из метапредставления P_2 в виде набора битов:

$$C_2 = \{\{b_1, \ldots, b_8\}, \{b_1, \ldots, b_8\}, \{b_1, \ldots, b_8\}\} = \\ = \{b_1, \ldots, b_{24}\},$$

имеющего длину L_2=24.

Для его формирования применялось линейное отображение восьмиразрядных дискретных кодов (генотипов) метапараметров в заданные экспертом диапазоны допустимых значений согласно Табл. I.

ТАБЛИЦА I
ОТОБРАЖЕНИЕ ВОСЬМИБИТНЫХ МЕТАПАРАМЕТРОВ В ВЕЩЕСТВЕННЫЕ ЧИСЛА

Метапараметр	Мин. значение	Макс. значение
N_p	3	30
N_m	1	5
K_s	0,1	0,5

В Табл. II описаны основные характеристики ГА 1 и ГА 2. Следует отметить, что значительное сходство особенностей двух этапов эволюционного поиска свидетельствует о масштабируемости предлагаемого подхода и потенциальной возможности добавления последующих уровней для метаэвристической эволюционной оптимизации: ГА 3, …, ГА N, где $N \in \mathbb{N}$.

Функция пригодности ГА 1 имеет вид суммы битов решения C_1:

$$F_1(C_1) = \sum_{i=1}^{L_1} b_i. \quad (1)$$

Функция пригодности ГА 2 для оценки решения C_2 обратно пропорциональна длительности поиска подходящего решения C_1 и задается формулой:

$$F_2(C_2) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M} \frac{\varphi_i(F_1)}{L_1 N_{iter}(G_1, C_2)}, \quad (2)$$

где M=3 – число сэмплирований стохастической оценки пригодности, $\varphi_i(F_1)$ – экспериментальное наблюдение пригодности особи ГА 1, L_1 – нормализующая величина для $\varphi_i(F_1)$, G_1 – экземпляр

ТАБЛИЦА II
СВОЙСТВА ЭТАПОВ ДВУХУРОВНЕВОГО ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Особенность	ГА 1	ГА 2
Размерность решения	16 бит	24 бит
Инициализация популяции	Формирование набора из N_p случайных бинарных векторов	Формирование 10 случайных наборов метапараметров
Оценка особи	Число единиц в бинарном представлении особи	Величина, обратная числу итераций в прогоне ГА 1 с испытываемыми метапараметрами
Отбор особей	Линейная ранговая селекция наилучших решений с сохранением K_s особей без элитизма	Линейная ранговая селекция наилучших решений с сохранением 20% особей без элитизма
Скрещивание особей	Одноточечное со случайным индексом кроссинговера	Одноточечное со случайным индексом кроссинговера
Мутация особи	Инверсия N_m битов в генотипе особи	Инверсия 1 бита в генотипе особи
Критерий останова	Наблюдение 100% единиц в генотипе особи или достижение 50 итераций отбора	Достижение 50 итераций отбора

алгоритмической сущности, хранящей параметры и состояние популяции ГА 1, N_{iter} – число итераций до достижения максимальной пригодности $\varphi_i(F_1)$, не превышающее эмпирический лимит $N_{iter}^{\max} = 50$.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальные исследования проводились с использованием языка программирования Python, библиотек numpy и matplotlib.

Методика экспериментальной верификации метода МЭП представлена на Рис. 2. и включает запуск ГА 1 с априорно выбранными случайными метапараметрами (эксперимент *A*); подбор метапараметров при помощи ГА 2; перезапуск ГА 1 с оптимизированными метапараметрами (эксперимент *B*).

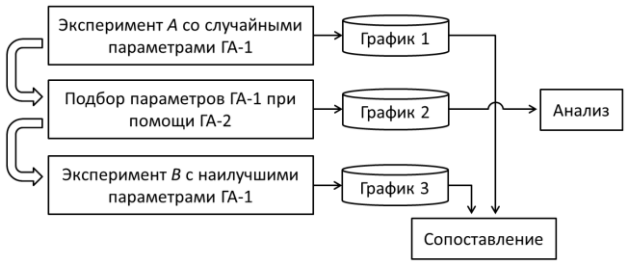


Рис. 2. Схема проведения экспериментов

Во всех экспериментах оценивалась зависимость пригодности особей $F \in \{F_1, F_2\}$ от итерации эволюционного отбора T.

На Рис. 3 представлен результат запуска ГА 1 на поиск вектора из единиц с метапараметрами:

$$P_{1,\,default} = \{10;\ 1;\ 0{,}2\}_{10},$$
$$C_{1,\text{default}} = \{0;\ 1;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 1;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 1;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0\}_2.$$

Следует отметить, что в общем случае для графиков данного типа допускаются не только участки роста, но и участки падения пригодности, ввиду отсутствия элитизма при репопуляции векторов решений.

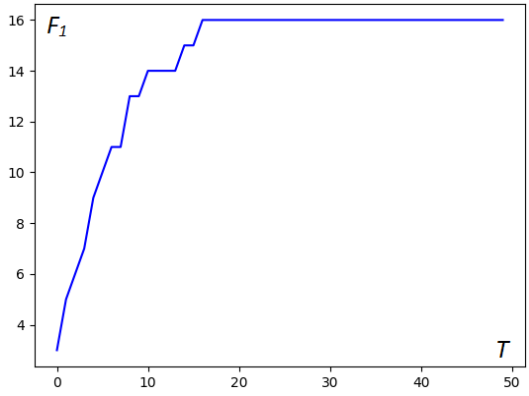


Рис. 3. Частный график роста пригодности особей ГА 1

На Рис. 4 представлен результат запуска ГА 2 на поиск вектора метапараметров (для нижестоящего алгоритма ГА 1) с собственными параметрами:

$$P_{2,\,default} = \{10;\ 1;\ 0{,}2\}_{10},$$
$$C_{2,\text{default}} = \{0;\ 1;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 1;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 1;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0\}_2.$$

Большой разброс значений графика обусловлен стохастичной природой используемой функции пригодности F_2. В данном случае она зависит от числа M=3 прогонов ГА 1 на тестовой задаче. При увеличении числа сэмплирований дисперсия функции роста пригодности упадет, но вместе с этим повысится и вычислительная сложность алгоритма.

По завершении 50 итераций был найден и декодирован улучшенный генотип метапараметров:

$$C_2 = \{0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 0;\ 1;\ 0;\ 1;\ 0;\ 1;\ 0;\ 0;\ 1;\ 0;\ 1;\ 1;\ 1;\ 1;\ 1;\ 0;\ 1;\ 0;\ 0;\ 0\}_2$$
$$P_2 = \{27;\ 2;\ 0{,}108\}_{10}.$$

Применение найденного вектора метапараметров позволило существенно улучшить сходимость ГА 1, как видно из Рис. 5 (в сравнении с рис. 3).

Для повышения достоверности результатов были проведены три эксперимента, аналогичных описанным выше, но с 10 запусками в каждом.

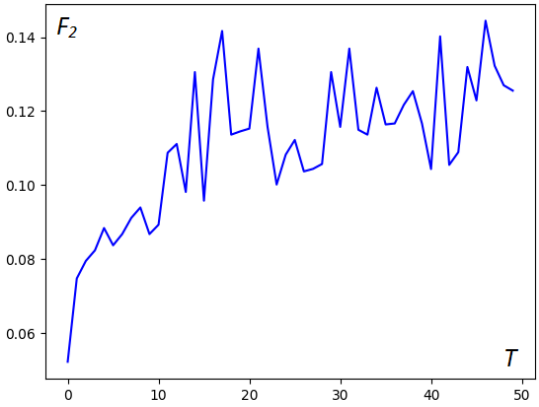


Рис. 4. Частный график роста пригодности особей ГА 2

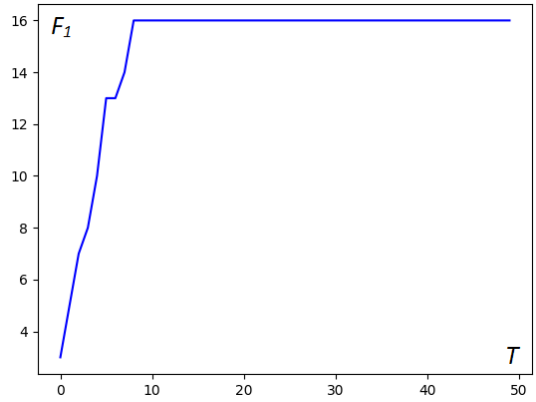


Рис. 5. Частный график роста пригодности особей ГА 1 с преднастройкой от ГА 2

На Рис. 6 представлен усредненный результат запуска ГА 1 с метапараметрами $P_{1,\,default}$. На Рис. 7 представлен результат запуска ГА 2 с параметрами $P_{2,\,default}$ на поиск вектора метапараметров для ГА 1. На Рис. 8 представлен результат запуска ГА 1 с полученной преднастройкой от ГА 2.

Благодаря эффекту усреднения нескольких кривых роста пригодности (Рис. 7), наблюдается положительная динамика поиска метапараметров для ГА 1 с течением итераций ГА 2.

Возвращаясь к графику на Рис. 6, следует отметить его важную особенность: усредняемые кривые в его составе строились для фиксированного набора начальных параметров ГА 1. Тем не менее, присутствует существенный разброс результатов (показан оранжевым цветом). Для оптимизированных же настроек разброс снижен, как видно из Рис. 8. Более того, сокращено время достижения максимального значения F_1.

Углубленный анализ сходимости двухуровневого алгоритма проводился на примере 10 начальных уставок по параметрам ГА 1:

$$P_{1,\,test} \in \{\{5;\,1;\,0{,}2\},\ \{6;\,3;\,0{,}3\},\ \{10;\,1;\,0{,}2\},\ \{11;\,2;\,0{,}3\},\ \{15;\,2;\,0{,}1\},\ \{17;\,3;\,0{,}3\},\ \{20;\,1;\,0{,}2\},\ \{22;\,2;\,0{,}3\},\ \{25;\,2;\,0{,}1\},\ \{28;\,3;\,0{,}3\}\}.$$

Сопоставление фронтов нарастания усредненных функций пригодности ГА 1 до и после оптимизации при помощи ГА 2 показало, что время достижения максимального значения F_1=16 сокращается на 44,6%.

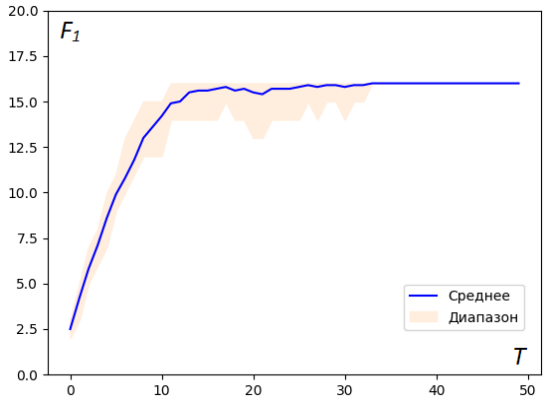


Рис. 6. Усредненный график роста пригодности особей ГА 1

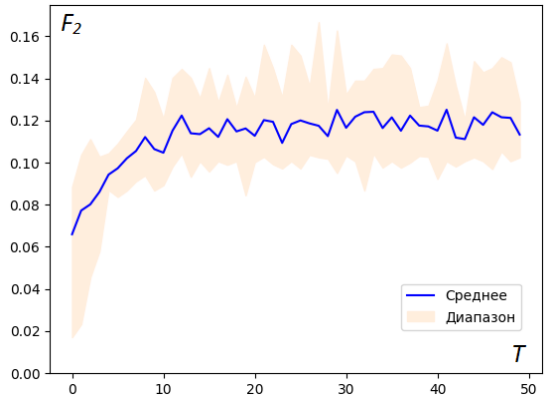


Рис. 7. Усредненный график роста пригодности особей ГА 2

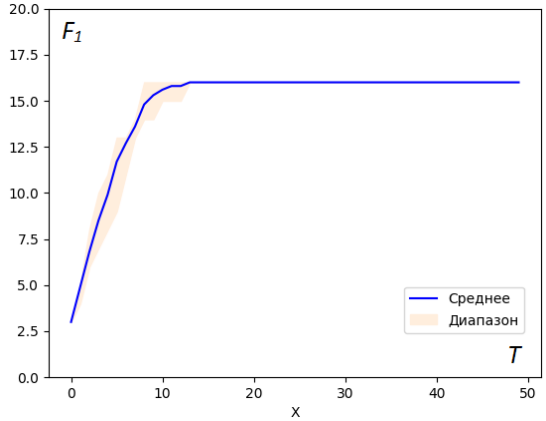


Рис. 8. Усредненный график роста пригодности особей ГА 1 с преднастройкой от ГА 2

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного исследования можно с достаточной уверенностью заключить, что предположение о позитивном эффекте иерархической стыковки генетических алгоритмов в рамках метода МЭП подтвердилось. Повысилась сходимость процесса

численной оптимизации на задаче поиска бинарного вектора, состоящего из единиц.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на реализацию параллельной работы ГА 1 и ГА 2, а также на увеличение числа уровней метаэвристической оптимизации. Это может дать выигрыш при решении задач высокой размерности. Планируется провести углубленные экспериментальные исследования с вариацией ключевых параметров МЭП и агрегацией статистических показателей эффективности. Также важно уделить внимание оценке вычислительной сложности описанного алгоритма с учетом его стохастичности.

На практике использование принципа МЭП может представлять интерес при решении комбинаторных задач, аппроксимации нелинейных функций базисными элементами; при синтезе систем управления автономными роботами, поиске траекторий движения динамических объектов; при генерации визуальной, звуковой и текстовой информации.

Стоит отметить, что дополнительные применения МЭП могут быть сопряжены с задачами менеджмента и интеграции деятельности организаций [7], а также с интеллектуальной обработкой данных и оптимизацией инфокоммуникаций в технических системах [8].

ЛИТЕРАТУРА

[1] Goldberg D.E., Holland J. H. Genetic algorithms and machine learning // Machine learning. 1988. Vol. 3. No. 2. P. 95–99

[2] Бураков М.В. Генетический алгоритм: теория и практика: учеб. пособие. СПб.: ГУАП. 2008. 164 с.

[3] Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Кадочников М.В., Ситников М.С. Использование генетических алгоритмов для автоматического формирования базы знаний интеллектуальной системы управления автономным мобильным роботом // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 6. С. 18-23.

[4] Дивеев А.И., Ломакова Е.М. Метод бинарного генетического программирования для поиска математического выражения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2017. Т. 18. №1. С. 125-134

[5] Германчук М.С., Лемтюжникова Д.В., Лукьяненко В.А. Метаэвристические алгоритмы для многоагентных задач маршрутизации // Проблемы управления. 2020. №6. С. 3 – 13.

[6] Mühlenbein H. How genetic algorithms really work: I. Mutation and Hillclimbing // Parallel Problem Solving from Nature 2 / ed. by R. Männer, B. Manderick. – Brussels: Elsevier Science Publishers, 1992. P. 15–26.

[7] Рожнов А. В. Элективный подход к обоснованию гибридных моделей анализа среды функционирования при оценке эффективности интеграционных решений в высокотехнологичных отраслях // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2025): Труды 18-й международной конференции. 2025. С. 1146-1150.

[8] Osovsky A., Kutuzov D., Starov D., Bakalaeva R. and Stukach O. Comparison of Machine Learning Methods for IoT and IIoT Traffic Prediction // 2024 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED), Sochi, Russia. 2024. P. 1-6.

Информация об авторе

Диане Секу Абдель Кадер, к.т.н., старший научный сотрудник ИПУ РАН, доцент кафедры проблем управления РТУ МИРЭА, Москва, Россия, e-mail: diane1990@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8690-6422

A hierarchical approach to applying a genetic algorithm in numerical optimization problems.

Sekou A. K. Diane

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Moscow, Russia

***Abstract* – A method for metaheuristic optimization of genetic algorithm settings is proposed, achieved by selecting its metaparameters using an additional genetic algorithm that is external to the main one. The issue of improving the convergence of the genetic algorithm is investigated using a typical example of discrete optimization task: One Max Problem with 16 bit vector. It has been experimentally demonstrated that the pre-tuning significantly increases the speed of finding a solution to a benchmark problem. The prospects for further development and application of the proposed approach are discussed.**

***Keywords* – genetic algorithm, metaheuristic optimization, hierarchical computing, multilevel programming.**

REFERENCES

[1] Goldberg D.E., Holland J. H. Genetic algorithms and machine learning // Machine learning. 1988. Vol. 3. No. 2. P. 95–99

[2] Burakov M.V. Genetic algorithm: theory and practice: textbook. stipend. St. Petersburg: GUAP. 2008. 164 p.

[3] Makarov I.M., Lokhin V.M., Manko S.V., Kadochnikov M.V., Sitnikov M.S. Use of genetic algorithms for automatic formation of base of knowledges of intellectual control system by autonomous mobile robot // Mehatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2008. No. 5. P. 18-23. (In Russ.).

[4] Diveev A.I., Lomakova E.M. Method of binary analytic programming to look for optimal mathematical expression // RUDN Journal of Engineering Research. 2017. Vol. 18. No. 1. P. 125-134.

[5] Germanchuk M.S., Lemtyuzhnikova D.V., Lukyanenko V.A. Metaheuristic algorithms for multi-agent routing problems // Control Problems. 2020. No. 6. P. 3–13.

[6] Mühlenbein H. How genetic algorithms really work: I. Mutation and Hillclimbing // Parallel Problem Solving from Nature 2 / ed. by R. Männer, B. Manderick. – Brussels: Elsevier Science Publishers, 1992. P. 15–26.

[7] Rozhnov A. V. An elective approach to the justification of hybrid models for analyzing the operating environment when assessing the effectiveness of integration solutions in high-tech industries // Management of Large-Scale Systems Development (MLSD'2025): Proceedings of the 18th International Conference. 2025. P. 1146–1150. (In Russ.)

[8] Osovsky A., Kutuzov D., Starov D., Bakalaeva R. and Stukach O. Comparison of Machine Learning Methods for IoT and IIoT Traffic Prediction // 2024 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED), Sochi, Russian Federation. 2024. P. 1-6.

Information about the author

Sekou Abdel Kader Diane, Ph.D. (Eng.), Senior Researcher at the Institute of Control Sciences RAS, Associate Professor at the Department of Problems of Control at RTU MIREA, Moscow, Russia, e-mail: diane1990@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8690-6422

Оптимизация запросов в реляционных базах данных с использованием индексирования на основе B-деревьев

А.А. Писаренко

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация **– В статье рассматриваются методы оптимизации запросов в реляционных базах данных посредством применения индексных структур на основе сбалансированных деревьев (B-деревьев). Проведён сравнительный анализ основных типов индексов – B-Tree и Hash – с точки зрения алгоритмической сложности, применимости и эксплуатационных ограничений. Описана методология экспериментального исследования: создана тестовая база данных объёмом 100 000 записей, на которой выполнялись SELECT-запросы с различными предикатами как при наличии индексов, так и без них. Результаты экспериментов зафиксированы в табличной форме и проанализированы. Установлено, что применение B-Tree индексов позволяет сократить время выполнения точечных запросов более чем в 300 раз по сравнению с последовательным сканированием таблицы. Сформулированы практические рекомендации по выбору стратегии индексирования для различных категорий запросов.**

Ключевые слова – реляционная база данных, индексирование, B-дерево, хэш-индекс, оптимизация запросов, план выполнения запроса, PostgreSQL, производительность СУБД.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективное управление данными является одним из ключевых условий функционирования современных информационных систем. Реляционные базы данных по-прежнему занимают доминирующее положение в корпоративном секторе: согласно статистике DB-Engines, системы класса RDBMS составляют свыше 60 % всех развёртываний баз данных в мире [1]. При этом производительность SQL-запросов в значительной мере определяет пользовательский опыт и экономические показатели приложений – от веб-сервисов до аналитических платформ.

По мере роста объёма хранимых данных линейная сложность полного сканирования таблицы (Full Table Scan) становится неприемлемой с операционной точки зрения. Индексные структуры данных позволяют перейти от O(n) к O(log n) при точечном поиске, тем самым принципиально изменяя масштабируемость системы. Среди всех индексных структур, реализованных в промышленных СУБД, B-дерево (Balanced Tree) занимает особое место: оно поддерживает не только точный поиск, но и запросы на диапазон, сортировку и частичное совпадение [2].

Несмотря на широкую известность принципов индексирования, вопрос количественной оценки прироста производительности при переходе от сканирования к индексному доступу остаётся актуальным. Практические эксперименты в контролируемых условиях позволяют получить воспроизводимые метрики, необходимые для обоснованного принятия архитектурных решений.

Целью настоящей работы является сравнительная оценка производительности SELECT-запросов в PostgreSQL при различных стратегиях доступа к данным – без индекса, с B-Tree индексом и с Hash-индексом – на тестовой базе данных объёмом 100 000 записей.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача исследования заключается в количественной оценке эффективности индексных структур B-Tree и Hash в СУБД PostgreSQL при выполнении типовых SELECT-запросов различной селективности, а также в анализе накладных расходов на поддержку индексов при операциях вставки данных. Для решения этой задачи необходимо создать тестовую базу данных объёмом 100 000 записей, имитирующую транзакционную нагрузку интернет-магазина, и разработать методику измерений времени выполнения запросов и обращений к страницам буферного кэша. Сравнительный анализ проводится для трёх режимов: отсутствие индексов, использование B-Tree индекса и использование Hash-индекса. Результаты должны позволить сформулировать практические рекомендации по выбору типа индекса в зависимости от класса запроса (точечный, диапазонный, сортировка, агрегация) и селективности предиката.

II. ОБЩАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ИНДЕКСОВ

Индекс в СУБД представляет собой вспомогательную структуру данных, хранящую

упорядоченные значения одного или нескольких столбцов таблицы вместе с указателями (TID, Tuple Identifier) на физическое местоположение соответствующих строк на диске [3]. Существуют различные таксономии индексных структур; наиболее распространённая классификация использует в качестве критерия алгоритмическую основу:

1. Древовидные индексы (B-Tree, B+-Tree, R-Tree, GiST);
2. Хэш-индексы;
3. Битовые (Bitmap) индексы;
4. Полнотекстовые индексы (GIN, инвертированные списки).

В промышленных СУБД (PostgreSQL, MySQL, Oracle, Microsoft SQL Server) реализация по умолчанию при выполнении команды CREATE INDEX – B-Tree, что свидетельствует о его универсальности и надёжности как инструмента оптимизации [4].

III. B-ДЕРЕВО: СТРУКТУРА И АЛГОРИТМЫ

B-дерево (Balanced Tree) было предложено Р. Байером и Е. МакКрейтом в 1972 году [5]. Это сбалансированное дерево порядка m, удовлетворяющее следующим инвариантам:

1. Каждый нелистовой узел, кроме корня, содержит от ⌈m/2⌉ до m дочерних узлов;
2. Все листовые узлы находятся на одном уровне, что гарантирует одинаковую глубину поиска для любого ключа;
3. Ключи в каждом узле упорядочены; значения левого поддерева узла не превышают ключа-разделителя, значения правого – не меньше него.

В большинстве практических реализаций СУБД применяется вариант B+-дерево, в котором все данные (или TID) хранятся исключительно в листовых узлах, тогда как внутренние узлы содержат только ключи-направляющие. Листовые узлы связаны в двунаправленный список, что обеспечивает эффективное выполнение запросов на диапазон без возврата к корню [6].

Временная сложность основных операций определяется следующим образом.

1. Точечный поиск вычисляется по формуле:

$$O(log_m n), \quad (1)$$

где, O – обозначение асимптотической сложности; m – порядок дерева (максимальное количество дочерних узлов); n – общее количество записей.

2. Вставка вычисляется по формуле (1) с возможным разбиением узлов.

3. Удаление вычисляется по формуле (1) с возможным слиянием узлов.

4. Поиск по диапазону вычисляется по формуле:

$$O(log_m(n) + k), \quad (2)$$

где, k – число возвращаемых записей.

Пространственная сложность составляет O(n). При коэффициенте заполнения узлов порядка 70–80 % (типичное значение для PostgreSQL) высота дерева для таблицы из 10^6 записей обычно не превышает 4–5 уровней, что соответствует крайне малому числу операций ввода-вывода [7].

PostgreSQL реализует B+-дерево с поддержкой конкурентного доступа (WAL-совместимый алгоритм Lehman–Yao [8]) и механизмом VACUUM для удаления «мёртвых» указателей, накапливающихся после операций UPDATE и DELETE [9].

IV. ХЭШ-ИНДЕКСЫ

Хэш-индекс строится на основе хэш-таблицы: значение индексируемого столбца пропускается через хэш-функцию h(x), результат которой определяет номер «корзины» (bucket), хранящей TID соответствующих строк. Теоретическая сложность точечного поиска составляет O(1) при равномерном распределении ключей и отсутствии коллизий.

Сравнение ключевых характеристик B-Tree и Hash индексов систематизировано в Табл. I [10].

ТАБЛИЦА I
СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК B-TREE И HASH ИНДЕКСОВ

Критерий	B-Tree	Hash
Точечный поиск (=)	O(log n)	O(1) амортизированно
Диапазонный поиск	O(log n + k)	Не поддерживается
Сортировка ORDER BY	Поддерживается	Не поддерживается
Операторы LIKE	Поддерживается (prefix)	Не поддерживается
WAL-безопасность	Да	Да (с PG 10+)
Накладные расходы на запись	Умеренные	Низкие
Применение по умолчанию	Универсальное	Точечный поиск по равенству

Однако хэш-индексы имеют принципиальные ограничения, существенно сужающие область их применения:

1. Не поддерживают операторы сравнения («<», «>», BETWEEN), поскольку хэш-функция не сохраняет порядок ключей;
2. Уязвимы к деградации производительности при высокой степени коллизий (случай «плохой» хэш-функции или низкой кардинальности атрибута);
3. До PostgreSQL 10 не были WAL-безопасными (в случае сбоя требовалось полное перестроение

индекса), что ограничивало их применение в продуктовых средах [4].

V. ОПТИМИЗАТОР ЗАПРОСОВ И ПЛАНЫ ВЫПОЛНЕНИЯ

Ключевым компонентом СУБД, принимающим решение об использовании индекса, является оптимизатор запросов (query optimizer). В PostgreSQL применяется стоимостный (cost-based) оптимизатор: для каждого возможного плана вычисляется оценка стоимости в условных единицах (seq_page_cost = 1.0 по умолчанию), и выбирается план с минимальной оценкой [9]. Оптимизатор анализирует статистику распределения значений в столбцах (объект pg_statistic), на основе которой оценивает селективность предиката запроса.

Ключевые факторы, влияющие на выбор плана:

1. Селективность предиката: при высокой селективности (малая доля возвращаемых строк) индексный доступ эффективнее полного сканирования;
2. Размер таблицы и коэффициент кластеризации (correlation) индекса;
3. Наличие операции сортировки: B-Tree позволяет избежать явной сортировки, если ORDER BY совпадает с порядком ключей [6].

VI. ТЕСТОВАЯ СРЕДА

Эксперименты были проведены в СУБД PostgreSQL версии 15.3 с параметрами конфигурации, приведёнными в Табл. II.

ТАБЛИЦА II
КОНФИГУРАЦИЯ POSTGRESQL ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Параметр	Значение	Назначение
shared_buffers	8 GB	Буферный кэш
effective_cache_size	24 GB	Оценка кэша ОС
work_mem	64 MB	Память для сортировки
random_page_cost	1,1	Стоимость случайного чтения
enable_seqscan	off (при тестировании)	Принудительное применение индекса

Все эксперименты проводились на сервере со следующими характеристиками: процессор Intel Core i7-12700K (12 ядер, 3.6 ГГц), оперативная память 32 ГБ DDR4-3200, хранилище NVMe SSD Samsung 980 Pro (последовательная скорость чтения 7 000 МБ/с). Операционная система – Ubuntu Server 22.04 LTS.

VII. СХЕМА ТЕСТОВОЙ БАЗЫ ДАННЫХ

Для экспериментов была создана таблица orders, имитирующая типовую транзакционную нагрузку интернет-магазина. Схема таблицы представлена на Рис.1.

Таблица заполнена 100 000 записями с помощью генератора псевдослучайных данных (функция generate_series [11] в сочетании с random() [12]).

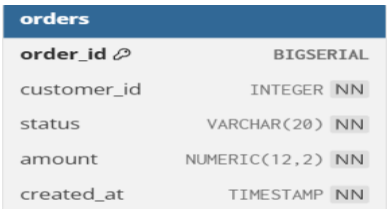


Рис. 1. Схема таблицы orders

Распределение значений атрибутов: customer_id – равномерное в диапазоне [1, 5000] (кардинальность ≈ 5 000); status – дискретное с пятью значениями ('new', 'paid', 'shipped', 'delivered', 'cancelled') в соотношении 10:30:25:25:10; amount – нормальное распределение со средним 5 000 и стандартным отклонением 3 000; created_at – равномерное в диапазоне [2022-01-01, 2023-12-31].

VIII. СОСТАВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Тестирование проводилось по следующей методике. Для каждого типа запроса (Q1–Q5) измерялось среднее время выполнения по 100 прогонам с предварительной очисткой кэша буферов (pg_prewarm с параметром 'buffer' устанавливался в начале каждой серии). Измерение времени выполнялось командой EXPLAIN (ANALYZE, BUFFERS, FORMAT TEXT) [9].

Пять типов запросов приведены в Табл. III:

ТАБЛИЦА III
ТИПЫ ЭКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЫХ ЗАПРОСОВ

Обозна-чение	Тип запроса	Предикат / операция	Селективность
Q1	Точечный	customer_id = X	высокая (≈ 20 строк из 100 000)
Q2	Диапазонный	amount BETWEEN A AND B	средняя (≈ 10 % строк)
Q3	Фильтр по значению	status = '...'	низкая (≈ 30 % строк)
Q4	Сортировка с ограничением	ORDER BY created_at LIMIT 100	–
Q5	Агрегация с группировкой	SUM(amount) GROUP BY customer_id	–

Последовательно создавались:

1. B-Tree индекс: CREATE INDEX idx_btree_customer ON orders (customer_id);
2. Hash индекс: CREATE INDEX idx_hash_customer ON orders USING hash (customer_id);

и серия измерений повторялась.

IX. Время выполнения запросов

Результаты измерений представлены в Табл. IV. Значения округлены до одного знака после запятой и выражены в миллисекундах.

ТАБЛИЦА IV
СРЕДНЕЕ ВРЕМЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАПРОСОВ

Запрос	Тип запроса	Без индекса (Seq Scan)	B-Tree (мс)	Hash (мс)
Q1	Точечный поиск (customer_id = X)	62,4	0,19	0,14
Q2	Диапазон по amount	74,1	8,3	74,3 *
Q3	Фильтр по status	67,8	68,1 **	67,9 **
Q4	ORDER BY + LIMIT 100	81,2	0,52	81,4 *
Q5	GROUP BY агрегация	108,6	42,7	108,9 *
Q6	Агрегация с HAVING (фильтр групп)	112,4	48,3	112,4 *
Q7	Выборка одного атрибута (SELECT customer_id WHERE customer_id = X)	61,8	0,12	0,10

* Hash-индекс не применяется оптимизатором для данного типа запроса, выполняется Seq Scan.

** Оптимизатор выбирает Seq Scan ввиду низкой селективности предиката (≈ 30 %).

Данные Табл. IV демонстрируют ряд значимых закономерностей. Для запроса Q1 B-Tree индекс обеспечивает ускорение в 328 раз (62,4 / 0,19), Hash-индекс – в 446 раз относительно полного сканирования. Столь высокие показатели обусловлены крайне высокой селективностью запроса: из 100 000 строк возвращается в среднем 20 строк (100 000 / 5 000 = 20).

Для запроса Q2 (диапазонный поиск) B-Tree демонстрирует ускорение в 8,9 раза, тогда как Hash-индекс не используется и обеспечивает ту же производительность, что и Seq Scan. Это подтверждает теоретическое ограничение Hash-индексов на диапазонные запросы.

Запрос Q3 представляет принципиально важный случай: оптимизатор отдаёт предпочтение Seq Scan даже при наличии индекса. Это объясняется низкой селективностью предиката (возвращается ≈ 30 000 строк из 100 000 – около 30 %); случайное чтение 30 000 страниц через индекс обходится дороже, чем последовательное чтение всей таблицы [9].

Запрос Q4 демонстрирует, что B-Tree особенно эффективен при сортировке с ограничением результирующего множества: вместо сортировки 100 000 строк достаточно пройти по листовому слою индекса до получения 100 записей.

Для запроса Q5 (агрегация без фильтрации групп) B-Tree индекс позволяет сократить время выполнения до 42,7 мс, что в 2,5 раза быстрее последовательного сканирования.

Запрос Q6 (агрегация с HAVING) выполняется за 112,4 мс без индекса. B-Tree индекс на customer_id позволяет использовать Index Only Scan, сокращая время до 48,3 мс (ускорение в 2,3 раза). Hash-индекс неприменим для операций группировки, поэтому его время не отличается от Seq Scan.

Запрос Q7 (выборка только столбца customer_id) демонстрирует преимущество покрывающего индекса: B-Tree и Hash индексы дают время 0,12 мс и 0,10 мс соответственно, что на 30–40% быстрее, чем при выборке всех столбцов (Q1), так как не требуется обращение к табличной куче.

X. Использование страниц буферного кэша

Помимо времени выполнения, вывод EXPLAIN (ANALYZE, BUFFERS) позволяет оценить нагрузку на подсистему ввода-вывода. В Табл. V представлено количество страниц буферного пула, обращений к которым потребовало выполнение каждого запроса (Buffers hit – из кэша, Buffers read – с диска).

ТАБЛИЦА V
ОБРАЩЕНИЕ К СТРАНИЦАМ БУФЕРНОГО КЭША ДЛЯ ЗАПРОСА Q1

Стратегия доступа	Всего страниц	Buffers hit	Buffers read
Seq Scan (без индекса)	541	0	541
B-Tree Index Scan	5	3	2
Hash Index Scan	3	3	0

Табл. V наглядно иллюстрирует принципиальное различие в нагрузке на I/O-подсистему: Seq Scan вынужден прочитать все 541 страницу таблицы (≈ 4,2 МБ при размере страницы 8 КБ), тогда как Index Scan при B-Tree обращается лишь к 5 страницам (4 уровня дерева + 1 страница кучи). Это особенно критично для сценариев «холодного» кэша, когда данные отсутствуют в буферном кэше.

XI. АНАЛИЗ НАКЛАДНЫХ РАСХОДОВ НА ОБСЛУЖИВАНИЕ ИНДЕКСОВ

Создание индексов влечёт дополнительные затраты на операции DML. В Табл. VI представлено среднее время выполнения INSERT для одной строки при различных конфигурациях индексов (1 000 измерений).

ТАБЛИЦА VI
НАКЛАДНЫЕ РАСХОДЫ НА ОПЕРАЦИИ INSERT

Конфигурация индексов	Время INSERT (мкс)	Overhead к baseline (%) [13]
Без индексов (baseline)	87	–
PK (B-Tree) + B-Tree по customer_id	134	+54 %
PK (B-Tree) + Hash по customer_id	121	+39 %
PK + B-Tree + Hash + B-Tree по amount	178	+105 %

Результаты подтверждают, что каждый дополнительный индекс увеличивает латентность операций записи. При трёх индексах накладные расходы возрастают вдвое относительно конфигурации без индексов. Это обусловливает необходимость взвешенного подхода к числу индексов в OLTP-системах с высокой частотой записи [13].

XII. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Полученные экспериментальные данные позволяют сформулировать ряд практических рекомендаций для администраторов баз данных и разработчиков ИС [14].

1. B-Tree индекс следует рассматривать как инструмент первого выбора для столбцов, участвующих в предикатах WHERE, JOIN-условиях и ORDER BY. Его применение обосновано при селективности запроса выше 1–5 % (конкретный порог зависит от характеристик оборудования и параметра random_page_cost).
2. Hash-индекс целесообразен исключительно для рабочих нагрузок с преобладанием точечных запросов по равенству при гарантированно равномерном распределении ключей. В PostgreSQL 15 Hash-индекс незначительно быстрее B-Tree на точечных запросах (в нашем эксперименте – на 26 %), однако существенно проигрывает по универсальности.
3. Составные индексы (composite index) рекомендуется создавать с учётом принципа «leftmost prefix» [7]: столбцы с наибольшей селективностью помещаются на первую позицию. Это позволяет оптимизатору использовать индекс для частичного совпадения предиката.
4. Для OLTP-систем с высокой нагрузкой на запись следует минимизировать число индексов на горячих таблицах. Вместо нескольких одноколоночных индексов предпочтительнее один правильно спроектированный составной индекс.
5. Регулярный анализ pg_stat_user_indexes позволяет выявлять «мёртвые» индексы (idx_scan = 0), которые следует удалять, так как они потребляют дисковое пространство и замедляют DML-операции без каких-либо преимуществ для производительности запросов.
6. После значительных операций массовой загрузки данных (COPY, INSERT ... SELECT) рекомендуется выполнять ANALYZE для обновления статистики, на основе которой оптимизатор принимает решения о планах выполнения. Устаревшая статистика – частая причина выбора субоптимального плана [15].

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проведено комплексное исследование влияния индексирования на производительность SELECT-запросов в PostgreSQL. На тестовой базе данных из 100 000 записей установлено, что применение B-Tree индекса позволяет снизить время выполнения точечного запроса с высокой селективностью с 62,4 мс до 0,19 мс – ускорение более чем в 328 раз. Диапазонные запросы ускоряются в 8,9 раза; для запросов с низкой селективностью оптимизатор обоснованно отдаёт предпочтение последовательному сканированию.

Hash-индекс превосходит B-Tree на точечных запросах по равенству (~26 %), однако его применимость принципиально ограничена: он не поддерживает диапазонные запросы, сортировку и LIKE-предикаты. В большинстве реальных сценариев универсальность B-Tree делает его предпочтительным выбором.

Обслуживание индексов сопряжено с накладными расходами на DML-операции: при наличии трёх индексов время INSERT возрастает примерно вдвое относительно базового варианта. Это обусловливает необходимость балансировки между улучшением производительности чтения и замедлением записи.

Теоретическая значимость работы состоит в систематизации и количественной верификации теоретических положений об алгоритмической сложности индексных структур в условиях реального промышленного программного обеспечения. Практическая значимость заключается в получении воспроизводимых ориентировочных значений для принятия архитектурных решений при проектировании реляционных баз данных.

Перспективы дальнейших исследований: изучение составных и частичных (partial) индексов, сравнение производительности BRIN-индексов для временны́х рядов, анализ влияния параллельного выполнения запросов (Parallel Index Scan, Parallel Seq Scan) на

результаты, а также тестирование при объёмах данных от 10 до 100 миллионов записей.

ЛИТЕРАТУРА

[1] DB-Engines Ranking [Электронный ресурс]. – URL: https://db-engines.com/en/ranking (дата обращения: 12.05.2026).
[2] Ramakrishnan R., Gehrke J. Database Management Systems. – 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 2003. – 1065 p.
[3] Coronel C., Morris S. Database Systems: Design, Implementation, and Management. – 13th ed. – Boston: Cengage Learning, 2019. – 832 p.
[4] PostgreSQL Documentation 15. Chapter 11: Indexes [Электронный ресурс]. – URL: https://www.postgresql.org/docs/15/indexes.html (дата обращения: 12.05.2026).
[5] Bayer R., McCreight E. Organization and Maintenance of Large Ordered Indexes // Acta Informatica. – 1972. – Vol. 1. – P. 173–189.
[6] Comer D. The Ubiquitous B-Tree // ACM Computing Surveys. – 1979. – Vol. 11, No. 2. – P. 121–137.
[7] Graefe G. Modern B-Tree Techniques // Foundations and Trends in Databases. – 2011. – Vol. 3, No. 4. – P. 203–402.
[8] Lehman P. L., Yao S. B. Efficient Locking for Concurrent Operations on B-Trees // ACM Transactions on Database Systems. – 1981. – Vol. 6, No. 4. – P. 650–670.
[9] Momjian B. PostgreSQL: Introduction and Concepts. – New York: Addison-Wesley, 2001. – 461 p.
[10] Stonebraker M., Rowe L. A. The Design of Postgres // Proceedings of the 1986 ACM SIGMOD Conference. – New York: ACM, 1986. – P. 340–355.
[11] PostgreSQL Documentation 18: 9.26. Set Returning Functions [Электронный ресурс]. – URL: https://www.postgresql.org/docs/18/functions-srf.html (дата обращения: 12.05.2026).
[12] PostgreSQL Documentation 18: 9.3. Mathematical Functions and Operators [Электронный ресурс]. – URL: https://www.postgresql.org/docs/current/functions-math.html (дата обращения: 12.05.2026).
[13] Shasha D., Bonnet P. Database Tuning: Principles, Experiments, and Troubleshooting Techniques. – Amsterdam: Morgan Kaufmann, 2003. – 352 p.
[14] Кузнецов С. Д. Основы баз данных. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 484 с.
[15] Silberschatz A., Korth H. F., Sudarshan S. Database System Concepts. – 7th ed. – New York: McGraw-Hill, 2020. – 1376 p.

Информация об авторах

Писаренко Анастасия Алексеевна, бакалавр 4 курса кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем» Донского государственного технического университета (ДГТУ), г. Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: sstasitaa@gmail.com

Query Optimization in Relational Databases Using B-Tree Indexing

Anastasia A. Pisarenko

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

***Abstract* – The paper examines query optimization methods in relational databases through the application of index structures based on balanced trees (B-Trees). A comparative analysis of the main index types – B-Tree and Hash – is conducted from the perspective of algorithmic complexity, applicability, and operational limitations. A test database of 100,000 records was created, and SELECT queries with various predicates were executed both with and without indexes. The experimental results are presented in tabular form and analysed. It is established that B-Tree indexes reduce point-query execution time by more than 300 times compared to sequential table scans. Practical recommendations for choosing an indexing strategy for different query categories are formulated.**

Keywords – relational database, indexing, B-tree, hash index, query optimization, query execution plan, PostgreSQL, DBMS performance.

REFERENCES

[1] DB-Engines Ranking. [Online] – URL: https://db-engines.com/en/ranking (accessed: 12.05.2026).
[2] Ramakrishnan R., Gehrke J. Database Management Systems. – 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 2003. – 1065 p.
[3] Coronel C., Morris S. Database Systems: Design, Implementation, and Management. – 13th ed. – Boston: Cengage Learning, 2019. – 832 p.
[4] PostgreSQL Documentation 15. Chapter 11: Indexes. [Online] – URL: https://www.postgresql.org/docs/15/indexes.html (accessed: 12.05.2026).
[5] Bayer R., McCreight E. Organization and Maintenance of Large Ordered Indexes // Acta Informatica. – 1972. – Vol. 1. – P. 173–189.
[6] Comer D. The Ubiquitous B-Tree // ACM Computing Surveys. – 1979. – Vol. 11, No. 2. – P. 121–137.
[7] Graefe G. Modern B-Tree Techniques // Foundations and Trends in Databases. – 2011. – Vol. 3, No. 4. – P. 203–402.
[8] Lehman P. L., Yao S. B. Efficient Locking for Concurrent Operations on B-Trees // ACM Transactions on Database Systems. – 1981. – Vol. 6, No. 4. – P. 650–670.
[9] Momjian B. PostgreSQL: Introduction and Concepts. – New York: Addison-Wesley, 2001. – 461 p.
[10] Stonebraker M., Rowe L. A. The Design of Postgres // Proceedings of the 1986 ACM SIGMOD Conference. – New York: ACM, 1986. – P. 340–355.
[11] PostgreSQL Documentation 18: 9.26. Set Returning Functions [Online] – URL: https://www.postgresql.org/docs/18/functions-srf.html (accessed: 12.05.2026).
[12] PostgreSQL Documentation 18: 9.3. Mathematical Functions and Operators [Online] – URL: https://www.postgresql.org/docs/current/functions-math.html (accessed: 12.05.2026).
[13] Shasha D., Bonnet P. Database Tuning: Principles, Experiments, and Troubleshooting Techniques. – Amsterdam: Morgan Kaufmann, 2003. – 352 p.
[14] Kuznetsov S. D. Database Fundamentals. – 2nd ed. – Moscow: Internet-University of Information Technologies; BINOM. Laboratory of Knowledge, 2007. – 484 p. (In Russian).
[15] Silberschatz A., Korth H. F., Sudarshan S. Database System Concepts. – 7th ed. – New York: McGraw-Hill, 2020. – 1376 p.

Information about authors

Anastasia Alekseevna Pisarenko, 4th-year bachelor's student, Department of Software for Computer Engineering and Automated Systems, Don State Technical University (DSTU), Rostov-on-Don, Russia, e-mail: sstasitaa@gmail.com

Разработка предметной онтологической модели системы управления рыбохозяйственным комплексом

А.С. Ситникова, Н.П. Ганюкова

Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

Аннотация **– в статье рассматривается построение семантической модели системы управления рыбохозяйственным комплексом в форме предметной онтологии. Модель отражает ключевые термины предметной области, процессы, отношения и атрибуты. В среде OntoStudio определены классы и их параметрические формализации, визуализирована онтологическая схема. Особое внимание уделено ИТ-компонентам: модулям информационной системы, информационным объектам, электронным отчетам и их связи с бизнес-процессами. Для проверки модели сформированы запросы, демонстрирующие автоматизацию учета кормления, обработку данных вылова и формирование отчета по реализации. Полученная онтология может использоваться как концептуальная архитектура представления знаний о системе управления рыбохозяйственным комплексом, с целью исследования и разработки соответствующей научной методики.**

Ключевые слова **– онтология, онтологическая модель, семантическая модель, бизнес-процесс, OntoStudio, рыбохозяйственный комплекс, информационная система.**

ВВЕДЕНИЕ

Рыбохозяйственный комплекс представляет собой совокупность взаимосвязанных производственных, технологических, учетных и управленческих процессов, обеспечивающих выращивание, вылов, переработку, хранение, транспортировку и реализацию рыбной продукции. В деятельности такого комплекса одновременно используются сведения о биологических объектах, партиях рыбы, ресурсах, оборудовании, производственных объектах, персонале, качестве продукции и результатах реализации.

Современное развитие аквакультуры связано с расширением применения цифровых средств мониторинга, автоматизации и аналитики. В актуальных исследованиях подчеркивается необходимость объединения разнородных данных и построения информационной поддержки производственных процессов [1–4]. При этом сведения, относящиеся к одному объекту или процессу, могут формироваться различными подразделениями и информационными компонентами, что приводит к семантической неоднозначности и затрудняет интеграцию данных. Одним из способов формирования единого понятийного пространства является онтологический подход. Онтология позволяет формализовать понятия предметной области, их свойства и отношения, а также обеспечить машинно-обрабатываемое представление знаний. Подобные модели применяются при построении графов знаний и интеллектуальных систем, в том числе в задачах поддержки решений в аквакультуре [5–8].

Целью настоящей работы является разработка онтологической модели информационной системы управления рыбохозяйственным комплексом, объединяющей предметные сущности, бизнес-процессы и компоненты их информационной поддержки.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для достижения поставленной цели необходимо сформировать иерархию понятий рыбохозяйственного комплекса, определить характеристики объектов и семантические отношения между ними, а также выделить ИТ-компоненты, обеспечивающие автоматизацию деятельности. Модель должна описывать выращивание, кормление, вылов, переработку, хранение, транспортировку и реализацию, процессы ветеринарного и лабораторного контроля, учет рыбы, кормления, вылова, переработки, складских операций и реализации.

В отличие от модели, ограниченной только предметными объектами, разрабатываемая онтология должна отражать информационную систему, ее функциональные модули, информационные объекты, электронные отчеты и роли пользователей. Это дает возможность определить, каким модулем автоматизируется конкретный процесс, какие цифровые данные используются и какой информационный результат формируется.

Проверка корректности онтологии выполняется посредством запросов OntoStudio. В рамках исследования требуется получить результаты, подтверждающие три типа связей: автоматизацию бизнес-процесса, обработку информационного объекта и формирование электронного отчета.

II. ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА

Разрабатываемая онтология представляется совокупностью терминов предметной области, отношений и свойств. Формально модель рыбохозяйственного комплекса задается выражением:

$$O_{FC} = \langle C, R, P, In_c \rangle, \quad (1)$$

где C – множество терминов и концептов предметной области; R – множество семантически значимых отношений между объектами; P – множество свойств, используемых для описания объектов онтологии; In_c – множество экземпляров, принадлежащих классам онтологической модели.

A. Терминологическая база и иерархия классов

На первом этапе были выделены основные группы понятий, характеризующие рыбохозяйственный комплекс. Процессная часть модели представлена классом «Бизнес-процесс», включающим контрольные, производственные и учетные процессы. Производственные процессы охватывают аквакультуру, выращивание, инкубацию, кормление, вылов, переработку, хранение, транспортировку и реализацию. Контрольный блок включает ветеринарный и лабораторный контроль, контроль воды и качества продукции. К учетным процессам относятся учет рыбы, кормления, вылова, переработки, складской учет и учет реализации. Предметные объекты представлены 105 классами, описывающими основные элементы рыбохозяйственного комплекса, его процессы и компоненты информационной системы. Шесть ключевых классов онтологической модели представлены в Табл. I.

ТАБЛИЦА I
ОСНОВНЫЕ КЛАССЫ ОНТОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Класс	Назначение
Бизнес-процесс	Производственные, контрольные, учетные процессы
Биологический объект	Рыба и партии рыбы
Документ	Ветеринарный, производственный документ, электронные отчеты, документы качества и реализации
Производственный объект	Пруд, УЗВ, цех, лаборатория
Информационный объект	Цифровые записи, карточки партий рыбы
Модуль информационной системы	Функциональные компоненты ИС

B. Атрибуты, отношения и экземпляры

Для классов заданы атрибуты с типами данных и ограничениями кратности. Например, информационная система характеризуется наименованием, версией и разработчиком; модуль информационной системы – наименованием, назначением и функцией; информационный объект – идентификатором записи, датой создания и статусом; бизнес-процесс – наименованием, описанием и статусом. Ключевые атрибуты ИТ-компонентов представлены в Табл. II.

ТАБЛИЦА II
ОСНОВНЫЕ АТРИБУТЫ ИТ-КОМПОНЕНТОВ

Класс	Атрибут	Тип
Информационная система	НаименованиеСистемы	string
Информационная система	Версия	string
Информационная система	Разработчик	string
Модуль ИС	НаименованиеМодуля	string
Модуль ИС	ФункцияМодуля	string
Модуль ИС	Назначение	string
Информационный объект	ИдентификаторЗаписи	string
Информационный объект	ДатаСоздания	date
Информационный объект	СтатусЗаписи	string
Бизнес процесс	НаименованиеПроцесса	string
Бизнес процесс	ОписаниеПроцесса	string
Бизнес процесс	СтатусПроцесса	string

Семантические отношения связывают предметные процессы с программными компонентами. Наиболее важными для ИТ-уровня являются отношения «АвтоматизируетПроцесс», «ВходитВСистему», «Обрабатывает» и «ФормируетОтчет». Их назначение представлено в Табл. III.

ТАБЛИЦА III
ОСНОВНЫЕ ОТНОШЕНИЯ ОНТОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Отношение	Назначение
АвтоматизируетПроцесс	Связывает модуль ИС с автоматизируемым процессом
ВходитВСистему	Определяет принадлежность модуля информационной системе
Обрабатывает	Связывает модуль ИС с информационным объектом
ФормируетОтчет	Связывает модуль Ис с электронным отчетом
ОписываетПартию	Связывает карточку с партией рыбы

В онтологии созданы конкретные экземпляры. Для информационной системы сформирован объект «ИС_РыбохозяйственныйКомплекс». Для модулей созданы экземпляры «МодульУчетаРыбы_001», «МодульКормления_001», «МодульВылова_001», «МодульПереработки_001», «МодульКонтроля_001», «МодульСклада_001», «МодульРеализации_001» и

«АналитическийМодуль_001». Информационные объекты представлены карточкой партии рыбы и записями кормления, вылова, переработки, контроля, складского учета и реализации.

С. Цепочки взаимодействия между узлами онтологической модели

Для отражения взаимодействия между объектами онтологии отдельные отношения объединяются в функциональные цепочки. Они позволяют проследить связи информационной системы с модулями, бизнес-процессами, информационными объектами и отчетами.

Для процесса учета кормления модуль «МодульКормления_001», входящий в состав «ИС_РыбохозяйственныйКомплекс», автоматизирует процесс «УчетКормления_001» и обрабатывает информационный объект «ЗаписьКормления_001», который связан с процессом «Кормление». По результатам обработки данных модулем формируется «ОтчетПоКормлению_001». Таким образом, в рамках одной функциональной цепочки объединяются бизнес-процесс, его цифровое представление, программный модуль и отчетный результат.

Аналогичным образом построено взаимодействие при учете вылова. Модуль «МодульВылова_001» входит в состав информационной системы, автоматизирует процесс «УчетВылова_001», обрабатывает объект «ЗаписьВылова_001», связанный с процессом «Вылов», и формирует «ОтчетПоВылову_001».

Для процесса реализации модуль «МодульРеализации_001» связан с информационной системой и процессом «УчетРеализации_001». Модуль обрабатывает «ЗаписьРеализации_001» и по результатам обработки формирует «ОтчетПоРеализации_001».

Отдельная цепочка характеризует учет биологических объектов. Модуль «МодульУчетаРыбы_001», входящий в состав информационной системы, обрабатывает «КарточкаПартии_001», которая посредством отношения «ОписываетПартию» связана с экземпляром «ПартияКарпа_001». За счет этого обеспечивается связь между цифровым объектом информационной системы и соответствующим объектом предметной области.

Представленные цепочки показывают, что узлы онтологической модели связаны не только отдельными отношениями, но и образуют последовательные маршруты взаимодействия, отражающие автоматизацию процессов и движение информации в системе управления рыбохозяйственным комплексом.

Построение классов, экземпляров, атрибутов и отношений выполнено в среде OntoStudio. Общая визуализация разработанной онтологии приведена на Рис. 1.

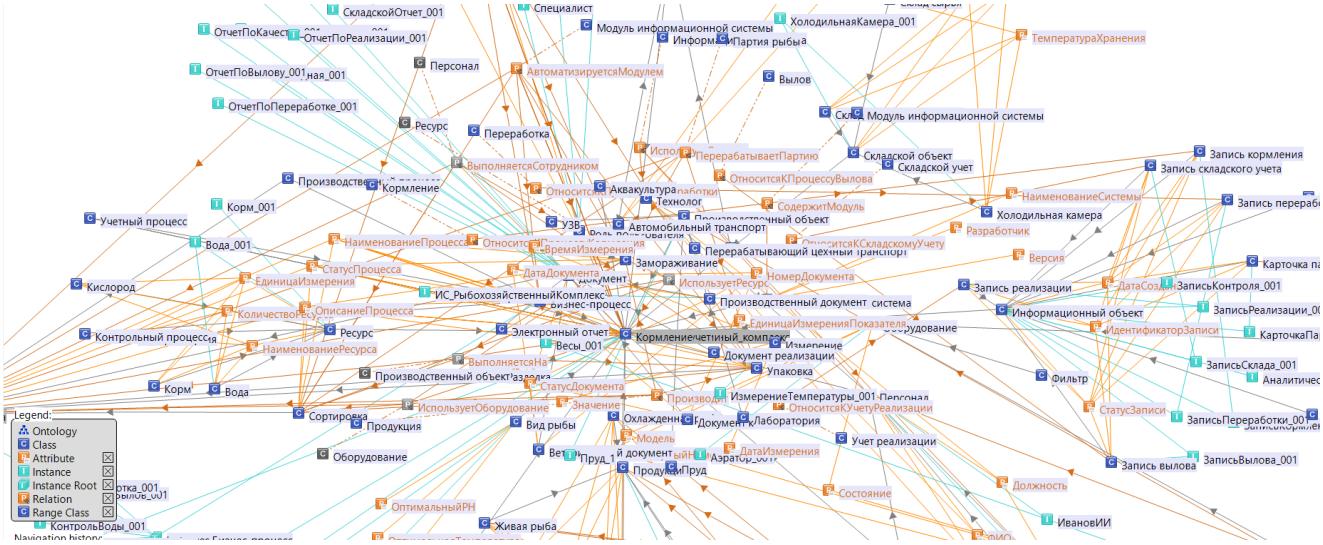


Рис. 1. Онтологическая модель информационной системы управления рыбохозяйственным комплексом

III. ПРОВЕРКА МОДЕЛИ С ПОМОЩЬЮ ЗАПРОСОВ

Для проверки корректности семантических связей в OntoStudio сформированы три запроса. Первый «АвтоматизацияКормления» определяет модуль, автоматизирующий процесс учета кормления. Ограничение задается по атрибуту «НаименованиеПроцесса = Учет кормления». В результате получены экземпляры «УчетКормления_001» и «МодульКормления_001» (Рис. 2).

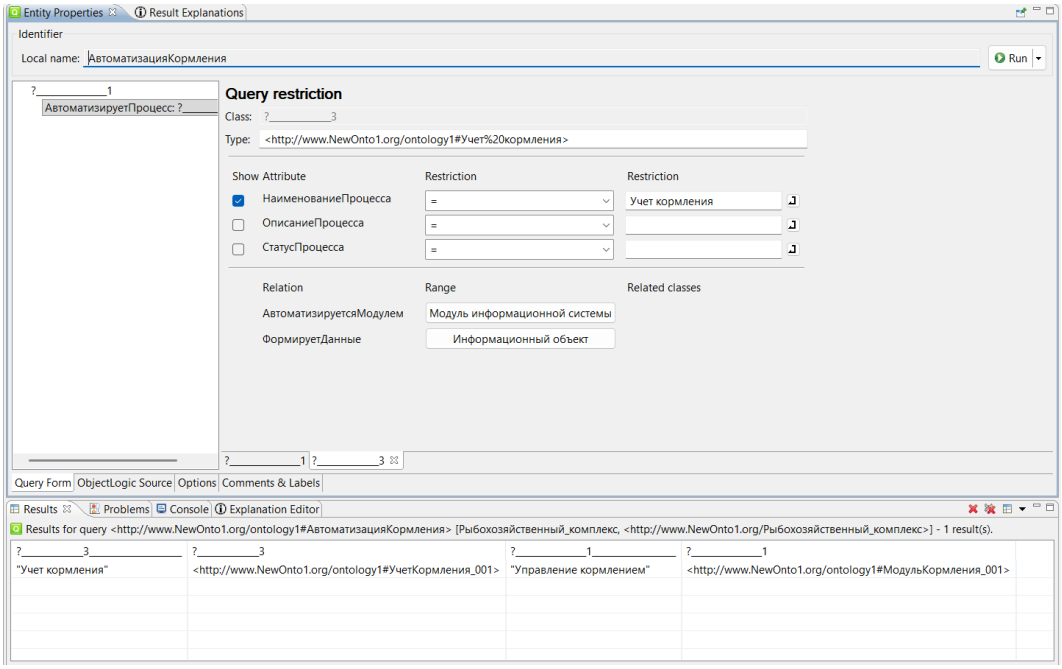


Рис. 2. Результат выполнения запроса «АвтоматизацияКормления»

Второй запрос «ОбработкаДанныхВылова» проверяет отношение «Обрабатывает» между модулем вылова и информационным объектом. Для связанного класса «Запись вылова» используется ограничение «ИдентификаторЗаписи = ВЫЛ-001». В результате найдены экземпляры «МодульВылова_001» и «ЗаписьВылова_001» (Рис. 3).

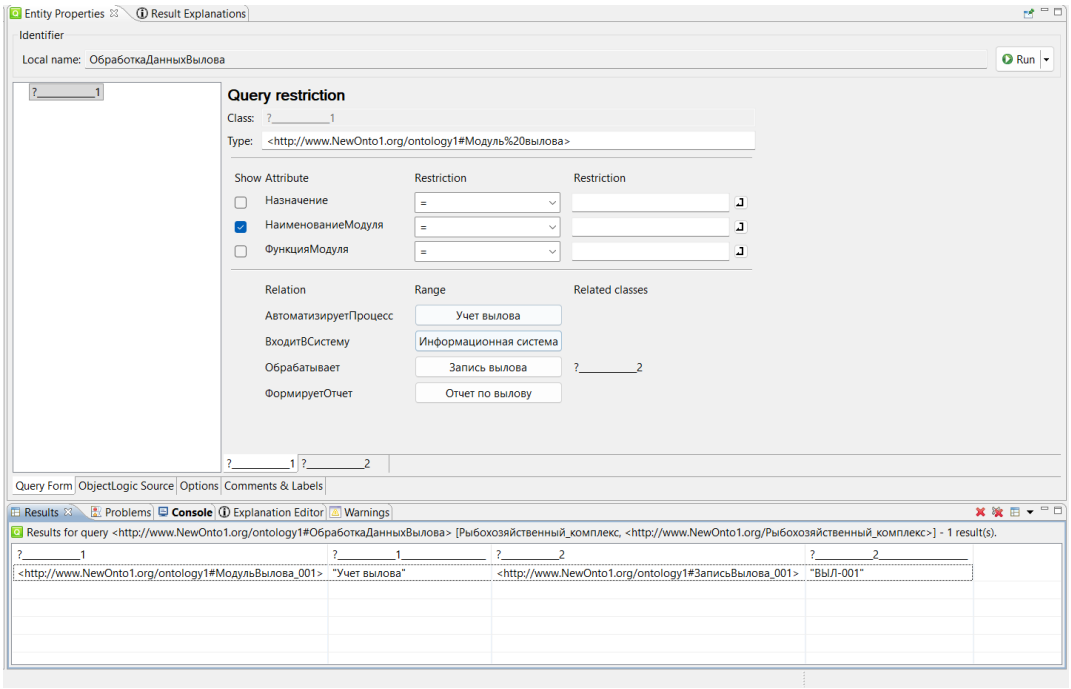


Рис. 3. Результат выполнения запроса «ОбработкаДанныхВылова»

Третий запрос «ФормированиеОтчетаПоРеализации» используется для проверки отношения «ФормируетОтчет». Связанным классом является «Отчет по реализации», а в качестве ограничения задается номер документа «ОТЧ-РЕАЛ-001».

Результат подтверждает связь экземпляров «МодульРеализации_001» и «ОтчетПоРеализации_001» (Рис. 4).

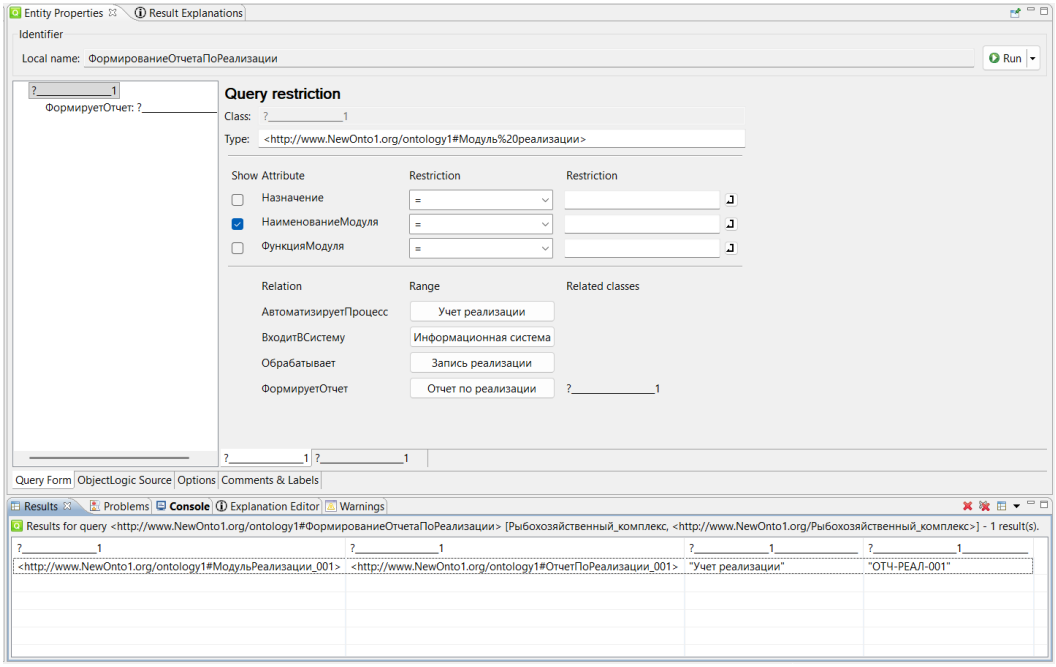


Рис. 4. Результат выполнения запроса «ФормированиеОтчетаПоРеализации»

IV. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разработанная онтология объединяет три уровня описания: предметные объекты рыбохозяйственного комплекса, бизнес-процессы и средства их информационной поддержки. За счет такого разделения модель позволяет проследить переход от реальной операции к ее цифровому представлению и далее к программному модулю и отчетному результату.

Полученные результаты запросов подтверждают работоспособность ключевых связей. Запрос по кормлению демонстрирует автоматизацию учетного процесса, запрос по вылову – обработку цифрового информационного объекта, а запрос по реализации – формирование электронного отчета. Тем самым ИТ-компоненты включены в онтологию не как изолированный набор классов, а как элементы, связанные с процессами предметной области.

Практическое значение модели состоит в возможности использовать единое понятийное пространство при дальнейшем проектировании информационной системы. Онтология может служить основой для согласования терминов, структуры данных, состава функциональных модулей и аналитических сценариев. Подобный подход соответствует современному направлению цифровизации аквакультуры и развитию семантических моделей знаний [2, 5, 6].

Ограничением текущей версии является исследовательский характер модели. В дальнейшем целесообразно расширить состав экземпляров, включить нормативно-справочную информацию, показатели эффективности и правила логического вывода (SWRL, SPARQL-конструкции и др.), а также связать онтологию с данными реальной информационной системы.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана онтологическая модель информационной системы управления рыбохозяйственным комплексом, объединяющая предметные объекты, производственные, контрольные и учетные процессы.
2. В модель включен ИТ-уровень, содержащий информационную систему, функциональные модули, информационные объекты, электронные отчеты и роли пользователей.
3. В среде OntoStudio сформированы классы, подклассы, атрибуты, отношения и экземпляры, а также проверены связи «АвтоматизируетПроцесс», «Обрабатывает» и «ФормируетОтчет».
4. Дальнейшее развитие работы целесообразно связать с расширением предметной модели, добавлением правил логического вывода и интеграцией онтологии с данными проектируемой информационной системы.

ЛИТЕРАТУРА

[1] FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2026. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2026.
[2] Ивашко Е. Е., Коновальчикова Е. Н., Ивашко В. С. Таксономия задач математического моделирования в аквакультуре // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2025. № 2. С. 74–82. DOI: 10.24143/2073-5529-2025-2-74-82. EDN: CTFNJX.
[3] Гетманов Г. Г., Ломовцева Н. В. Цифровизация как основа аквакультуры // Обеспечение технологического суверенитета АПК: подходы, проблемы, решения: сборник научных трудов Юбилейной Международной научно-практической конференции, 13–14 марта 2025 г. Екатеринбург: Изд-во Уральского ГАУ, 2026. С. 176–177.
[4] Ганюкова, Н.П. Процессное управление системами корпоративного типа / Н.П. Ганюкова, А.А. Ханова // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – № 3(57). Выпуск 1. – С. 235 – 241.

[5] Кравченко Д. Ю. Модель онтологии знаний для интеллектуальных систем обработки и анализа текстов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2024. № 2. С. 38–50. DOI: 10.18522/2311-3103-2024-2-38-50. eLIBRARY ID: 68020566.
[6] Pham T.T.T., Can P.T., Ha N.T.T. Ontology-Based Decision Support System for Improving Aquaculture Management // Journal of Marine Science and Technology. 2026. Vol. 34, Iss. 2. Art. 1. DOI: 10.51400/2709-6998.2820.
[7] Заякин В. С., Лядова Л. Н., Рабчевский Е. А. Онтологический подход к интеграции информации в областях с интенсивным использованием данных // Информационные технологии. 2022. Т. 28. № 10. С. 529–538. DOI: 10.17587/it.28.529-538.
[8] Егоркин А. А., Самойлов С. Ю., Евстигнеев В. П. Универсальная онтологическая модель системы мониторинга окружающей среды // Системы контроля окружающей среды. 2024. № 3. С. 33–46. DOI: 10.33075/2220-5861-2024-3-33-46. EDN: FVAZVD.
[9] Свиридова Е. В., Коган М. В., Никулина Т. Н., Арсланова Э. Р. Особенности цифровизации рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации в современных условиях // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика. 2025. № 3. С. 92–100. DOI: 10.24143/2073-5537-2025-3-92-100. EDN: RLBPET.
[10] Ганюкова, Н.П. Построение формализованной семантической модели знаний предприятия корпоративной структуры в форме предметной онтологии / Н.П. Ганюкова, В.Ф. Шуршев // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2007. – №6. – С. 166 – 169.

Информация об авторах

Ситникова Ангелина Сергеевна, студент Астраханского государственного технического университета, Астрахань, Россия, e-mail: gelatusheva@gmail.com

Ганюкова Наталья Павловна, кандидат технических наук, Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия, e-mail: gannatasha@yandex.ru

Development of an ontological model of an information system for managing a fishery complex

Angelina S. Sitnikova, Natalia P. Ganyukova

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

***Abstract* – The article considers the development of a semantic model of a fishery complex management system in the form of a domain ontology. The model represents the key domain terms, processes, relations, and attributes. Classes and their parametric formalizations are defined in the OntoStudio environment, and the ontological schema is visualized. Particular attention is paid to IT components, including information system modules, information objects, electronic reports, and their relationships with business processes. To validate the model, a set of queries was developed to demonstrate the automation of feeding accounting, the processing of harvesting data, and the generation of a sales report. The resulting ontology can be used as a conceptual architecture for representing knowledge about a fishery complex management system for the purpose of research and development of an appropriate scientific methodology.**

***Keywords* – ontology, ontological model, semantic model, business process, OntoStudio, fishery complex, information system.**

REFERENCES

[1] FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2026. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2026.
[2] Ivashko E. E., Konoval'chikova E. N., Ivashko V. S. Taksonomiya zadach matematicheskogo modelirovaniya v akvakul'ture // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe hozyajstvo. 2025. № 2. P. 74–82. DOI: 10.24143/2073-5529-2025-2-74-82. EDN: CTFNJX.
[3] Getmanov G. G., Lomovceva N. V. Cifrovizaciya kak osnova akvakul'tury // Obespechenie tekhnologicheskogo suvereniteta APK: podhody, problemy, resheniya: sbornik nauchnyh trudov YUbilejnoj Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, 13–14 marta 2025 g. Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo GAU, 2026. P. 176–177.
[4] Ganyukova, N.P. Processnoe upravlenie sistemami korporativnogo tipa / N.P. Ganyukova, A.A. Hanova // Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2011. – № 3(57). Vypusk 1. – P. 235 – 241.
[5] Kravchenko D. YU. Model' ontologii znanij dlya intellektual'nyh sistem obrabotki i analiza tekstov // Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki. 2024. № 2. P. 38–50. DOI: 10.18522/2311-3103-2024-2-38-50. eLIBRARY ID: 68020566.
[6] Pham T.T.T., Can P.T., Ha N.T.T. Ontology-Based Decision Support System for Improving Aquaculture Management // Journal of Marine Science and Technology. 2026. Vol. 34, Iss. 2. Art. 1. DOI: 10.51400/2709-6998.2820.
[7] Zayakin V. S., Lyadova L. N., Rabchevskij E. A. Ontologicheskij podhod k integracii informacii v oblastyah s intensivnym ispol'zovaniem dannyh // Informacionnye tekhnologii. 2022. Vol. 28. № 10. P. 529–538. DOI: 10.17587/it.28.529-538.
[8] Egorkin A. A., Samojlov S. YU., Evstigneev V. P. Universal'naya ontologicheskaya model' sistemy monitoringa okruzhayushchej sredy // Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy. 2024. № 3. P. 33–46. DOI: 10.33075/2220-5861-2024-3-33-46. EDN: FVAZVD.
[9] Sviridova E. V., Kogan M. V., Nikulina T. N., Arslanova E. R. Osobennosti cifrovizacii rybohozyajstvennogo kompleksa Rossijskoj Federacii v sovremennyh usloviyah // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Ekonomika. 2025. № 3. P. 92–100. DOI: 10.24143/2073-5537-2025-3-92-100. EDN: RLBPET.
[10] Ganyukova, N.P. Postroenie formalizovannoj semanticheskoj modeli znanij predpriyatiya korporativnoj struktury v forme predmetnoj ontologii / N.P. Ganyukova, V.F. SHurshev // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2007. – №6. – P. 166 – 169.

Information about the authors

Angelina S. Sitnikova, student, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, e-mail: gelatusheva@gmail.com

Natalia P. Ganyukova, Candidate of Technical Sciences, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, e-mail: gannatasha@yandex.ru

Интеллектуально-информационная система управления стоимостью ИТ-проектов

Э.И. Дукаева, Н.П. Ганюкова

Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

Аннотация **– В статье рассматривается разработка интеллектуальной информационной системы управления стоимостью ИТ-проектов. Исходной основой является действующая в компании-франчайзи 1С информационная система, предназначенная для параметрического планирования трудозатрат разработки, назначения исполнителей, расчета себестоимости разработки, учета фактических трудозатрат и выполнения план-фактного анализа. Недостатком существующего решения является то, что оно не позволяет получить оценку полной стоимости проекта с учетом всех этапов жизненного цикла. Для решения данной задачи исходная система параметрического расчёта трудоёмкости разработки дополнена экономико-математической моделью на основе исторических данных завершённых проектов, позволяющей рассчитывать ожидаемую и консервативную оценку полной стоимости проекта. В систему интегрирован ИИ-помощник для анализа описания проекта, проверки полноты расчёта и формирования рекомендаций.**

Ключевые слова **– ИТ-проект, оценка стоимости, трудозатраты, экономико-математическая модель, искусственный интеллект.**

ВВЕДЕНИЕ

Оценка трудозатрат является одним из ключевых процессов управления ИТ-проектом. От ее точности зависят стоимость работ, сроки выполнения, загрузка исполнителей и экономическая эффективность проекта. В ИТ- сфере данная задача осложняется тем, что предварительная оценка часто выполняется на раннем этапе, когда требования заказчика еще не полностью определены [1–2].

В компании-франчайзи 1С ООО "Бест Плюс" используется информационная система на платформе "1С:Предприятие", предназначенная для планирования и учета трудозатрат при выполнении ИТ-проектов. В рамках действующего решения автоматизирован параметрический расчет трудоемкости разработки на основании состава объектов конфигурации, их параметров и установленных нормативов. На основании рассчитанных трудозатрат, ставок исполнителей и планового состава работ определяется себестоимость разработки. Система также обеспечивает назначение исполнителей, учет фактических трудозатрат и проведение план-фактного анализа. Существующий расчет в основном характеризует этап разработки. При подготовке коммерческого предложения оценка остальных этапов жизненного цикла проекта, включая обследование, проектирование, тестирование, подготовку к опытной эксплуатации и опытную эксплуатацию, в значительной степени зависит от экспертных оценок. Кроме того, накопленные данные завершенных проектов не используются в качестве формализованной основы для корректировки расчетных значений, а возможность формирования нескольких сценариев оценки с учетом неопределенности исходных требований отсутствует. Текущий процесс оценки представлен на диаграмме AS-IS на Рис. 1.

В рамках работы предлагается доработать существующую систему: дополнить расчет полной стоимости проекта с учетом этапов жизненного цикла, использовать исторические данные завершенных проектов для корректировки оценки и предусмотреть два сценария расчета: ожидаемый и консервативный. Дополнительным элементом решения является ИИ-помощник, предназначенный для анализа результатов оценки и формирования рекомендаций. Предлагаемый подход к оценке стоимости ИТ-проектов представлен на диаграмме TO-BE на Рис. 2. Целью данной работы является повышение эффективности оценки трудозатрат путём доработки существующей информационной системы управления стоимостью ИТ-проектов с обеспечением расчета ожидаемой и консервативной оценки полной стоимости, а также внедрения ИИ-помощника для формирования обоснованных рекомендаций.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В существующей системе автоматизирован расчет трудозатрат и себестоимости этапа разработки. Система не решает следующие задачи:

- оценка полной стоимости проекта с учётом всех этапов жизненного цикла;
- учёт неопределённости требований; использование исторических данных для прогнозирования;
- формирование ожидаемой и консервативной оценки.

Расчет ограничен этапом разработки и не учитывает остальные этапы жизненного цикла проекта.

На основе анализа предметной области сформулированы требования к программному решению:

- расчет полной трудоемкости проекта с учетом основных этапов жизненного цикла;
- расчет ожидаемой и консервативной оценку трудоемкости и стоимости проекта;
- применение и хранение коэффициентов модели, рассчитанных на основании исторических данных;
- расчет себестоимости и коммерческой стоимости проекта и предоставление пользователю расшифровки расчета по этапам проекта.

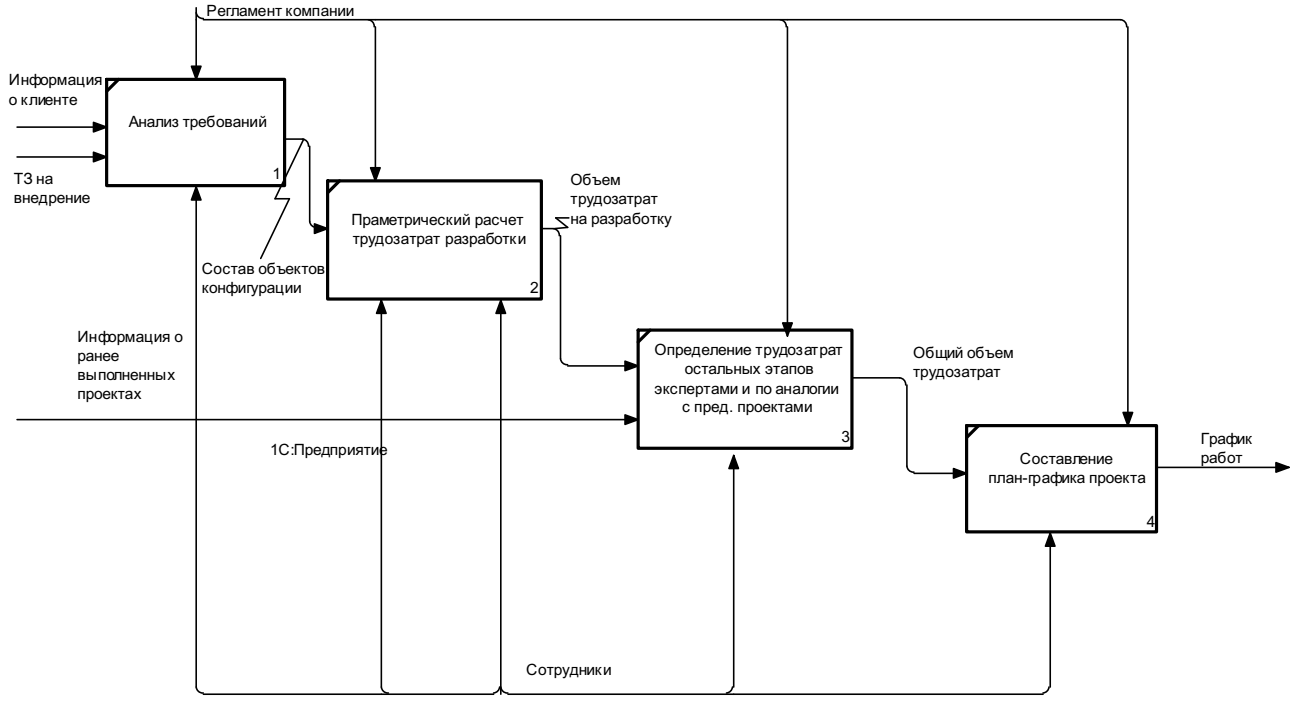


Рис. 1. Модель действующего процесса оценки стоимости ИТ-проекта

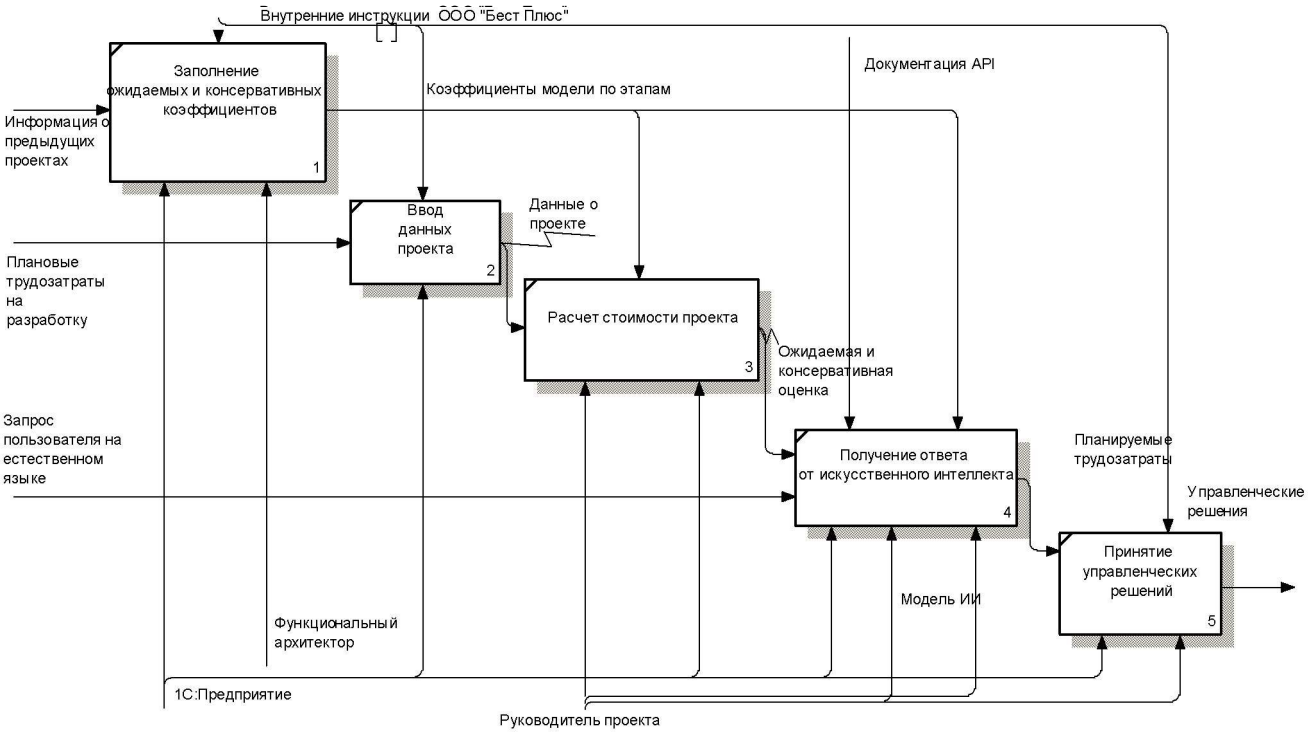


Рис. 2. Модель предлагаемого процесса оценки стоимости ИТ-проекта

II. АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ

A. Модель оценки полной стоимости ИТ-проекта

В основе модели лежит базовая трудоемкость разработки H_{dev}^{0} , рассчитанная параметрическим способом. Для перехода от оценки разработки к полной оценке проекта используются коэффициенты, полученные на основе исторических данных завершенных проектов ООО "Бест Плюс".

Для формирования коэффициентов использована выборка из 20 завершенных ИТ-проектов, реализованных компанией при разработке и сопровождении решений на платформе 1С:Предприятие. Для каждого проекта учитывались расчетная трудоемкость разработки, фактические трудозатраты и трудоемкость отдельных этапов жизненного цикла.

Для определения отклонения фактической трудоемкости разработки от первоначальной оценки для каждого проекта рассчитывался индивидуальный коэффициент:

$$K_{\text{l}} = \frac{H_{dev,\text{l}}^{fact}}{H_{dev,\text{l}}^{0}}, \tag{1}$$

где $H_{dev,l}^{fact}$ – фактические трудозатраты разработки *i*-го проекта, чел.-часы; $H_{dev,l}^{0}$ – первоначально рассчитанная трудоемкость разработки *i*-го проекта, чел.-часы.

Среднее значение коэффициента по выборке [3] определяется следующим образом:

$$K_{cal} = \frac{1}{L}\sum_{l=1}^{L} \text{K}_{l,} \tag{2}$$

где *L*=20 - количество проектов в выборке.

В результате обработки исторических данных получено среднее значение коэффициента корректировки расчетной трудоемкости разработки $K_{cal} = 1{,}04$. Это означает, что фактическая трудоемкость разработки в среднем на 4% превышала первоначальную расчетную оценку. Стандартное отклонение коэффициента составило $\sigma_{\text{dev}} = 0{,}09$.

Для учета неопределенности при формировании консервативного сценария использовано *t* – распределение Стьюдента [4].

При уровне доверия $\alpha = 0{,}8$ и числе степеней свободы $\nu = 19$: $t_{0{,}8;19} \approx 0{,}861$). На этой основе получен консервативный коэффициент корректировки разработки $K_{cal}^{R} = 1{,}12$.

Полученные значения коэффициентов являются результатом статистической обработки исторических данных завершенных проектов. Достоверность оценки ограничена объемом доступной выборки, поэтому в модели дополнительно применяется консервативный сценарий, учитывающий верхнюю границу интервала оценки.

Для остальных этапов жизненного цикла коэффициенты определялись по данным завершенных проектов как отношение фактической трудоемкости соответствующего этапа к фактической трудоемкости разработки:

$$k_{\text{s,l}} = \frac{H_{\text{s,l}}^{fact}}{H_{dev,\text{l}}^{fact}}, \tag{3}$$

где $H_{s,l}^{fact}$ - фактическая трудоемкость этапа *s* *l*-го проекта, чел.-часы; $H_{dev,l}^{fact}$ - фактическая трудоемкость разработки *l*-го проекта, чел.-часы.

Среднее значение коэффициента каждого этапа рассчитывалось по всем проектам, в которых соответствующий этап был выполнен. Полученные значения представлены в Табл. I.

Полученные значения показывают, что, например, средняя фактическая трудоемкость обследования составляет 16% от фактической трудоемкости разработки, проектирования – 12%, тестирования – 20%, подготовки к опытной эксплуатации – 15%, опытной эксплуатации – 10%.

ТАБЛИЦА I
СРЕДНИЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ТРУДОЕМКОСТИ ЭТАПОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИТ-ПРОЕКТА

Этап	Средний коэффициент
Обследование	0,16
Проектирование	0,12
Тестирование	0,20
Подготовка к опытной эксплуатации	0,15
Опытная эксплуатация	0,10

Ожидаемая полная трудоемкость проекта рассчитывается по формуле (4):

$$H_{total}^{E} = H_{dev}^{0} \times K_{cal} \times \left(1 + \sum_{s\in \text{S}} K_s\right), \tag{4}$$

где H_{total}^{E} - ожидаемая полная трудоемкость ИТ-проекта, чел.-часы; H_{dev}^{0} – базовая расчетная трудоемкость разработки, чел.-часы; K_{cal} = 1,04 – средний коэффициент корректировки трудоемкости разработки; K_s – средний коэффициент трудоемкости этапа *s*; S – множество этапов жизненного цикла проекта, исключая разработку.

Коэффициент корректировки разработки применяется непосредственно к базовой трудоемкости, поскольку характеризует отклонение фактических затрат разработки от первоначальной оценки. Коэффициенты остальных этапов отражают их трудоемкость относительно разработки и поэтому используются как дополнительные составляющие полной трудоемкости.

Консервативная полная трудоемкость проекта рассчитывается аналогично:

$$H_{total}^{R} = H_{dev}^{0} \times K_{cal}^{R} \times \left(1 + \sum_{s\in \text{S}} K_s^{R}\right), \tag{5}$$

где H_{total}^{R} – консервативная полная трудоемкость ИТ-проекта, чел.-часы; K_{cal}^{R} – консервативный коэффициент корректировки трудоемкости разработки; K_s^{R} – консервативный коэффициент этапа *s*, определяемый с учетом верхней границы соответствующего интервала оценки.

Полученные коэффициенты характеризуют специфику реализуемых ООО "Бест Плюс" ИТ-проектов и могут уточняться по мере накопления новых наблюдений.

B. Логическая модель данных системы

Структура элементов системы представлена в наглядной форме с помощью ER-диаграммы на Рис. 3 [5-6].

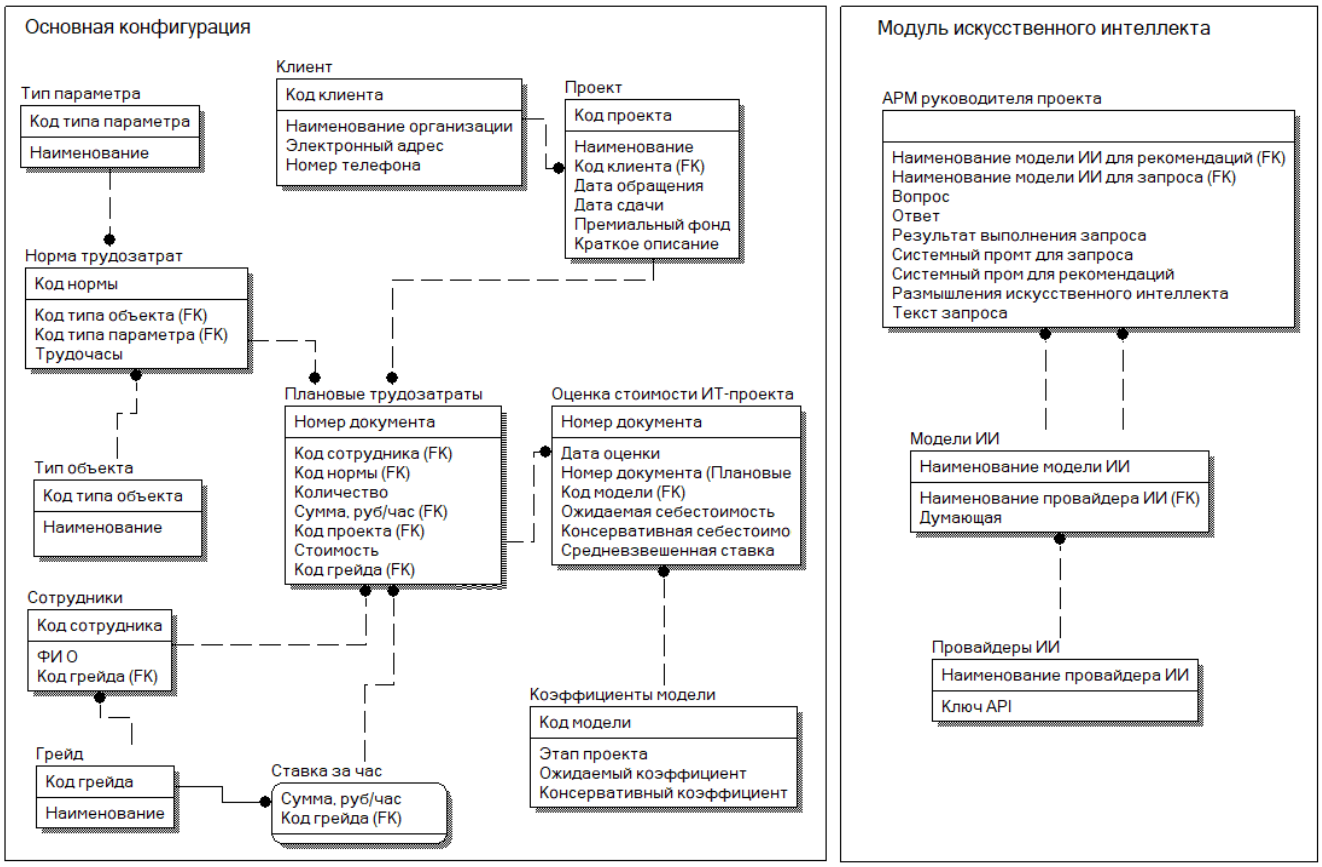


Рис. 3. Логическая модель данных системы управления стоимостью ИТ-проектов

Логическая модель данных включает основную конфигурацию и модуль ИИ. В основной конфигурации хранятся справочники (типы объектов, параметры, сотрудники, грейды, ставки), регистр нормативов трудоёмкости и документы (плановые трудозатраты, оценка стоимости). В модуле ИИ - провайдеры, модели, настройки промптов и история обращений. Центральным документом является «Оценка стоимости ИТ-проекта», который содержит ссылку на плановые трудозатраты, ожидаемую и консервативную себестоимость, а также расшифровку по этапам.

C. Алгоритм работы системы

Для описания последовательности взаимодействия пользователей и компонентов системы разработана диаграмма последовательности UM (Unified Modeling Language - унифицированный язык моделирования), представленная на Рис. 4 [7-9].

Диаграмма отражает взаимодействие между руководителем проекта, документами системы, регистром коэффициентов и модулем искусственного интеллекта. Алгоритм включает следующие этапы:

1. Руководитель проекта выбирает в системе из списка доступных проектов проект, для которого выполняется оценка стоимости и документ «Плановые трудозатраты».
2. Система обращается к регистру коэффициентов и получает консервативные и ожидаемые коэффициенты по этапам.
3. Выполняется расчёт ожидаемой и консервативной полной трудоёмкости, себестоимости и коммерческой стоимости.
4. Результаты сохраняются в документе «Оценка стоимости ИТ-проекта» с расшифровкой по этапам.
5. При необходимости формируется запрос к ИИ-помощнику на базе большой языковой модели, например, GigaChat с описанием проекта и расчётным контекстом.
6. ИИ-помощник [10] анализирует описание, выявляет возможные неучтённые работы, поясняет результат и рекомендует сценарий применения (ожидаемый или консервативный).



Рис. 4. Диаграмма последовательности работы системы управления стоимостью ИТ- проектов

III. РЕАЛИЗАЦИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

A. Архитектура прикладных программ

Система построена на платформе "1С:Предприятие 8.3" [11] и представляет собой развитие действующей информационной системы компании. В структурной схеме на Рис. 5 отдельно выделены базовый функционал, использованный в качестве основы разработки, и компоненты, реализованные в рамках настоящего исследования.

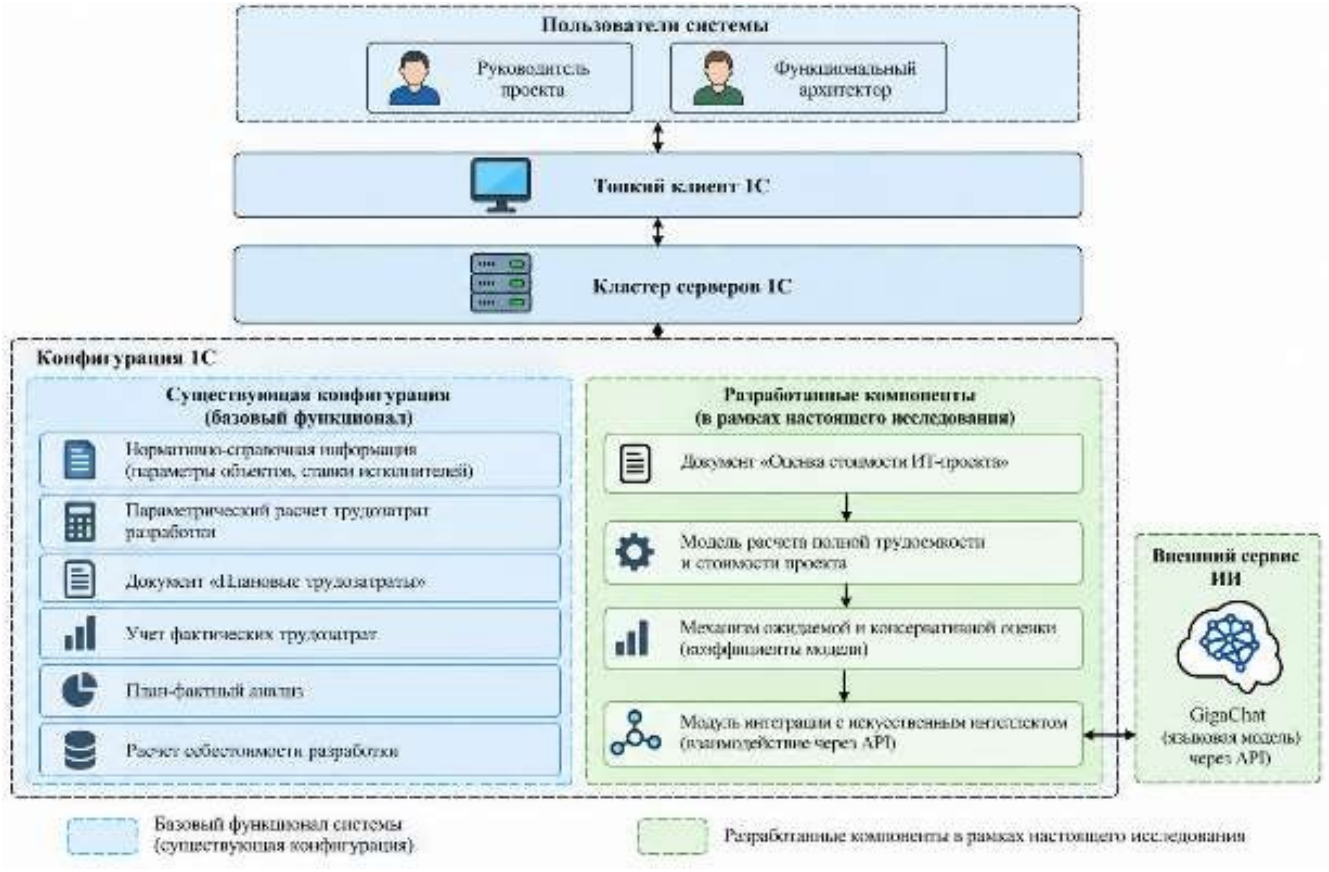


Рис. 5. Структурная схема программного комплекса

Взаимодействие пользователей с системой осуществляется через тонкий клиент 1С. Серверная часть включает кластер серверов 1С, на котором размещена конфигурация с базовым функционалом и разработанными в рамках исследования компонентами оценки стоимости ИТ-проектов. В состав разработанных компонентов входит модуль интеграции с искусственным интеллектом, обеспечивающий взаимодействие с языковой моделью GigaChat через API.

B. Технологическая архитектура

Диаграмма компонентов (Рис. 6) отражает структуру ключевых модулей системы. В центре – клиентская база, связывающая подсистемы с пользовательским интерфейсом и серверной частью.

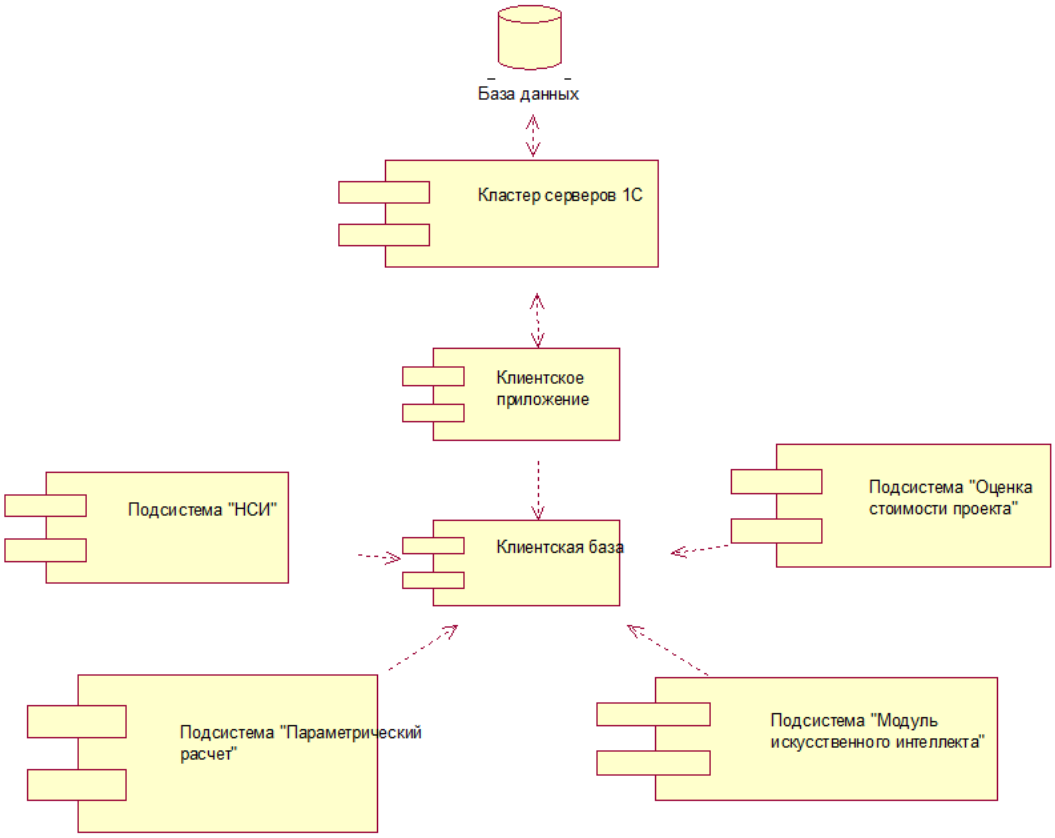


Рис. 6. Диаграмма компонентов системы управления стоимостью ИТ-проектов

В составе системы реализованы следующие объекты:

1. Справочник «Версии модели оценки» – хранит версии расчётной модели с указанием даты утверждения, признака активности, количества проектов в выборке и уровня обеспеченности прогноза.
2. Регистр сведений «Коэффициенты модели оценки» – хранит ожидаемые и консервативные коэффициенты в разрезе версии модели и этапа проекта.
3. Документ «Оценка стоимости ИТ-проекта» – центральный объект системы, который сдержит документ-основание «Плановые трудозатраты», ожидаемую и консервативную трудоёмкость и себестоимость по каждому этапу, а также итоговую оценку. Форма документа представлена на Рис. 7.
4. Обработка «Взаимодействие с ИИ» – автоматизированное рабочее место, на котором осуществляется взаимодействие с ИИ-помощником, формирование запросов, получение заключений и рекомендаций по результатам расчёта (Рис. 8).

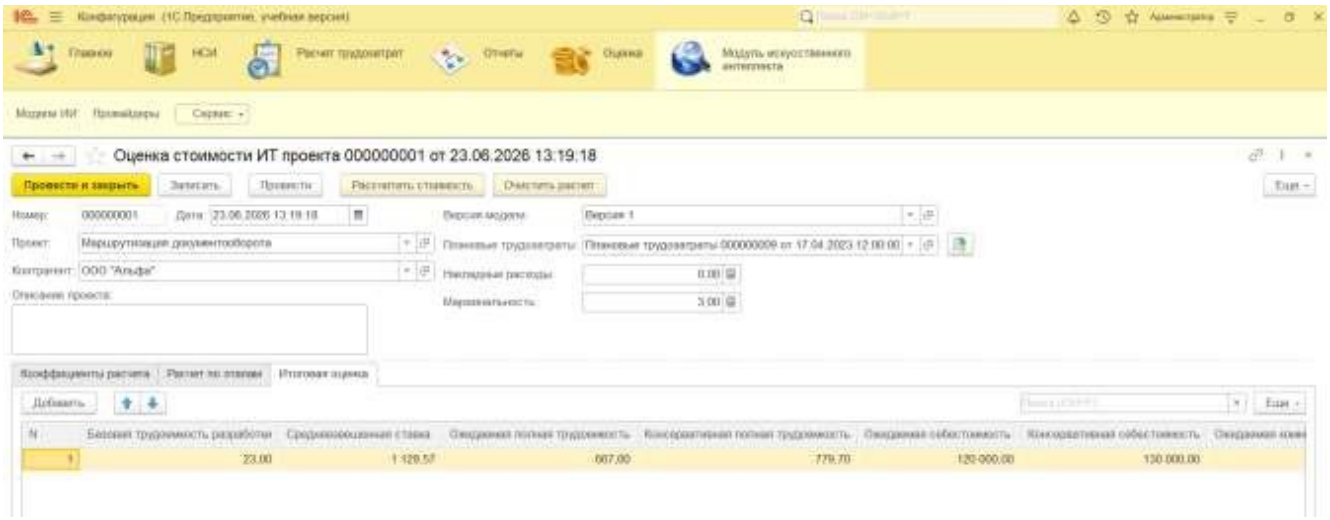


Рис. 7. Документ «Оценка стоимости ИТ-проекта»



Рис. 8. Обработка «Взаимодействие с ИИ»

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана интеллектуальная информационная система управления стоимостью ИТ-проектов на платформе «1С:Предприятие 8.3». Система дополняет параметрический расчёт трудоёмкости разработки экономико-математической моделью на основе исторических данных 20 проектов и *t*-распределения Стьюдента, обеспечивающей ожидаемую и консервативную оценку полной стоимости проекта с учётом всех этапов жизненного цикла.

В составе системы реализованы: справочник «Версии модели оценки», регистр «Коэффициенты модели оценки», документ «Оценка стоимости ИТ-проекта» с расшифровкой по этапам, обработка «Взаимодействие с ИИ» и регистры для настройки и логирования обращений к ИИ-помощнику.

Интегрированный ИИ-помощник проверяет и поясняет расчет, рекомендует сценарий оценки.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Брукс Ф. Мифический человеко-месяц или как создаются программные системы. – СПб.: Питер, 2021. – 368 с.
[2] Бобровников А.Э. Введение в управление проектами внедрения ERP-систем. – М.: ООО «1С-Паблишинг», 2021. – 321 с.
[3] Прохоров Ю.В. Малые выборки // Большая российская энциклопедия [Электронный ресурс]. — URL: https://old.bigenc.ru/mathematics/text/2169996 (дата обращения: 21.02.2026).
[4] Кендалл М. Дж., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. Т. 1: Теория распределений. — М.: Наука, 1973. — 900 с.
[5] Бова, В.В. Основы проектирования информационных систем и технологий: учебное пособие / В. В. Бова, Ю. А. Кравченко. — Ростов-на-Дону, Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2018. — 105с.
[6] Кукарцев, В. В. Проектирование и архитектура информационных систем: учебник / В. В. Кукарцев, Р. Ю. Царев, О. А. Антамошкин. — Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2019. — 192 с.

[7] Буч Г., Рамбо Д., Якобсон А. Язык UML. Руководство пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2006. – 496 с.
[8] Хамматова, Л. А. Универсальный язык моделирования UML, основные диаграммы и проблемы использования // Прорывные научные исследования: проблемы, закономерности, перспективы: сборник статей XIII Международной научно-практической конференции. – 2019. – С. 88-90.
[9] Бушмелева, К. И. Моделирование жизненного цикла программного обеспечения от сбора требований до внедрения на основе применения UML-диаграммы / К. И. Бушмелева, Л. Р. Зарипова // Вестник кибернетики. – 2019. – № 1(33). – С. 94-99
[10] Мартынов, С. В. Опыт развёртывания больших языковых моделей на локальных вычислительных системах / С. В. Мартынов, А. В. Осовский, Д. В. Кутузов // Системная инженерия и инфокоммуникации. – 2026. – № 3(7). – С. 43-50. – EDN HPQGAO.
[11] Радченко М.Г., Хрусталева Е.Ю. 1С:Предприятие 8.3. Практическое пособие разработчика. Примеры и типовые приемы. – М.: 1С-Паблишинг, 2023. – 983 с.

Информация об авторах

Дукаева Эсет Ильясовна, магистрант Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, эл. почта: eset.dukaeva@yandex.ru

Ганюкова Наталья Павловна, к.т.н., доцент кафедры «Прикладная информатика» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, эл. почта: ganykova@yandex.ru

Intelligent information system for IT project cost management

Eset I. Dukaeva, Natalya P. Ganyukova

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

Abstract **– The article discusses the development of an intelligent information system for IT project cost management. The initial basis is an existing information system used in a 1C franchise company, designed for parametric planning of development labor costs, assignment of executors, calculation of development cost, recording of actual labor costs, and performing plan-fact analysis. The disadvantage of the existing solution is that it does not allow estimating the total project cost taking into account all stages of the lifecycle. To solve this problem, the original system for parametric calculation of development labor intensity is supplemented with an economic-mathematical model based on historical data from completed projects, which allows calculating expected and conservative estimates of the total project cost. An AI assistant is integrated into the system to analyze project descriptions, verify the completeness of calculations, and generate recommendations.**

Keywords– **IT project, cost estimation, labor costs, economic-mathematical model, artificial intelligence.**

REFERENCES

[1] Bruks F. Mificheskij cheloveko-mesyac ili kak sozdayutsya programmnye sistemy. – SPb.: Piter, 2021. – 368 p.
[2] Bobrovnikov A.E. Vvedenie v upravlenie proektami vnedreniya ERP-sistem. – M.: OOO «1S-Pablishing», 2021. – 321 p.
[3] Prohorov YU.V. Malye vyborki // Bol'shaya rossijskaya enciklopediya [Elektronnyj resurs]. — URL: https://old.bigenc.ru/mathematics/text/2169996 (data obrashcheniya: 21.02.2026).
[4] Kendall M. Dzh., St'yuart A. Statisticheskie vyvody i svyazi. T. 1: Teoriya raspredelenij. — M.: Nauka, 1973. — 900 p.
[5] Bova, V.V. Osnovy proektirovaniya informacionnyh sistem i tekhnologij: uchebnoe posobie / V. V. Bova, YU. A. Kravchenko. — Rostov-na-Donu, Taganrog: Izdatel'stvo YUzhnogo federal'nogo universiteta, 2018. — 105 p.
[6] Kukarcev, V. V. Proektirovanie i arhitektura informacionnyh sistem: uchebnik / V. V. Kukarcev, R. YU. Carev, O. A. Antamoshkin. — Krasnoyarsk: Sibirskij federal'nyj universitet, 2019. — 192 p.
[7] Buch G., Rambo D., YAkobson A. YAzyk UML. Rukovodstvo pol'zovatelya. – M.: DMK Press, 2006. – 496 p.
[8] Hammatova, L. A. Universal'nyj yazyk modelirovaniya UML, osnovnye diagrammy i problemy ispol'zovaniya // Proryvnye nauchnye issledovaniya: problemy, zakonomernosti, perspektivy: sbornik statej XIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. – 2019. – P. 88-90.
[9] Bushmeleva, K. I. Modelirovanie zhiznennogo cikla programmnogo obespecheniya ot sbora trebovanij do vnedreniya na osnove primeneniya UML-diagrammy / K. I. Bushmeleva, L. R. Zaripova // Vestnik kibernetiki. – 2019. – № 1(33). – P. 94-99
[10] Martynov, S. V. Opyt razvyortyvaniya bol'shih yazykovyh modelej na lokal'nyh vychislitel'nyh sistemah / S. V. Martynov, A. V. Osovskij, D. V. Kutuzov // Sistemnaya inzheneriya i infokommunikacii. – 2026. – № 3(7). – P. 43-50. – EDN HPQGAO.
[11] Radchenko M.G., Hrustaleva E.YU. 1S:Predpriyatie 8.3. Prakticheskoe posobie razrabotchika. Primery i tipovye priemy. – M.: 1S-Pablishing, 2023. – 983 p.

Information about the author

Dukaeva Eset Ilyasovna, Master's student of group DIIBM-21, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, eset.dukaeva@yandex.ru

Ganyukova Natalya Pavlovna, Cand. of Techn. Sci., Associate Professor of the Department of Applied Informatics, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, ganykova@yandex.ru

Лабораторный комплекс для подготовки студентов по дисциплине «Локальные инфокоммуникационные сети»

И.А. Сидоров, К.Л. Игнатенкова

Научный руководитель А.В. Осовский

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Астраханский государственный технический университет" Астрахань, Россия

Аннотация **– В статье рассматривается разработка и внедрение лабораторного комплекса «Локальные инфокоммуникационные сети», предназначенного для формирования практических навыков у студентов в области проектирования, настройки и эксплуатации локальных вычислительных сетей. Представлен состав комплекса, включающего управляемые коммутаторы Huawei, D-Link, Edge-Core и Cisco, а также маршрутизатор Cisco. Такой подход позволяет изучать особенности сетевого оборудования различных производителей и его взаимодействие. Описаны возможности лабораторного практикума по освоению принципов IP-адресации, настройке протоколов удалённого доступа, построению различных сетевых топологий, организации виртуальных локальных сетей и межсетевой маршрутизации. Особое внимание уделено практическому изучению механизмов обеспечения безопасности и диагностике сетевых неисправностей. Рассмотрены содержание и методическое обеспечение пяти лабораторных работ. Показано, что использование реального телекоммуникационного оборудования позволяет дополнить теоретическую подготовку практическими навыками конфигурирования и эксплуатации сетевой инфраструктуры, необходимыми для профессиональной деятельности в области инфокоммуникационных технологий.**

Ключевые слова **– коммутаторы, локальные сети, конфигурирование, безопасность.**

ВВЕДЕНИЕ

В эпоху бурного развития телекоммуникаций и информационных технологий подготовка профессионалов высокого уровня требует внедрения свежих, нестандартных образовательных решений. Многие учебные заведения сталкиваются с дефицитом оборудования, адаптированного к реальным сценариям и отвечающего современным стандартам. Для подготовки специалистов по инфокоммуникационным технологиям на кафедре «Связь» Астраханского государственного технического университета в учебный процесс внедряются новые лабораторные комплексы на базе современного оборудования [1, 2] Реально работающее оборудование в отрасли телекоммуникаций (коммутаторы, маршрутизаторы, роутеры), включённые в комплекс, были предоставлены кафедре «Связь» Астраханского государственного технического университета (АГТУ) в качестве шефской помощи астраханским филиалом ПАО МТС.

Комплекс лабораторных работ был разработан на основе 9 коммутаторов: Huawei S2300 – 2шт, Edge-Core ES3528M – 2шт, D-Link DES-3028 – 3 шт, D-Link DES-3200 и Cisco 2960, а также одного маршрутизатора Cisco 2800 Комплекс обеспечивает возможность изучения архитектурных особенностей коммутаторов четырех распространенных производителей: Huawei, Edge-Core, D-Link и Cisco. Оборудование поддерживает полный спектр стандартных протоколов канального и сетевого уровня, включая виртуальную сегментацию (IEEE 802.1Q), агрегацию каналов (IEEE 802.3ad/LACP), протоколы предотвращения петель (STP/RSTP/MSTP), механизмы безопасности портов и приоритезации трафика (QoS) [3].

В результате прохождения лабораторного практикума с помощью данного лабораторного комплекса студенты получат опыт работы с реальными устройствами, а не их виртуальными моделями, представленными программными продуктами, например, Netcracker [4] или Cisco packet tracer [5], что приведет лучшему пониманию того, как построить эффективную и надёжную сетевую инфраструктуру.

I. АКТУАЛЬНОСТЬ

В современных условиях цифровизации экономики и повсеместного внедрения инфокоммуникационных технологий локальные вычислительные сети (ЛВС) представляют собой критически важную

инфраструктуру любого предприятия, обеспечивающую передачу данных, доступ к корпоративным сервисам и взаимодействие распределённых информационных систем. Ключевым элементом построения ЛВС канального и сетевого уровня модели OSI являются коммутаторы, от характеристик, конфигурации и надёжности которых зависят производительность, отказоустойчивость и безопасность всей сетевой инфраструктуры.

Несмотря на широкое применение коммутаторов в современных локальных вычислительных сетях, остаются актуальными вопросы, связанные:

- с обеспечением совместимости оборудования различных вендоров. Различия в реализации стандартных протоколов (IEEE 802.1Q, 802.1D/w, 802.3ad) на коммутаторах Huawei, Cisco и D-Link приводят к сложностям при интеграции устройств в единую инфраструктуру, требуют глубокого понимания синтаксических особенностей конфигурирования и могут вызывать нестабильность работы сети при некорректной настройке;
- с безопасностью коммутации на канальном уровне**.** Уязвимости, связанные с атаками типа MAC Flooding, DHCP Spoofing, ARP Poisoning, требуют внедрения механизмов защиты портов (Port Security), динамической инспекции протоколов и аутентификации устройств (802.1X), что усложняет конфигурацию и требует тщательного планирования политик доступа;
- с планированием адресного пространства и идентификацией VLAN. Непродуманная схема нумерации виртуальных сетей, отсутствие единого стандарта именования и документирования приводит к сложностям при масштабировании инфраструктуры, затрудняет диагностику неисправностей и повышает риск конфигурационных ошибок при добавлении новых сегментов.

Внедрение лабораторного комплекса в учебный процесс и разработка к нему методического обеспечения не только улучшит качество образовательного процесса при подготовке бакалавров по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», но и будет способствовать подготовке специалистов с востребованными для рынка телекоммуникаций навыками.

II. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО КОМПЛЕКСА

Основные функции лабораторного комплекса:

- изучение архитектуры и принципов работы коммутаторов;
- освоение методов конфигурирования сетевого оборудования различных производителей;
- исследование различных топологий локальных сетей и их влияния на производительность;
- отработка технологий виртуальной сегментации (VLAN), агрегации каналов (LACP) и протоколов предотвращения петель (STP/RSTP);
- изучение механизмов обеспечения безопасности на канальном уровне;
- приобретение навыков диагностики неисправностей и мониторинга сетевого трафика.

Оборудование ведущих производителей, с которыми будут знакомиться студенты на лабораторных работах представлено на Рис. 1.

Лабораторный комплекс включает в себя несколько ключевых компонентов, каждый из которых выполняет определённую функцию в процессе обучения.

A. Коммутационное оборудование

В составе комплекса представлены управляемые коммутаторы:

Huawei S2300 — устройства, построенные на операционной системе VRP, поддерживающие широкий спектр стандартных протоколов и предоставляющие гибкие возможности конфигурирования через интерфейс командной строки и веб-интерфейс [6].

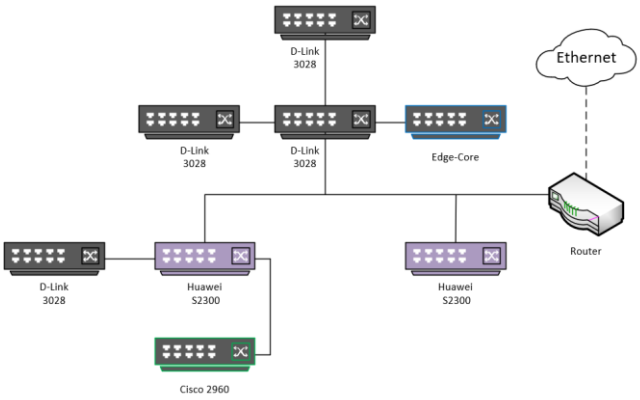


Рис. 1. Пример топологии на базе лабораторного комплекса

D-Link DES-3200/3028 – коммутаторы, ориентированные на применение в сетях операторов связи и корпоративных инфраструктурах, отличающиеся наличием расширенных функций безопасности и энергоэффективности [7].

Edge-Core ES3528M – специализированные устройства с оптическими портами 1000Base-FX, предназначенные для моделирования сетей доступа с протяжёнными сегментами [8].

B. Виртуальная сегментация сети (VLAN)

Технология виртуальных локальных сетей позволяет логически разделить единую физическую инфраструктуру на несколько независимых широковещательных доменов. В лабораторном комплексе студенты отрабатывают создание и настройку VLAN, назначение портов в режимах Access

и Trunk, конфигурацию тегирования кадров по стандарту IEEE 802.1Q, а также организацию межсегментной маршрутизации [9-11].

C. Протоколы предотвращения петель (STP/RSTP/MSTP)

В сетях с избыточными связями критически важно предотвращать возникновение петель коммутации, которые могут привести к широковещательным штормам и нестабильности работы сети. Лабораторный комплекс позволяет исследовать работу алгоритмов Spanning Tree, настраивать приоритеты коммутаторов, анализировать время восстановления связности при обрыве канала.

D. Механизмы безопасности

Коммутаторы комплекса поддерживают широкий набор функций защиты: ограничение доступа к порту по MAC-адресам (Port Security), предотвращение атак типа MAC Flooding и DHCP Spoofing, аутентификация устройств через протокол 802.1X. Отработка данных механизмов позволяет студентам сформировать представление о методах обеспечения безопасности на канальном уровне**.**

III. ПРИМЕРЫ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Методическое обеспечение лабораторного комплекса «Локальные инфокоммуникационные сети» содержит пять лабораторных работ. Каждая лабораторная работа содержит цель работы, теоретические сведения, необходимые студентам для освоения материала и понимания практической части работы, порядок выполнения работы, задания на лабораторную работу, контрольные вопросы – для закрепления полученных навыков и теоретического материала, содержание отчета по лабораторной работе.

В лабораторной работе №1 “Расчёт параметров подсети. Принципы IP-адресации и маски подсети” студенты не только закрепят знания об IP-адресации, но и изучат как именно нужно присваивать маску подсети, чтобы эффективно планировать адресное пространство локальной вычислительной сети с учётом требований к количеству узлов в каждом сегменте. В теоретической части работы студенты познакомятся с самим лабораторным комплексом, состоящим из коммутаторов различных производителей, их техническими характеристиками. Также студенты знакомятся принципами IP-адресации и структурой IP-адреса, маской подсети, классами адресов и CIDR, примером расчет параметров подсети, специальными диапазонами IP-адресов. Понимание механизма масок подсети позволяет студенту грамотно проектировать IP-план, избегать пересечения подсетей и экономить адресное пространство. В практической части работы студенты должны для своего варианта определить максимальное количество доступных IP-адресов в сети, первый и последний IP-адрес, проверить свой расчет через калькулятор IP-адресов.

В лабораторной работе №2 “Протоколы удаленного доступа-Telnet/Ssh. Программа-эмулятор терминала PuTTY” студенты изучат, как прописываются протоколы на разных видах коммутаторов и в чем заключаются концептуальные отличия между Telnet и SSH. В теоретической части работы студенты знакомятся с историческим контекстом стандартизация протоколами Telnet и SSH, архитектурной моделью и принципами их функционирования, форматом данных протоколов, управлением сессией и завершением соединения, методами аутентификации и функциональными возможности этих протоколов, сравнительной характеристикой протоколов Telnet [12] и SSH [13]. Кроме того, в теоретической части работы рассмотрена программа-эмулятор терминала PuTTY для конфигурирования сетевого оборудования. Работа выполняется на коммутаторе Huawei S2300. В практической части работы студентам предлагается подключить консольный порт к компьютеру, соединить два коммутатора Huawei между собой, запустить приложение PuTTY и прописать соединение по протоколам Telnet и SSH. В результате выполнения работы студенты освоят базовые команды (Рис. 2) для настройки виртуальных терминальных линий (VTY), научатся включать и отключать сервисы удалённого доступа, а также разграничивать уровни привилегий для локальных пользователей.

Telnet	Ssh
system-view – вход в привилегированный режим telnet server enable user-interface vty 0 4 protocol inbound telnet authentication-mode aaa idle-timeout 15	system-view- Вход в привилегированный режим aaa local-user [admin] password cipher [admin12] local-user admin privilege level 15 local-user admin service-type ssh quit user-interface vty 0 4 authentication-mode aaa protocol inbound ssh quit

Рис. 2. Синтаксис команд для коммутатора Huawei S2300

В лабораторной работе №3 «Изучение топологий сетей «кольцо», «звезда», «шина» студенты получат практические навыки построения физических и логических сетевых структур («звезда», «кольцо», «шина») на базе коммутаторов Huawei и D-Link. Студенты исследуют влияние выбранной топологии на отказоустойчивость, производительность и масштабируемость локальной вычислительной сети. В теоретической части работы даны общие понятия топологии сетей, приведены критерии оценки топологий, рассмотрены архитектурные особенности,

принципы функционирования, преимущества и недостатки, а также области применения топологий «звезда», «кольцо», «шина». Проведен сравнительный анализ этих топологий и рекомендации по выбору топологий. Работа выполняется на коммутаторах Huawei S2300 и D-Link 3028/3200. В практической части работы студентам по своему варианту необходимо собрать топологии «кольцо», «звезда» или «шина» с заданным количеством устройств, произведя также необходимые настройки коммутаторов, прописав соединения по протоколам Telnet и SSH. На Рис. 3 приведен пример выполнения работы по топологии «звезда». В ходе выполнения работы, студенты смогут самостоятельно сравнивать эффективность различных схем соединения, анализировать поведение сети при изменении нагрузки и моделировать аварийные ситуации для оценки времени восстановления связности.

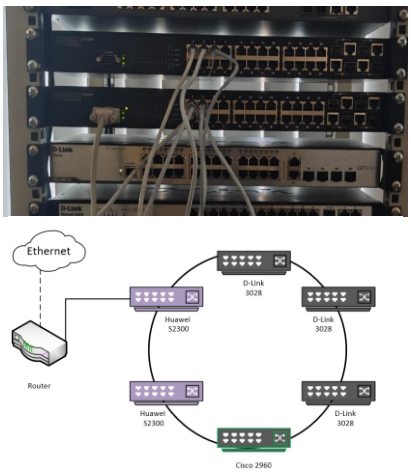


Рис. 3. Пример выполнения работы по топологии «звезда»

В лабораторной работе №4 «Изучение топологий сети «каждый с каждым», «древо» студенты получат практические навыки построения физических и логических сетевых структур «каждый с каждым» и «древо» на базе коммутаторов Huawei, D-Link и Cisco.

В теоретической части работы рассмотрены архитектурные особенности, принципы функционирования, преимущества и недостатки, а также области применения топологий «каждый с каждым» и «древо» Работа выполняется на коммутаторах Huawei s2300 и D-Link 3028/3200 и Cisco. В практической части работы студентам по своему варианту необходимо собрать топологии «каждый с каждым» или «древо» с заданным количеством устройств, произведя также необходимые настройки коммутаторов, прописав соединения по протоколу Telnet. На Рис. 4 приведен пример выполнения работы по топологии «каждый с каждым»

В лабораторной работе №5 «Построение комбинированных сетевых топологий с использованием маршрутизатора» студенты освоят принципы проектирования гибридных сетевых структур на базе коммутаторов и маршрутизаторов различных производителей, а также изучат концептуальные различия между коммутацией канального уровня и маршрутизацией сетевого уровня, отработав настройку статических маршрутов для обеспечения межсегментной связности.

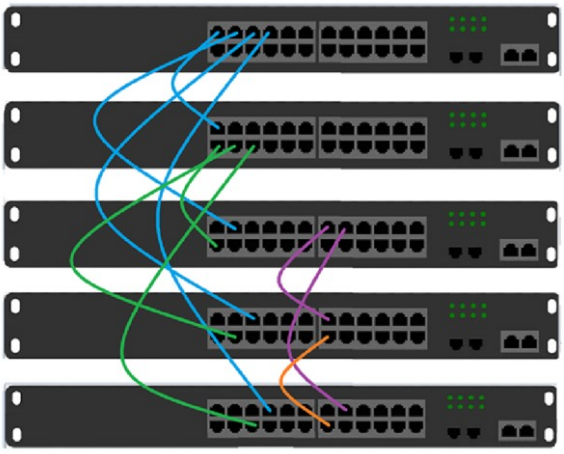


Рис. 4. Пример выполнения работы по топологии «каждый с каждым»

В теоретической части работы описаны различия между коммутатором и маршрутизатором, приведен список основных команд маршрутизатора Cisco, рассмотрены комбинированные сетевые топологии «Звезда-Кольцо» (Рис. 5), «Звезда-Шина», «Кольцо-Шина». Также рассмотрена роль маршрутизатора в гибридной топологии, принципы статической и динамической маршрутизации. Работа выполняется на коммутаторах Huawei S2300 и D-Link 3028/3200 и Cisco, а также для предотвращения ошибок соединения и петель используется маршрутизатор от компании Cisco. В практической части работы студентам по своему варианту необходимо собрать топологии «Звезда-Кольцо», «Звезда-Шина», «Кольцо-Шина» с заданным количеством устройств, произведя также необходимые настройки коммутаторов, прописав соединения по протоколу Telnet.

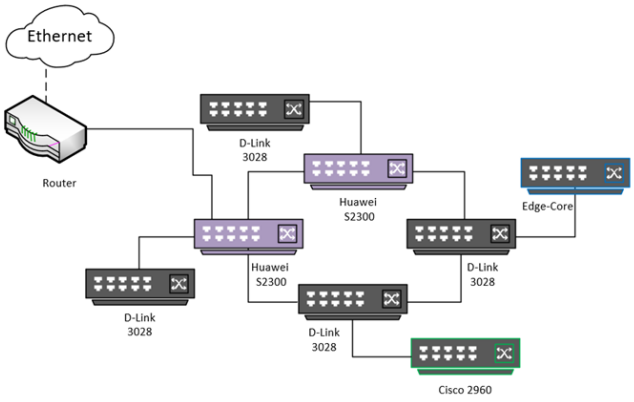


Рис. 5. Схема топологии «Звезда-Кольцо»

В ходе выполнения работы, студенты научатся анализировать таблицы маршрутизации, диагностировать проблемы межсетевого взаимодействия и оптимизировать пути передачи трафика в сложных топологиях. Дополнительно студенты получат опыт конфигурирования шлюзов по умолчанию, настройки интерфейсов маршрутизатора и проверки сквозной связности между устройствами, расположенными в различных подсетях, что формирует компетенции, необходимые для проектирования масштабируемых корпоративных сетей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лабораторный комплекс «Локальные инфокоммуникационные сети» - позволяет освоить как теорию так и практику студентам по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

Лабораторный комплекс успешно решает задачи изучения физических и логических структур сетей («звезда», «кольцо», «шина»), настройки протоколов VLAN, SSH/Telnet на оборудовании производителей Huawei, D-Link и Edge-Core, а также способствует подготовке к работе с современными технологиями, безопасной организации локальных сетей и диагностика неисправностей канального уровня.

Таким образом, внедрение лабораторного комплекса «Локальные инфокоммуникационные сети» совместно с разработанным к нему методическим обеспечением в учебный процесс не только улучшает качество образования, но и способствует формированию кадрового резерва для экономики, посредством подготовки специалистов с востребованными для рынка телекоммуникаций навыками.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность астраханскому филиалу ПАО “МТС” за предоставленное оборудование для кафедры «Связь» АГТУ.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Призенцов А., Логинов А. Применение лабораторного комплекса «Телекоммуникационные линии связи» для подготовки специалистов в области инфокоммуникационных технологий //Системная инженерия и инфокоммуникации. – 2025. – №. 1. – С. 43-47.

[2] Логинов А., Призенцов А. Применение лабораторного комплекса «Волоконно-оптические системы передачи данных с временным и волновым уплотнением каналов» //Системная инженерия и инфокоммуникации. – 2025. – №. 4. – С. 23-31.

[3] Осовский, А. В. Анализ и расчёт трафика в телекоммуникационных системах : учебное пособие / А. В. Осовский, Н. С. Мальцева, Д. В. Кутузов ; ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет». – Астрахань : Астраханский государственный технический университет, 2022. – 164 с. – ISBN 978-5-89154-739-1. – EDN WIASCK.

[4] Netcracker [Electronic resource]. – Access mode : file:///C:/Users/King/Downloads/[Butaev_M.M._Konnov_N.N.]_modelirovanie_seti_yev(BookSee.org).pdf

[5] Cisco packet tracer [Electronic resource]. – Access mode : http://elib.bsut.by/bitstream/handle/123456789/932/cisco_packet_tracer_network_simulator_-_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[6] Huawei S2300 Switches User's Manual: [Electronic resource]. – Access mode : https://www.konturm.ru/download/driver/S2300/Quidway%20S2300%20Series%20Ethernet%20Switches%20Quick%20Start(V100R002C02_01).pdf

[7] D-Link DES-3200/3028 Switches User Manual [electronic resource]. – Access mode : https://ftp.dlink.ru/pub/Switch/DES-3028-3052/Description/DES-3028_28P_52_52P_Manual_v1_01_RUS.pdf

[8] User's Guide for Edge-Core ES3528M Switches [electronic resource]. – Access mode : https://www.easymanua.ls/edge-core/es3528m/manual

[9] Next-generation network protocols and architecture [electronic resource]. – Access mode : https://www.rosprint.ru/catalog/9785991208915/

[10] Computer networks. Principles, technologies, protocols [electronic resource]. – Access mode : https://www.piter.com/collection/all/product

[11] Joe L. Kinchelo, Kathleen Nolan, Youssef Progler, Peter Applebaum, Richard Carey, Donald S. Blumenthal-Jones, Marla Morris, Jay L. Lemke, Gail S. Cannella, Danny Vale, Kathleen S. Berry. [electronic resource]. – Access mode : Multiple Intelligences Reconsidered

[12] PuTTY Documentation — User Manual [electronic resource]. – Access mode : https://the.earth.li/~sgtatham/putty/latest/htmldoc

[13] OpenSSH Project — Official Documentation [electronic resource]. – Access mode : https://www.openssh.com/manual.html

Информация об авторах

Сидоров Илья Александрович, магистрант 1-го года обучения по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, sidorov-456@yandex.ru

Игнатенкова Ксения Леонидовна – бакалавр 3курса по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, ksusha2040209zi@yandex.ru

Осовский Алексей Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Связь» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, a_osovskiy@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3174-9765

Laboratory complex for student training in the discipline «Local Infocommunication Networks»

Ilya A. Sidorov, Ksenia L. Ignatenkova
Scientific supervisor Alexey V. Osovsky

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

***Abstract* – This article discusses the development and implementation of a laboratory complex titled "Local**

Information and Communication Networks," designed to help students develop practical skills in the design, configuration, and operation of local area networks (LANs). The complex includes managed switches from Huawei, D-Link, Edge-Core, and Cisco, as well as a Cisco router. This approach enables students to study the specific features of network equipment from various manufacturers and how these devices interact. The laboratory curriculum covers key topics such as IP addressing, the configuration of remote access protocols, the creation of various network topologies, the implementation of virtual local area networks (VLANs), and inter-network routing. Particular emphasis is placed on the practical study of security mechanisms and the diagnosis of network faults. The content and methodological support for five laboratory assignments are presented. It is demonstrated that the use of actual telecommunications equipment complements theoretical training by providing the practical skills in configuring and operating network infrastructure that are essential for a professional career in the field of infocommunication technologies.

***Keywords* – switches, local area networks, configuration, security.**

REFERENCES

[1] Prizencov A., Loginov A. Primenenie laboratornogo kompleksa «Telekommunikacionnye linii svyazi» dlya podgotovki specialistov v oblasti infokommunikacionnyh tekhnologij //Sistemnaya inzheneriya i infokommunikacii. – 2025. – №. 1. – P. 43-47.

[2] Loginov A., Prizencov A. Primenenie laboratornogo kompleksa «Volokonno-opticheskie sistemy peredachi dannyh s vremennym i volnovym uplotneniem kanalov» //Sistemnaya inzheneriya i infokommunikacii. – 2025. – №. 4. – P. 23-31.

[3] Osovskij, A. V. Analiz i raschyot trafika v telekommunikacionnyh sistemah : uchebnoe posobie / A. V. Osovskij, N. S. Mal'ceva, D. V. Kutuzov ; FGBOU VO «Astrahanskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet». – Astrahan' : Astrahanskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2022. – 164 p. – ISBN 978-5-89154-739-1. – EDN WIASCK.

[4] Netcracker [Electronic resource]. – Access mode : file:///C:/Users/King/Downloads/[Butaev_M.M._Konnov_N.N.]_modelirovanie_seti_yev(BookSee.org).pdf

[5] Cisco packet tracer [Electronic resource]. – Access mode : http://elib.bsut.by/bitstream/handle/123456789/932/cisco_packet_tracer_network_simulator_-_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[6] Huawei S2300 Switches User's Manual: [Electronic resource]. – Access mode : https://www.konturm.ru/download/driver/S2300/Quidway%20S2300%20Series%20Ethernet%20Switches%20Quick%20Start(V100R002C02_01).pdf.

[7] D-Link DES-3200/3028 Switches User Manual [electronic resource]. – Access mode : https://ftp.dlink.ru/pub/Switch/DES-3028-3052/Description/DES-3028_28P_52_52P_Manual_v1_01_RUS.pdf

[8] User's Guide for Edge-Core ES3528M Switches [electronic resource]. – Access mode : https://www.easymanua.ls/edge-core/es3528m/manual

[9] Next-generation network protocols and architecture [electronic resource]. – Access mode : https://www.rosprint.ru/catalog/9785991208915/

[10] Computer networks. Principles, technologies, protocols [electronic resource]. – Access mode : https://www.piter.com/collection/all/product

[11] Joe L. Kinchelo, Kathleen Nolan, Youssef Progler, Peter Applebaum, Richard Carey, Donald S. Blumenthal-Jones, Marla Morris, Jay L. Lemke, Gail S. Cannella, Danny Vale, Kathleen S. Berry. [electronic resource]. – Access mode : Multiple Intelligences Reconsidered

[12] PuTTY Documentation — User Manual [electronic resource]. – Access mode : https://the.earth.li/~sgtatham/putty/latest/htmldoc

[13] OpenSSH Project — Official Documentation [electronic resource]. – Access mode : https://www.openssh.com/manual.html

Information about the authors

Ilya Alexandrovich Sidorov, 1st-year Master’s student in the field of "Infocommunication Technologies and Communication Systems" at Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, sidorov-456@yandex.ru

Ksenia Leonidovna Ignatenkova, 3rd-year Bachelor’s student in the field of "Infocommunication Technologies and Communication Systems" at Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, ksusha2040209zi@yandex.ru

Alexey Viktorovich Osovsky – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Communications, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, a_osovskiy@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3174-9765

Организация высокоскоростной сети в многоквартирных домах на основе технологии Power Line Communication

А.А. Жаднов, А.Ю. Прокофьева

Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

Аннотация **– В статье рассматривается возможность организации высокоскоростной сети передачи данных в многоквартирных жилых домах на основе технологии Power Line Communication (PLC), обеспечивающей передачу информации по существующей электрической проводке. Рассмотрены принципы построения PLC-сетей, особенности современных стандартов HomePlug AV2, включая использование технологии MIMO, а также проведено сравнение PLC с беспроводной технологией Wi-Fi. Основное внимание уделено оценке пропускной способности сети на примере девятиэтажного многоквартирного дома с 18 квартирами в одном подъезде. На основе расчёта затухания сигнала, отношения сигнал/шум (SNR) и применения формулы Шеннона определены теоретические характеристики канала связи и оценена скорость передачи данных при различном количестве одновременно активных абонентов. Дополнительно исследовано влияние длины линии электропередачи на качество канала и пропускную способность сети. Полученные результаты позволяют оценить потенциальные возможности и ограничения применения технологии PLC при построении высокоскоростной сетевой инфраструктуры многоквартирных жилых зданий.**

Ключевые слова **– связь по линиям электропередачи, PLC-адаптеры, пропускная способность сети, HomePlug AV2, SNR.**

ВВЕДЕНИЕ

В условиях стремительной цифровизации современного общества возрастает потребность в надёжных и удобных способах организации локальных сетей в многоквартирных домах (МКД). Методы построения сетевых инфраструктур, такие как, прокладка витой пары, использование Wi-Fi не всегда оптимальны. Они требуют значительных экономических затрат. Тем более это не эффективно в старых домах, где прокладка Ethernet-кабеля – сложная и дорогостоящая операция.

На этом фоне всё больший интерес вызывает технология PLC (Power Line Communication), позволяющая передавать данные по существующим электрическим проводам. Адаптеры PLC преобразуют цифровые сигналы в высокочастотные, которые распространяются по бытовой электросети как физической среде. Данные передаются на частотах 1–86 МГц, не мешая основной функции проводки – передаче электроэнергии [1]. Вместо прокладки отдельных кабелей для Интернета сигнал может передаваться по бытовой электропроводке. Используя адаптеры PLC, можно расширить радиус действия локальной сети и поддерживать высокую скорость передачи данных по всему зданию.

В связи с урбанизацией и ростом числа многоквартирных домов возникает необходимость в быстром развёртывании высокоскоростных сетей передачи данных без значительных инвестиций в новую инфраструктуру. Технология PLC позволяет использовать существующую электрическую сеть 220 В в качестве среды передачи данных, обеспечивая теоретическую скорость до 2 Гбит/с с использованием современных стандартов G.hn Wave2 и HomePlug AV2. Это особенно актуально для многоквартирных домов с 50–200 квартирами, где традиционные кабели Ethernet или оптоволоконные кабели имеют ограничения по доступу и стоимости [2].

В данной статье основное внимание уделяется сетям PLC в многоквартирных домах с акцентом на расчёты, гарантирующие приемлемую скорость передачи [3].

I. ИСТОРИЯ ПОЯВЛЕНИЯ PLC-АДАПТЕРОВ

История технологии PLC уходит корнями в начало XX века, когда по линиям электропередач передавали телеграфные и диспетчерские сигналы. В 1920-х годах использовали проводку для простых сигналов в энергетике, а в 1990-х появились попытки построения компьютерных сетей по ней. В тестах 2001 года была достигнута скорость 14 Мбит/с, однако помехи существенно снижали качество связи. [4].

Но только в начале XXI века данную технологию начали внедрять для передачи данных в локальных сетях. В марте 2000 года результатом объединения нескольких крупнейших телекоммуникационных компаний стал альянс Home Plug Powerline Alliance, организованный с целью совместного исследования, разработки и проведения испытаний. Кроме того, было решено принять единый стандарт на передачу данных

по системам электропитания. В настоящее время в состав Home Plug Powerline Alliance входит более сотни организаций.

Прототипом Power Line является технология Power Packet фирмы Intellon, которая легла в основу единого стандарта Home Plug1.0 (принят альянсом Home Plug 26 июня 2001 года). Максимальная скорость передачи данных для нее составляла 14 Мбит/с. Сегодня стандарт Home Plug AV поддерживает скорость передачи данных до 200 Мбит/с.

Стоит заметить, что Home Plug – не единственный пакет существующих спецификаций. Помимо Home Plug имеются и другие – это широкополосная технология, поддерживаемая международной ассоциаций UPA (Universal Powerline Association), а также технология с одноименным названием, которая была разработана рядом влиятельных японских компаний, объединившихся в альянс HD-PLC (High-Definition Powerline Communications). В Европе вклад в разработку PLC-технологии внёс альянс OPERA (Open PLC European Research Alliance).

В декабре 2008 г. институтом стандартизации ITU-T был принят международный стандарт на высокоскоростную передачу данных по линиям электросетей, телефонным и коаксиальным кабелям. Новый стандарт ITU-T (G.9960), называемый также G.hn, – это пакет спецификаций канального и физического уровней, который унифицирует принцип построения проводных домашних сетей. В конце 2008 г. впервые появился международный стандарт, позволяющий в полной мере использовать потенциал проводных сетей, в которых в качестве физической среды передачи данных используются линии электросети, коаксиальный или телефонный кабели. За обеспечением совместимости всех сетей, созданных на базе G.hn, наблюдает некоммерческая организация Home Grid Forum, одним из основателей которой является компания DS2.

В июле 2005 г. институт IEEE объявил о создании рабочей группы, которая занималась подготовкой стандарта Broadband Power Line. Объектом изучения были приняты конкурирующие и несовместимые между собой спецификации использования электросетей для высокоскоростной передачи данных. Спецификации были представлены альянсом Home Plug Powerline Alliance, корпорацией Panasonic и компанией DS2.

В результате был одобрен первый проект стандарта: IEEE P1901 Draft Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications. В проекте стандарта предусматривается возможность использования на физическом уровне двух несовместимых между собой способов модуляции (FFTOFDM и Wavelet OFDM). Более того, допускалась возможность использования двух несовместимых между собой методов прямой коррекции ошибок [5].

II. PLC КАК ГИБРИДНОЕ РЕШЕНИЕ

В жилых и офисных зданиях наблюдается взрывной рост спроса на высокоскоростные приложения и автоматизацию. Сетевая инфраструктура должна масштабироваться, чтобы удовлетворить эти потребности и обеспечить доступ для различных устройств и приложений. Хотя беспроводная связь повсеместна, а её эффективность значительно улучшена благодаря недавним поправкам к стандарту IEEE 802.11, беспроводные сети часто сталкиваются с проблемами покрытия и перегрузки из-за ограниченного нелицензированного спектра, что не гарантирует высокого качества обслуживания конечных пользователей. Сегодня спрос на связь стремительно растет во всех средах от жилых и офисных зданий в сельской и городской местности до различных видов транспорта [6]. Многие приложения предъявляют к технологиям связи множество требований: мобильность, простота использования, производительность и надёжность. Производительность часто измеряется пропускной способностью или задержкой. Оба показателя зависят от нескольких сетевых уровней и характеризуются качеством обслуживания (QoS – Quality of Service). Беспроводная связь доминирует в жилых и офисных сетях, предлагая мобильность и привлекательные скорости передачи данных. Однако из-за особенностей архитектуры здания часто остаются «слепые зоны» – сигналы ослабляются стенами [7]. К распространённым проблемам относятся помехи от соседних сетей и ограниченное количество не мешающих каналов (особенно при использовании стандарта 802.11ac на частотах 80/160 МГц) [8]. Перегрузка усугубляется тысячами подключённых устройств: смартфоны, планшеты, носимые гаджеты, устройства автоматизации. Компания Transformal Insights прогнозирует, что к 2030 году будет работать боле 24,1 млрд подобных устройств [9]. Появляются приложения, требующие много ресурсов: AR, 4K/8K стриминг, игры, видеоконференции, облачные хранилища. Wi-Fi приближается к пределу ёмкости по ширине канала, а Ethernet относительно дорог в развёртывании, поэтому нужны дополнительные среды передачи. Одно из возможных решений – использование технологии PLC. Ее преимуществом являются нулевые затраты на кабель, Plug&Play, покрытие 100% помещений, интеграция с IoT (счётчики, датчики). Но у технологии PLC существуют и ограничения - чувствительность к импульсным помехам, помехам от лифтов, микроволновок и т.п.

III. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ PLC

На Рис. 1 показана общая блок-схема подключения абонента к PLC. В многоквартирном доме сеть

формируется по общим кабель-каналам - от вводно-распределительного устройства (ВРУ) в подвале через этажные щиты к квартирным розеткам.

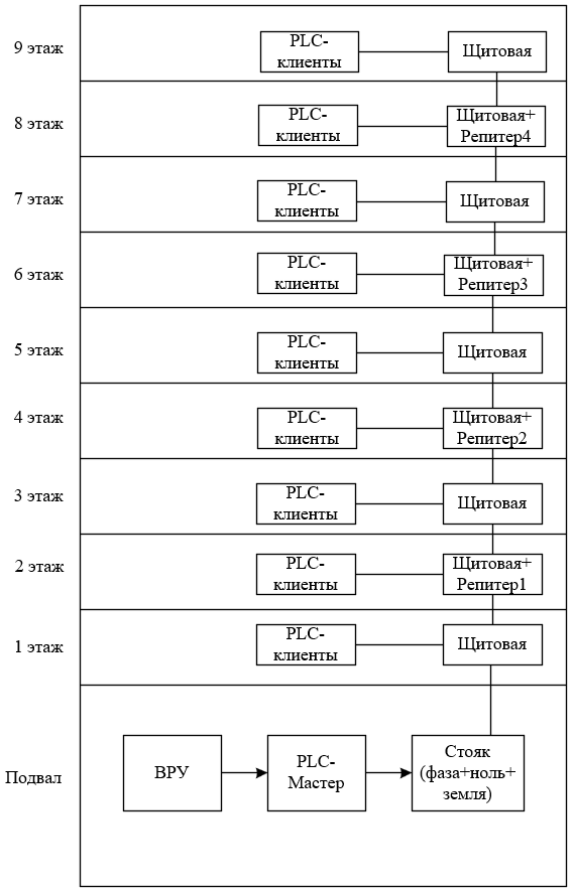


Рис. 1. Типовая блок-схема подключения абонента к PLC (ВРУ – вводно-распределительное устройство)

В типичном МКД высотой 9–17 этажей проводка как правило алюминиевая или медная, с длиной линий 100–300 м от щита до крайних квартир. Фазовое разделение (три фазы + ноль) требует репитеров для межфазовой передачи, иначе скорость падает на 50–70%. Современные адаптеры (например, TP-Link AV2000, devoloMagic [10] поддерживают технологию MIMO. Функция широко используется в системах связи для увеличения пропускной способности и обеспечения выигрыша за счёт разнесения сигналов без использования дополнительной полосы пропускания или мощности передачи. Home Plug AV – это система антенн (под антенной понимается одна из жил кабеля) первого поколения PLC с одним входом и одним выходом (SISO), использующая фазовый и нейтральный электрические провода. Технология MIMO относится к поколению Home Plug AV2, которая использует любые две пары проводов, образованные фазой, нейтралью в качестве двух MIMO-антенн. Антенной может быть любая пара проводов L, N и PE (см. Рис.3) [11].

На Рис. 2 показана общая блок-схема цифрового модема PLC (модулятора/демодулятора). В передатчике к модему PLC можно подключить несколько типов внешних устройств с различными протоколами связи через подходящий интерфейс передачи данных, который должен быть совместим с используемым стандартом PLC.

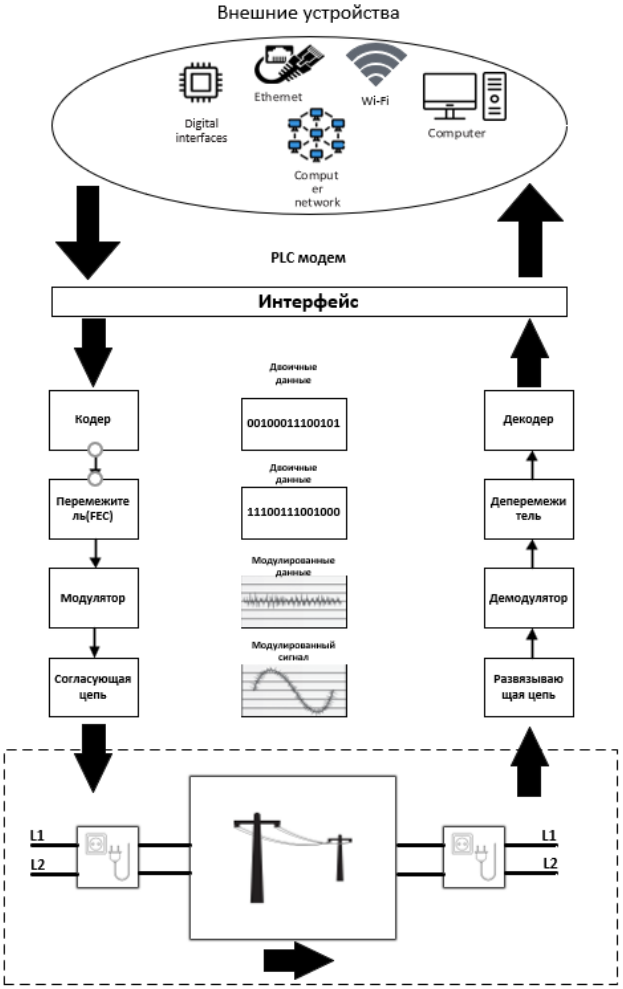


Рис. 2. Типовая блок-схема PLC-модема

Передаваемая информация в двоичном формате кодируется с помощью схемы прямой коррекции ошибок и дополняется контрольными битами для защиты информации от ошибок, вызванных помехами в линиях электропередачи. Затем модулятор преобразует закодированный битовый поток в аналоговый сигнал для эффективной передачи по кабелям электропередачи. Модулированный сигнал подается в электрические кабели с помощью схемы связи, которая обычно представляет собой аналоговый фильтр. На приёмной стороне схема развязки, которая также является фильтром, ослабляет сигнал электропередачи частотой 50/60 Гц и нежелательные электрические шумы, выбирая только частотный диапазон модулированного информационного сигнала.

Демодулятор преобразует аналоговый сигнал из схемы развязки в закодированный битовый поток, который может содержать ошибки, вносимые каналом связи и шумами в линии электропередачи. Наконец, битовый поток преобразуется и направляется в декодер, который обнаруживает и исправляет ошибки, передавая корректную информацию внешним устройствам.

IV.СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ PLC И WI-FI

В Табл. I представлены основные различия между технологиями Wi-Fi и PLC на физическом уровне.

ТАБЛИЦА I
СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ PLC И WI-FI

Характеристика	Wi-Fi	PLC
Частотные	2,4, 5 или 6 ГГц	1–86 МГц
Полоса пропускания в МКД	Wi-Fi 2,4 (20 МГц) Wi-Fi 5 и 6 (80/160 МГц)	(20/40 МГц)
Характер канала	Многолучевой	Многолучевой
Помехи	Да	Да
Причина частотной селективности	Отражение, дифракция, рассеяние сигнала	Импеданс бытовых приборов, автоматические выключатели, связь между фазами
OFDM	Все поднесущие используют одну схему. Wi-Fi 6 поколения построен с поднесущей 78,125 кГц.	Каждая поднесущая может использовать разную схему
Модуляция	BPSK, QPSK, 16/64/256/1024 QAM	BPSK, QPSK, 4/16/64/256/1024/4096 QAM
Метод коррекции ошибок(FEC)	BCC, LDPC	BCC, LDPC
Выбор скорости	На передатчике, по уровню ошибок пакетов	На приёмнике, с обратной связью передатчику

Последняя спецификация AV2 вводит дополнительные функции для поддержки приложений, оперирующих большими объемами данных, и повышения скорости передачи данных. По сравнению с AV она включает:

- Расширение полосы до 1,8÷86 МГц (против 1,8–30 МГц в Home Plug AV) и FFT-точек до 8192 (против 4096), для дополнительной полосы и 3455 поднесущих (против 917).
- Схему модуляции 4096-QAM, FEC-коэффициент 16/18.
- Снижение затрат на служебную информацию на MAC-уровне за счёт делителей и отложенных подтверждений.
- Поддержку MIMO (многоканальный вход/выход) с формированием луча (Рис. 3).

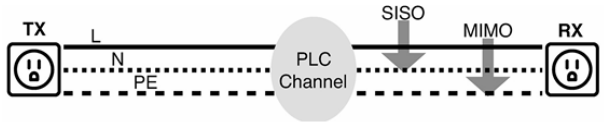


Рис. 3. Электрические кабели, используемые для MIMO (HomePlug AV2), — это фаза (Line, L), нейтраль (Neutral) и земля (PE)

Ключевой новой функцией PHY в AV2 является MIMO-передача, теоретически удваивающая пропускную способность канала. Расширения MIMO PLC – это использование трех проводов – фазы (L), нейтрали (N) и защитного заземления (PE). Первый подход к созданию модели канала MIMO был представлен в исследовании [12], где авторы представляют методологию генерации канала MIMO 2×4. Ключевая идея, предложенная авторами, заключалась в получении модели канала MIMO из канала с одним входом и одним выходом (SISO-Single Input Single Output) на основе модели европейского проекта OPERA.

V.ОЦЕНКА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СЕТИ

Рассмотрим 9-этажный многоквартирный дом. Расчет сделаем для одного подъезда с двумя квартирами на этаже, т.е. для 18 квартир в подъезде (см. Рис. 1). Исходные данные (по стандарту HomePlug AV2) для расчета представлены в Табл. II.

ТАБЛИЦА II
ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

Параметр	Обозначение	Значение
Мощность передатчика	P	70 мВт
Полоса частот	B	1,8÷86,13 МГц
Ширина полосы частот	$\triangle B$	84,33 МГц
Число несущих	N_{SC}	3455
Шаг несущих	$\triangle f$	24,414 кГц
Удельное затухание	α_0	0,03дБ/м
Опорная частота	f_0	10МГц
Постоянная составляющая потерь	L_{const}	20дБ
Показатель частотной зависимости	k	0,6
Длина линии	d	50 м
Спектральная плотность шума	N_0	-110 дБм/Гц [13]

Переведем исходную мощность передатчика из милливатт в дБм по формуле:

$$P_{\text{дБм}} = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{P\,[\text{мВт}]}{1\,[\text{мВт}]}\right), \quad (1)$$

$$P_{\text{дБм}} = 10 \cdot \log_{10}(70) = 18,45\ [\text{дБм}]$$

Далее найдем затухании на линии по формуле:

$$L(f) = \alpha_0 \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^k \cdot d + L_{const}, \quad (2)$$

где α_0 - удельное затухание на линии; f - рабочая частота (86,13МГц); f_0 - опорная частота; d - длина линии; L_{const} - постоянная составляющая потерь; k-показатель частотной зависимости.

Найдем по формуле (2) затухание на линии для нижней и верхней частоты соответственно:

$$L(1,8\ \text{МГц}) = 0,03 \cdot \left(\frac{1,8 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^6}\right)^{0,6} \cdot 50 + 20 =$$

$$= 20,54\ [\text{дБ}],$$

$$L(86,13\ \text{МГц}) = 0,03 \cdot \left(\frac{86,13 \cdot 10^6}{10 \cdot 10^6}\right)^{0,6} \cdot 50 + 20 =$$

$$= 25,46\ [\text{дБ}].$$

Рассчитаем мощность на приемнике по формуле:

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{дБм}} - L(f), \quad (3)$$

$$P_{\text{пр}} = 18,45 - 25,45 = -7\ [\text{дБм}].$$

Найдем полную мощность шума по формуле:

$$N = N_0 + 10\log_{10}(\Delta B), \quad (4)$$

где N - полная мощность шума; N_0 - спектральная плотность шума; ΔB - ширина полосы частот.

$$N = -110 + 10\log_{10}(84,33 \cdot 10^6) = -30,74\ [\text{дБм}].$$

Найдем спектральную плотность мощности передатчика при равномерном распределении мощности по полосе частот по формуле:

$$P_f = P_{\text{дБм}} - 10\log_{10}(\Delta B), \quad (5)$$

$$P_f = 18,45 - 10\log_{10}(84,33 \cdot 10^6) = -60,81\ [\text{дБм/Гц}].$$

При равномерной мощности передатчика и одинаковой полосе нормировки для сигнала и шума отношение сигнал/шум на частоте f можно найти по формуле:

$$SNR(f) = P_f - L(f) - N_0. \quad (6)$$

Подставим часть известных численных значений, получим:

$$SNR(f) = -60,81 - L(f) - (-110) =$$
$$= 49,19 - L(f),\ [\text{дБ}]. \quad (7)$$

Найдем отношение сигнал/шум по формуле (7), для нижней и верхней частоты, соответственно:

$$SNR(1,8\ \text{МГц}) = 49,19 - 20,54 = 28,65\ [\text{дБ}],$$

$$SNR(86,13\ \text{МГц}) = 49,19 - 25,46 = 23,73\ [\text{дБ}].$$

Как видим, наихудший показатель SNR получен для верхней частоты, что справедливо, учитывая, что согласно формуле (2) затухание на линии растет с ростом частоты.

Далее найдем линейное отношение наихудшего показателя сигнал/шум в линии. Для этого отношение сигнал/шум переводим из дБ в разы по формуле:

$$SNR_{lin} = 10^{0,1 \cdot SNR(f)}, \quad (8)$$

$$SNR_{lin} = 10^{0,1 \cdot 23,73} \approx 236.$$

Расчет пропускной способности сети производится по формуле Шеннона для одной поднесущей:

$$C_{SC} = \Delta f \cdot \log_2(1 + SNR_{lin}), \quad (9)$$

где C_{SC} - пропускная способность для одной поднесущей; Δf - шаг несущих; SNR_{lin} - линейное отношение сигнал/шум [в разах].

Найдем пропускную способность для одной поднесущей по формуле (9):

$$C_{SC} = \Delta f \cdot \log_2(1 + SNR_{lin}) = 24414 \cdot \log_2(1 + 236) =$$
$$= 192,63\ (\text{Кбит/с}).$$

Суммарная теоретическая предельная пропускная способность (скорость передачи) для всех 3455 поднесущих составляет:

$$C = C_{sc} \cdot 3455 = 192,38 \cdot 3455 \approx 665\ (\text{Мбит/с}).$$

Формула (9) определяет гарантированную минимальную скорость передачи данных при пиковой нагрузке в PLC-сети МКД при неравномерной нагрузке.

Для минимально гарантированной скорости считаем долю активных абонентов равной 100%.

При равномерном разделении общей скорости 665 Мбит/с на 18 одновременно активных квартир, скорость передачи составляет:

$$S_{\min} = \frac{665}{18} \approx 37\ (\text{Мбит/с}).$$

Таким образом, минимальная гарантированная скорость на одного абонента при длине линии 50 м составляет 37 Мбит/с.

Хотя использование MIMO-передачи, теоретически удваивает пропускную способность канала, но три проводника не означают автоматически три независимых потока, а наличие двух пар не гарантирует два независимых каналов. Для оценки пропускной способности при MIMO-передаче требуются экспериментальные измерения параметров PLC-канала в условиях реального многоквартирного жилого дома.

Скорость в PLC-канале будет возрастать, если количество одновременно активных абонентов будет снижаться (Табл. III)

ТАБЛИЦА III
СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ДОЛЕЙ АКТИВНЫХ АБОНЕНТОВ И СКОРОСТЬЮ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Количество активных квартир	Доля активности	Скорость на одну квартиру
18	100 %	37 Мбит/с
9	50 %	74 Мбит/с
5	27,8 %	133 Мбит/с
2	11,1 %	333 Мбит/с

Используя формулы (2), (79) вычислим влияние длины линии передачи на отношение сигнал/шум и скорость передачи для наихудшего показателя SNR (для верхней частоты 86,13 МГц), результаты расчета представлены в Табл. IV.

ТАБЛИЦА IV
ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ ЛИНИИ НА SNR И СКОРОСТЬ ПЕРЕДАЧИ

Длина линии, d	L (86,13 МГц)	SNR (86,13 МГц)	SNR_{lin}	Скорость передачи, C
50 м	25,5 дБ	23,73 дБ	236	665 Мбит/с
100 м	30,9 дБ	18,3 дБ	67,61	514 Мбит/с
150 м	36,4 дБ	12,8 дБ	19,05	365 Мбит/с
200 м	41,8 дБ	7,4 дБ	5,49	227 Мбит/с
300 м	52,8 дБ	−3,6 дБ	0,44	44 Мбит/с

Как видно из Табл. IV длина 200 м заслуживает отдельного внимания. SNR на верхней частоте (86,13 МГц) на длине линии 200м падает до 7,4 дБ. Это означает существенное ухудшение условий передачи на верхней части спектра и падение скорости передачи почти в 3 раза. При длине 300 м отношение сигнал/шум на указанной частоте становится отрицательным, хотя линейное отношение SNR составляет около 0,44, и спектральная эффективность по Шеннону остаётся положительной. Однако на практике модем может не использовать такие поднесущие из-за требований к коэффициенту битовых ошибок (BER) и порогов демодуляции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В результате проведённого исследования рассмотрена возможность организации высокоскоростной сети передачи данных в многоквартирных жилых домах с использованием технологии Power Line Communication, позволяющей задействовать существующую электрическую проводку в качестве физической среды передачи информации. Показано, что применение PLC может стать альтернативой традиционным способам построения локальных сетей, особенно в зданиях, где прокладка дополнительных кабельных линий связана со значительными техническими и экономическими затратами.

Рассмотрение архитектуры современных PLC-систем показало, что использование стандарта HomePlug AV2 позволяет повысить потенциальную пропускную способность сети за счёт задействования нескольких проводников электрической линии. При этом качество передачи данных определяется характеристиками электропроводки, уровнем шумов, частотными свойствами канала и протяжённостью линии.

В рамках исследования выполнена оценка пропускной способности PLC-сети для девятиэтажного многоквартирного дома с 18 квартирами в одном подъезде. Расчёты, основанные на оценке затухания сигнала, отношения сигнал/шум и формуле Шеннона, показали, что при длине линии 50 м теоретическая суммарная пропускная способность составляет около 665 Мбит/с. При условии равномерного распределения ресурса между 18 одновременно активными абонентами расчётная скорость передачи данных на одну квартиру составляет около 37 Мбит/с. При уменьшении количества одновременно активных абонентов, например, до 9, скорость возрастает до 74 Мбит/с.

Отдельно исследовано влияние протяжённости электрической линии на характеристики канала. Установлено, что с увеличением длины линии происходит снижение отношения сигнал/шум, наиболее выраженное в верхней части используемого частотного диапазона. Так, при увеличении длины линии до 200 м значение SNR на частоте 86,13 МГц снижается до 7,4 дБ, а расчётная суммарная пропускная способность уменьшается до 227 Мбит/с. При длине 300 м отношение сигнал/шум на указанной частоте становится отрицательным, что свидетельствует о существенном ухудшении условий передачи данных.

Таким образом, проведённые расчёты подтверждают перспективность использования технологии PLC для организации сетевой инфраструктуры многоквартирных жилых домов без прокладки дополнительных линий связи. Вместе с тем достижение требуемых характеристик сети зависит от состояния электрической проводки, длины линий, наличия межфазовых соединений и электромагнитных помех. Полученные оценки следует рассматривать как

теоретические характеристики пропускной способности канала, которые требуют последующей экспериментальной проверки на реальной электрической сети.

Перспективным направлением дальнейших исследований является проведение экспериментальных измерений параметров PLC-канала в условиях многоквартирного жилого дома, оценка влияния бытовых электроприборов и импульсных помех, а также исследование способов повышения устойчивости и пропускной способности сети при одновременной работе нескольких абонентов.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Как передавать данные по электроэнергии // URL: https://arghome.ru/blog/kak-peredavat-dannye-po-elektroenergii/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F

[2] Свежий взгляд на PLC: таблица расчета сети. // URL: https://nag.ru/material/16830

[3] Измерения в сетях PLC. // URL: https://www.kometeh.ru/media/publications/2008/stat_08.pdf

[4] Построение сети доступа на базе технологии PLC // URL: https://www.rusnauka.com/31_onbg_2009/informatica/54374.doc.htm

[5] AV1200 3-Port Gigabit Passthrough Powerline Adapter // URL:https://www.tp-link.com/kz/home-networking/powerline/tl-pa8030p

[6] Мартынов, С. В. Стандарты сетей связи 5G/5G-Advanced для цифровой трансформации железных дорог и развития интеллектуальных транспортных систем / С. В. Мартынов, А. В. Осовский, Д. В. Кутузов // Системная инженерия и инфокоммуникации. – 2026. – № 1(5). – С. 40-51.

[7] Мартынов, С. В. Анализ зависимости уровня затухания сигнала от расстояния с использованием логарифмической модели / С.В. Мартынов, А. В. Осовский, Д. В. Кутузов // Системная инженерия и инфокоммуникации. – 2025. – № 3(3). – С. 33-39.

[8] IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Standard 802.11-1997.

[9] Transformal insights. Global IoT market to grow to 24.1 billion devices in 2030, generating $1.5 trillion annual revenue//URL: https://transformainsights.com/news/iot-market-24-billion-usd15-trillion-revenue-2030

[10] H. A. Latchman, S. Katar, L. W. Yonge, and S. Gavette, Homeplug AV and IEEE 1901. John Wiley and Sons, Inc., 2013.

[11] El Samadouny A, El Shafie A, Abdallah M, Al-Dhahir N. Secure Sum-Rate Optimal MIMO Multicasting Over Medium-Voltage NB-PLC Networks. IEEE Transactions on Smart Grid. 2018;9(4):2954–2963.

[12] Страсти по PLC // URL: https://nag.ru/material/22802

[13] Papadopoulos T.A, Batalas B.D, Radis A, et al. Medium Voltage Network PLC Modeling and Signal Propagation Analysis. In: 2007 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications; 2007. p. 284–289.

Информация об авторах

Жаднов Анатолий Александрович, магистрант второго года обучения Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, tolya-zhadnov@mail.ru

Прокофьева Алла Юрьевна, преподаватель высшей квалификационной категории ФГБОУ ВО "Астраханский государственный технический университет" ФСПО отделение "Связь и телекоммуникации", г. Астрахань, Россия, prokofevaayu@mail.ru

Organization of a high-speed network in resident buildings based on Power Line Communication

Anatoly A. Zhadnov, Alla Y. Prokopheva

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

Annotation **- This article examines the feasibility of implementing a high-speed data network in multi-apartment residential buildings using Power Line Communication (PLC) technology, which enables data transmission over existing electrical wiring. It examines the principles of PLC network construction and the features of modern HomePlug AV2 standards, including the use of MIMO technology. PLC is compared with Wi-Fi wireless technology. The focus is on assessing network throughput using the example of a nine-story apartment building with 18 apartments in a single entrance. Calculating signal attenuation, the signal-to-noise ratio (SNR), and applying Shannon's equation are used to determine the theoretical characteristics of the communication channel and estimate the data transfer rate for different numbers of simultaneously active subscribers. The influence of power line length on channel quality and network throughput is also examined. The obtained results allow us to evaluate the potential and limitations of PLC technology in constructing a high-speed network infrastructure for multi-apartment residential buildings.**

Keywords **- communication over power lines, PLC adapters, network bandwidth, HomePlug AV2, SNR.**

REFERENCES

[1] Kak peredavat' dannye po elektroenergii // URL:https://arghome.ru/blog/kak-peredavat-dannye-po-elektroenergii/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fyandex.ru%2F)

[2] Svezhij vzglyadna PLC: tablica rascheta seti. // URL: https://nag.ru/material/16830

[3] Izmereniya v setyah PLC. // URL: https://www.kometeh.ru/media/publications/2008/stat_08.pdf

[4] Postroenie seti dostupana baze tehnologii PLC // URL: https://www.rusnauka.com/31_onbg_2009/informatica/54374.doc.htm

[5] AV1200 3-Port Gigabit Passthrough Powerline Adapter // URL: https://www.tp-link.com/kz/home-networking/powerline/tl-pa8030p

[6] Martynov, S. V. Standarty setej svyazi 5G/5G-Advanced dlyacifrovojtransformaciizheleznyhdorogirazvitiyaintellektual'nyhtransportnyhsistem / S. V. Martynov, A. V. Osovskij, D. V. Kutuzov // Sistemnaya inzheneriya i infokommunikacii. – 2026. – № 1(5). – S. 40-51.

[7] Martynov, S.V. Analiz zavisimosti urovnya zatuhaniya signala ot rasstoyaniya s ispol'zovaniem logarifmicheskoj modeli / S. V. Martynov, A. V. Osovskij, D. V. Kutuzov // Sistemnaya inzheneriya i infokommunikacii. – 2025. – № 3(3). – S. 33-39.

[8] IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements Part 11:

Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Standard 802.11-1997.
[9] Transformal insights. Global IoT market to grow to 24.1 billion devices in 2030, generating $1.5 trillion annual revenue//URL: https://transformainsights.com/news/iot-market-24-billion-usd15-trillion-revenue-2030
[10] H. A. Latchman, S. Katar, L. W. Yonge, and S. Gavette, Homeplug AV and IEEE 1901. John Wiley and Sons, Inc., 2013.
[11] El Samadouny A, El Shafie A, Abdallah M, Al-Dhahir N. Secure Sum-Rate Optimal MIMO Multicasting Over Medium-Voltage NB-PLC Networks. IEEE Transactions on Smart Grid. 2018; 9(4): 2954–2963.
[12] Strasti po PLC// URL:https://nag.ru/material/22802
[13] Papadopoulos T.A., Batalas B.D., Radis A, et al. Medium Voltage Network PLC Modeling and Signal Propagation Analysis. In: 2007 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications; 2007. p. 284–289.

Information about the authors

Anatoly Alexandrovich Zhadnov, second-year master's student at Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, tolya-zhadnov@mail.ru

Alla Yuryevna Prokofeva, Senior Lecturer (highest qualification category), Faculty of Secondary Vocational Education, Department of Communications and Telecommunications, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, Prokofevaayu@mail.ru

Системная инженерия и инфокоммуникации



Научный сетевой журнал «Системная инженерия и инфокоммуникации» (свид. о регистрации СМИ Эл № ФС77-88783 от 22 ноября 2024 г., ISSN: 3034-686X) — это некоммерческое рецензируемое сетевое издание со свободным доступом. Сайт журнала: https://sys-engine.ru

Журнал ориентирован в первую очередь на молодых специалистов в области информационных технологий, робототехники, автоматики, электроники и телекоммуникаций. Аспиранты, магистранты и студенты могут опубликовать в журнале результаты своих исследований, собственный опыт разработки проектов, обзорные статьи.

Журнал выходит четыре раза в год, и принимает к публикации оригинальные статьи, соответствующие тематике журнала. Публикация в журнале бесплатна.

Журнал не преследует коммерческой выгоды, не выплачивает вознаграждения авторам, редакция и рецензенты не получают оплату за свою работу. Публикуя статью в сетевом издании «Системная инженерия и инфокоммуникации», авторы присоединяются к цели журнала — свободному распространению научного знания.

Свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС77-88783 от 22 ноября 2024 г.
ISSN: 3034-686X
Учредитель: Кутузов Денис Валерьевич
Сетевое издание размещено по адресу: sys-engine.ru
Электронная почта: d_kutuzov@mail.ru
Телефон: +7(964)88-22-445