



САҒАДАТ НҰРМАҒАМБЕТОВ АТЫНДАҒЫ
ҚҰРЛЫҚ ӘСКЕРЛЕРІ ӘСКЕРИ ИНСТИТУТЫ

Ғылыми-ақпараттық журналы
Научно-информационный журнал
Scientific and informational journal

ХАБАРШЫ

ISSN 2617-6319(Print)
ISSN 2791-3368 (online)
Индекс 10532

**Қазақстан Республикасы Қорғаныс министрлігінің
«Сағадат Нұрмағамбетов атындағы Құрлық әскерлерінің
Әскери институты» республикалық мемлекеттік мекемесі**



**«Сағадат Нұрмағамбетов атындағы Құрлық әскерлері
Әскери институтының хабаршысы» ғылыми-ақпараттық журналы**

**Научно-информационный журнал «Вестник Военного института
Сухопутных войск имени Сагадата Нурмагамбетова»**

**Scientific and informational journal «Bulletin of the Sagadat
Nurmagambetov Military Institute of Land Forces»**

№ 2 (66) 2026

Алматы 2026



Бас редактор: **Е.Е. Нуржанов**

Бас редактор орынбасары: **Ш.К. Кадиркулов**

Редакция алқасы

S.V. Pavlov	т.ғ.д., профессор, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, H=24
A.Smolarz	PhD, Politechnika Lubelska, Lublin, Poland, H=20
A. Razaque	т.ғ.д., профессор, New York Institute of Technology (USA), H=30
I. Topsakal	PhD, профессор, Istanbul University (Turkey), H=6
А.Н. Рыспаев	PhD, қауымдастырылған профессор, әскери ғылымдар академиясының корреспондент мүшесі, «Әскери-стратегиялық зерттеулер орталығы» АҚ Президенті, запастағы генерал-майор (Қазақстан)
Г.Ф. Дубовцев	ә.ғ.к., доцент, РФ әскери академиясының корреспондент мүшесі, ҚР АӘГ корреспондент мүшесі (Қазақстан)
А.У. Калижанова	к.ф.-м.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, (Қазақстан), H=11
А.Х. Козбакова	PhD, профессор, Almaty Technological University (Қазақстан), H=11
Г.К. Сергазин	PhD, қауымдастырылған профессор, Ғылым және инновациялар жөніндегі проректор, Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University (Қазақстан), H=10
К.А. Алипбаев	PhD, қауымдастырылған профессор, Ғылым жөніндегі проректор, Energo University (Қазақстан), H=5
Х. Молдамурат	т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, L.N. Gumilyov Eurasian National University (Қазақстан), H=9
Н.А. Долженко	PhD, қауымдастырылған профессор, Civil Aviation Academy (Қазақстан), H=7
А.К. Ожикенов	т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Satbayev University (Қазақстан), H=7

*ҚР Ақпарат және қоғамдық даму министрлігінде тіркелген
қайта есепке қою туралы куәлігі № KZ46VPY00052454
алғашқы есепке алу уақыты мен нөмірі 07.12.2009, № 10532-Ж
ISSN Халықаралық орталығында тіркелген №1999-5911(Париж)
Журналдың шығу мерзімділігі – жылына 4 рет
Басылымның тілдері: қазақ, орыс, ағылшын*

*Редакцияның мекен-жайы: 050053, Қазақстан, Алматы қ., Красногорская к-сі, 4.
<https://journal-visv.kz>
Ғылыми және техникалық редактор: Н.К. Молдабекова*



Главный редактор: **Е.Е. Нуржанов**

Заместитель главного редактора: **Ш.К. Кадиркулов**

Редакционная коллегия

S.V. Pavlov	д.т.н., профессор, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, H=24
A.Smolarz	PhD, Politechnika Lubelska, Lublin, Poland, H=20
A. Razaque	д.т.н., профессор, New York Institute of Technology (USA), H=30
I. Topsakal	PhD, профессор, Istanbul University (Turkey), H=6
А.Н. Рыспаев	PhD, ассоциированный профессор, Член-корреспондент Академии военных наук, президент АО «Центр военно-стратегических исследований», генерал-майор запаса (Казахстан)
Г.Ф. Дубовцев	к.в.н., доцент, Член-корреспондент Военной академии Российской Федерации, член-корреспондент Академии военных наук Республики Казахстан (Казахстан)
А.У. Калижанова	к.ф.-м.н., ассоциированный профессор, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, (Казахстан), H=11
А.Х. Козбакова	PhD, профессор, Almaty Technological University (Казахстан), H=11
Г.К. Сергазин	PhD, ассоциированный профессор, проректор по науке и инновации, Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University (Казахстан), H=10
К.А. Алипбаев	PhD, ассоциированный профессор, проректор по науке, Energo University (Казахстан), H=5
Х. Молдамурат	к.т.н., ассоциированный профессор, L.N. Gumilyov Eurasian National University (Казахстан), H=9
Н.А. Долженко	PhD, ассоциированный профессор, Civil Aviation Academy (Казахстан), H=7
А.К. Ожикенов	к.т.н., ассоциированный профессор, Satbayev University (Казахстан), H=7

Зарегистрирован в Министерстве информации и общественного развития РК

Свидетельство о постановке на переучет №KZ46VPY00052454

Время и номер первичной постановки на учёт 07.12.2009, № 10532-Ж

Зарегистрирован в Международном центре ISSN №1999-5911 (Париж)

Периодичность издания журнала – 4 номера

Языки издания: казахский, русский, английский

Адрес редакции: 050053, Казахстан, г. Алматы, ул. Красногорская, 4.

<https://journal-visv.kz>

Научный и технический редактор: Н.К. Молдабекова



Editor-In-Chief: **E. E. Nurzhanov**

Deputy Editor-In-Chief: **Sh.K. Kadirkulov**

Editorial board

S.V. Pavlov	doctor of technical sciences, professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, H=24
A.Smolarz	PhD, Politechnika Lubelska, Lublin, Poland, H=20
A. Razaque	doctor of technical sciences, professor, New York Institute of Technology (USA), H=30
I. Topsakal	PhD, professor, Istanbul University (Turkey), H=6
A.N. Ryspayev	PhD, associate professor, President of JSG «Center for military-strategic research», general major of the reserve (Kazakhstan)
G.F. Dubovcev	candidate of military sciences, associate professor, Corresponding Member of the Academy of Military Sciences of the RF, Corresponding member of the ABN RK (Kazakhstan)
A.U. Kalizhanova	candidate of physico-mathematical sciences, professor, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, (Kazakhstan), H=11
A.H. Kozbakova	PhD, professor, Almaty Technological University (Kazakhstan), H=11
G.K. Sergazin	PhD, associate professor, Vice-Rector for Science and Innovation, Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University (Kazakhstan), H=10
K.A. Alipbayev	PhD, associate professor, Vice-Rector for Science, Energo University (Kazakhstan), H=5
H. Moldamurat	candidate of technical sciences, associate professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University (Kazakhstan), H=9
N.A. Dolzhenko	PhD, associate professor, Civil Aviation Academy (Kazakhstan), H=7
K.A. Ozhikenov	candidate of technical sciences, associate professor, University (Kazakhstan), H=7

Registered by the Ministry of Information and Social Development of the Republic of Kazakhstan

Registration Certificate № KZ46VPY00052454

Registered at the ISSN International Center №1999-5911 (Paris)

Time and number of initial registration: 07.12.2009, № 10532-Ж

Periodicity is 4 issues per year

Publication languages are Kazakh, Russian and English

Editorial office address: 050053, Kazakhstan, Almaty, ул. Krasnogorskaya, 4.

<https://journal-visv.kz>

Scientific and technical editor: N.K. Moldabekova



МАЗМҰНЫ

ӘСКЕРИ ІС

ЫҚШАМ АЭРОҒАРЫШТЫҚ ПЛАТФОРМАЛАРҒА АРНАЛҒАН БОРТТЫҚ БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІНІҢ ИНЖЕНЕРЛІК ПРОТОТИПІ ҮШІН МОДУЛЬДІК АРХИТЕКТУРАНЫ ӨЗІРЛЕУ	
Еркебулан Нұрғизат, Дархан Ахмедиев	8-22
ӘСКЕРИ ЖОҒАРЫ ОҚУ ОРНЫ ОҚЫТУШЫЛАРЫН ПЕДАГОГИКАЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ПАРК РЕСУРСТАРЫН ПАЙДАЛАНУҒА ДАЯРЛАУ ЖҮЙЕСІ	
Бауржан Жексенбинов	23-33
ӘСКЕРИ ҚОЛДАНБАЛАРҒА АРНАЛҒАН ДИНАМИКАЛЫҚ ДЕРЕКТЕР АҒЫНДАРЫНДА КҮЙГЕ НЕГІЗДЕЛГЕН БЕЙІМДЕЛГІШ МОДЕЛЬДЕР ОРКЕСТРАЦИЯСЫ	
Венера Рыстыгулова, Айгуль Абильдина, Бауыржан Абжанов	34-51
ОБЪЕКТИЛЕРДІ ТАЛУҒА АРНАЛҒАН НЕЙРОНДЫҚ ЖЕЛІНІ ОҚЫТУ ҮШІН SWIR-КАМЕРАЛАРДАН ДЕРЕКТЕРДІ ЖИНАУ ЖӘНЕ АЛДЫН АЛА ӨНДЕУ	
Абу-Алим Абу-Алим, Арман Узбекбаев, Ғани Сергазин	52-64
БЛОКЧЕЙН НЕГІЗІНДЕ ҚАУІПСІЗ САҚТАУ ЖӘНЕ ДЕРЕКТЕР АЛМАСУ ҮШІН ИНТЕГРАЦИЯЛЫҚ ПРОГРАММАЛЫҚ МОДУЛЬДІ ӨЗІРЛЕУ	
Жанна Есенғалиева, Ольга Усатова, Аида Есенғалиева	65-74
VERKLE-ҚҰРЫЛЫМДАРЫ ҮШІН ПОСТКВАНТТЫҚ ТОРЛЫ ВЕКТОРЛЫҚ МІНДЕТТЕМЕЛЕРДІ ҚҰРУ	
Күнболат Алғазы, Еркебулан Әлімжан, Қайрат Сақан	75-85
ЗЫМЫРАН ТАСЫҒЫШТЫҢ БӨЛІНЕТІН САТЫЛАРЫНЫҢ ҚҰЛАУ АЙМАҚТАРЫН БОЛЖАУДЫҢ GIS-БАҒДАРЛАНҒАН ӘДІСТЕМЕСІН ӨЗІРЛЕУ	
Алия Калижанова, Мурат Кунелбаев, Серік Дәруіш	86-112
АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ПРОЦЕСТЕРДІ БАСҚАРУ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ АҚПАРАТТЫҚ ҚАУІПСІЗДІК ТАЛАПТАРЫН ЕНГІЗУ МӨСЕЛЕЛЕРІ	
Гулжанат Бекетова, Нартай Мухаметбай, Владислав Харлинский	113-123
ТҮЙІНДІ НҮКТЕЛЕР ӘДІСІ НЕГІЗІНДЕ БАЙЛАНЫСТЫ МУЛЬТИКОПТЕРДІҢ ТЕХНИКАЛЫҚ КӨРУ ЖҮЙЕСІ ҮШІН Ү-ДЕСКРИПТОРДЫ ӨЗІРЛЕУ	
Шингис Кадиркулов, Жанболат Оспанов, Аслан Анетбаев	124-153
ҰШҚЫШСЫЗ ҰШАТЫН АППАРАТТАРДЫҢ ЗЕРУҚКА ҚАРСЫ ҚОРҒАНЫС ЖҮЙЕСІНДЕГІ РӨЛІ	
Максат Кизаев, Бахытжан Керимбаев	154-161

КОМПЬЮТЕРЛІК ҒЫЛЫМДАРДЫҢ ПӘНАРАЛЫҚ ҚОЛДАНЫЛУЫ

ӘСКЕРИ ЖӘНЕ АЗАМАТТЫҚ ОҒАЛТУ МАҚСАТТАРЫНА АРНАЛҒАН ЖОҒАРҒЫ АЯҚ-ҚОЛДЫҢ БИОНИКАЛЫҚ ПРОТЕЗІН БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІНІҢ АППАРАТТЫҚ АРХИТЕКТУРАСЫН ӨЗІРЛЕУ	
Ерболат Игембай, Айман Ожикенова, Асылбек Өжікен	162-179
ЖЕДЕЛ ЖӘРДЕМ КӨЛІКТЕРІНЕ БАСЫМДЫҚПЕН ҚОЛ ЖЕТКІЗЕ ОТЫРЫП, МАҢЫЗДЫ ИНФРАҚҰРЫЛЫМҒА ҚОЛ ЖЕТКІЗУДІ БАСҚАРУДЫҢ ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ ЖҮЙЕСІН ӨЗІРЛЕУ	
Али Карим, Ерсұлтан Бұйраш, Николай Ремер	180-203
КОМПАНИЯЛАРДЫҢ ҚАРЖЫЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІН МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ ЖӘНЕ УАҚЫТ ҚАТАРЛАРЫН ТАЛДАУ ӘДІСТЕРІ НЕГІЗІНДЕ БОЛЖАУ	
Аяғоз Имансакипова, Дария Молдаш, Үміт Пайыз	204-214



СОДЕРЖАНИЕ

ВОЕННОЕ ДЕЛО

РАЗРАБОТКА МОДУЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЫ ИНЖЕНЕРНОГО ПРОТОТИПА БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ КОМПАКТНЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ПЛАТФОРМ	
Еркебулан Нұрғизат, Дархан Ахмедиев	8-22
СИСТЕМА ПОДГОТОВКИ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ ВОЕННОГО ВУЗА К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕСУРСОВ ПЕДАГОГИЧЕСКОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПАРКА	
Бауржан Жексенбинов	23-33
ОРКЕСТРАЦИЯ АДАПТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ СОСТОЯНИЯ В ДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКАХ ДАННЫХ ДЛЯ ВОЕННЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ	
Венера Рыстыгулова, Айгуль Абильдина, Бауыржан Абжанов	34-51
СБОР И ПРЕДОБРАБОТКА ДАННЫХ С SWIR-КАМЕР ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ	
Абу-Алим Аязбай, Арман Узбекбаев, Ғани Сергазин	52-64
РАЗРАБОТКА ИНТЕГРАЦИОННОГО ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ БЕЗОПАСНОГО ХРАНЕНИЯ И ОБМЕНА ДАННЫМИ НА ОСНОВЕ БЛОКЧЕЙН	
Жанна Есенғалиева, Ольга Усатова, Аида Есенғалиева	65-74
ПОСТРОЕНИЕ РЕШЕТОЧНЫЕ ВЕКТОРНЫЕ КОММИТМЕНТЫ ДЛЯ VERKLE- СТРУКТУР	
Күнболат Алғазы, Еркебулан Әлімжан, Қайрат Сақан	75-85
РАЗРАБОТКА GIS-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗОН ПАДЕНИЯ ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ СТУПЕНЕЙ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ	
Алия Калижанова, Мурат Кунелбаев, Серік Дәруіш	86-112
ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ	
Гулжанат Бекетова, Нартай Мухаметбай, Владислав Харлинский	113-123
РАЗРАБОТКА Y-ДЕСКРИПТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ПРИВЯЗНОГО МУЛЬТИКОПТЕРА НА ОСНОВЕ МЕТОДА КЛЮЧЕВЫХ ТОЧЕК	124-153
Шингис Кадиркулов, Жанболат Оспанов, Аслан Анетбаев	
РОЛЬ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В СИСТЕМЕ ПРОТИВОВОЗДУШНОЙ ОБОРОНЫ	
Максат Кизаев, Бахытжан Керимбаев	154-161

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ НАУК

РАЗРАБОТКА АППАРАТНОЙ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БИОНИЧЕСКИМ ПРОТЕЗОМ ВЕРХНЕЙ КОНЕЧНОСТИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ВОЕННОЙ И ГРАЖДАНСКОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ	
Ерболат Игембай, Айман Ожикенова, Асылбек Өжікен	162-179
РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ К КРИТИЧЕСКИ ВАЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ С ПРИОРИТЕТНЫМ ДОСТУПОМ К ТРАНСПОРТНЫМ СРЕДСТВАМ СКОРОЙ ПОМОЩИ	
Али Карим, Ерсұлтан Буйраш, Николай Ремер	180-203
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФИНАНСОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОМПАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ	
Аяғоз Имансакипова, Дария Молдаш, Үміт Пайыз	204-214

**CONTENT****MILITARY AFFAIRS**

DEVELOPMENT OF A MODULAR ARCHITECTURE FOR AN ENGINEERING PROTOTYPE OF AN ONBOARD CONTROL SYSTEM FOR COMPACT AEROSPACE PLATFORMS	
Yerkebulan Nurgizat, Darkhan Akhmediyev	8-22
SYSTEM OF TRAINING TEACHERS OF A MILITARY UNIVERSITY FOR THE USE OF PEDAGOGICAL TECHNOLOGY PARK RESOURCES	
Baurzhan Zheksenbinov	23-33
STATE-DRIVEN ADAPTIVE MODEL ORCHESTRATION IN DYNAMIC DATA STREAMS FOR MILITARY APPLICATIONS	
Venera Rystygulova, Aigul Abildina, Bauyrzhan Abzhanov	34-51
COLLECTION AND PREPROCESSING OF DATA FROM SWIR CAMERAS FOR TRAINING A NEURAL NETWORK FOR OBJECT RECOGNITION	
Abu-Alim Ayazbay, Arman Uzbekbayev, Gani Sergazin	52-64
DEVELOPMENT OF AN INTEGRATION SOFTWARE MODULE FOR SECURE STORAGE AND DATA EXCHANGE BASED ON BLOCKCHAIN	
Zhanna Yessengaliyeva, Olga Ussatova, Aida Yessengaliyeva	65-74
CONSTRUCTION OF LATTICE-BASED VECTOR COMMITMENTS FOR VERKLE STRUCTURES	
Kunbolat Algazy, Yerkebulan Alimzhan, Kairat Sakan	75-85
DEVELOPMENT OF A GIS-BASED METHODOLOGY FOR PREDICTING THE IMPACT ZONES OF SEPARATING STAGES OF A LAUNCH VEHICLE	
Aliya Kalizhanova, Murat Kunelbayev, Serik Daruish	86-112
PROBLEMS OF IMPLEMENTING INFORMATION SECURITY REQUIREMENTS IN INDUSTRIAL CONTROL SYSTEMS	
Gulzhanat Beketova, Nartai Mukhametbai, Vladislav Kharlinskiy	113-123
DEVELOPMENT OF A Ψ -DESCRIPTOR FOR THE COMPUTER VISION SYSTEM OF A TETHERED MULTICOPTER BASED ON THE KEYPOINT METHOD	
Shyngys Kadirkulov, Zhanbolat Ospanov, Aslan Anetbaev	124-153
ROLE OF UNPLOTTED FLIGHTING APPARATES IN THE SYSTEM OF ANTI-VOLANCE ROAD	
Maksat Kizayev, Bakytzhan Kerimbayev	154-161

INTERDISCIPLINARY APPLICATIONS OF COMPUTER SCIENCE

DEVELOPMENT OF A HARDWARE ARCHITECTURE FOR AN UPPER-LIMB BIONIC PROSTHESIS CONTROL SYSTEM FOR MILITARY AND CIVILIAN REHABILITATION APPLICATIONS	
Yerbolat Igembai, Aiman Ozhikenova, Assylbek Ozhiken	162-179
DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT ACCESS CONTROL SYSTEM FOR CRITICAL INFRASTRUCTURE WITH PRIORITY ACCESS FOR EMERGENCY VEHICLES	
Ali Karim, Yersultan Buirash, Nikolay Remer	180-203
FORECASTING CORPORATE FINANCIAL PERFORMANCE USING MACHINE LEARNING METHODS AND TIME SERIES ANALYSIS	
Ayagoz Imansakipova, Daria Moldash, Umit Payiz	204-214



Е.С. Нұрғизат¹, Д.М. Ахмедиев²

¹Energo University, Алматы, Казахстан

²National Defense University of the Republic of Kazakhstan, Астана, Казахстан

E-mail: y.nurgizat@aes.kz

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОДУЛЬНОЙ АРХИТЕКТУРЫ ИНЖЕНЕРНОГО ПРОТОТИПА БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ КОМПАКТНЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ПЛАТФОРМ

Аннотация. Создание малогабаритной бортовой системы управления для высокодинамичных аэрокосмических платформ связано с необходимостью совместной работы вычислительных, измерительных, силовых и интерфейсных узлов при строгих ограничениях по массе, габаритам, устойчивости электропитания и удобству обслуживания. В статье предложена модульная встроенная архитектура инженерного прототипа бортовой системы управления, рассчитанная на исследовательскую проверку, стендовую отработку и последующую поэтапную оптимизацию. Основу платформы составляет четырехблочная структура, объединяющая вычислительный модуль, сенсорный модуль, блок стабилизации питания и модуль выходных интерфейсов. Основное внимание уделено логике построения архитектуры, назначению отдельных подсистем, их реализации на уровне печатных плат, а также конструкторским решениям, обеспечивающим модульность, электромагнитную совместимость, ремонтпригодность и возможность дальнейшего расширения. Полученная архитектура формирует воспроизводимую электронную основу для калибровки датчиков, проверки интерфейсов, разработки программного обеспечения и проведения стендовых испытаний. Тесты подтвердили, что выбранная модульная схема жизнеспособна. На её базе можно проводить дальнейшие исследования и создавать компактную бортовую электронику для аэрокосмической и оборонной сфер.

Ключевые слова: бортовые компьютеры, модульные встроенные системы, аэрокосмическая электроника, питание авионики, инженерный прототип, компактная авионика.

Введение.

Компактные бортовые системы управления — это критически важный узел современных летательных аппаратов. Именно бортовая электроника должна работать в условиях жесткого дефицита пространства, сильных вибраций и нестабильного электромагнитного фона. При этом эффективность системы зависит не только от мощности процессора.



Огромную роль играют четкое согласование всех подсистем [1, 2], стабильность линий питания, целостность сигналов и удобная диагностика. В оборонных аэрокосмических проектах эти требования становятся жестче: аппаратура обязана безотказно работать при сильных механических нагрузках, высоком уровне помех и экстремальной плотности компоновки.

На предварительных стадиях проектирования инженерный прототип выполняет роль промежуточной платформы между расчетной концепцией и экспериментальной проверкой [3]. С его помощью можно заранее оценить электрическую и функциональную совместимость модулей, обнаружить проблемы интеграции и получить устойчивую аппаратную основу для разработки программного обеспечения.

В настоящей работе предложена модульная встроенная архитектура инженерного прототипа бортовой системы управления [4, 5] для компактной аэрокосмической платформы с высокими динамическими нагрузками. Основная идея заключается в разделении базовых бортовых функций [6-8] на самостоятельные, но взаимосвязанные электронные узлы. Такое построение упрощает обслуживание, ускоряет последовательную наладку и создает условия для дальнейшей модернизации аппаратной или программной части без полного пересмотра всей системы.

Материалы и методы.

1.1. Цель исследования, расчетные допущения и исходные параметры.

Для синтеза и первичной проверки бортового комплекса управления (БКУ) использованы параметры типового артиллерийского снаряда: масса $m = 69$ кг, начальная скорость $v_0 = 690$ м/с, угол пуска $\theta_0 = 45^\circ$, коэффициент лобового сопротивления $C_d = 0,1$ и плотность воздуха $\rho = 1,225$ кг/м³. Номинальная траектория рассчитывалась для стационарной однородной атмосферы [9], без учета ветра и барометрических возмущений. Такой подход позволяет отдельно рассмотреть базовую баллистику и оценить влияние управляющих воздействий. Назначение БКУ состоит в снижении отклонения от заданной траектории в режиме реального времени [10] за счет малых аэродинамических отклонений рулевых органов с эффективным диапазоном коррекции до $\pm 7,5^\circ$. Функционально система организована как последовательность «сенсоры → оценка состояния → закон управления → исполнительные приводы».

1.2. Состав модулей и особенности электрической реализации плат.

Вычислительный узел формирует шину 3,3 В для цифровой логики, обеспечивает работу микроконтроллера STM32 в корпусе LQFP-100, его тактирование и аппаратный сброс, а также поддерживает основные коммуникационные и отладочные каналы: USB-FS через разъем USB Type-C, UART, SPI, I²C, SDIO и Quad-SPI. На плате предусмотрены разъемы для подключения измерительных устройств и исполнительных механизмов, а общая компоновка подчинена модульной схеме «MCU-INS-Power-Actuators» (рисунки 1-2).

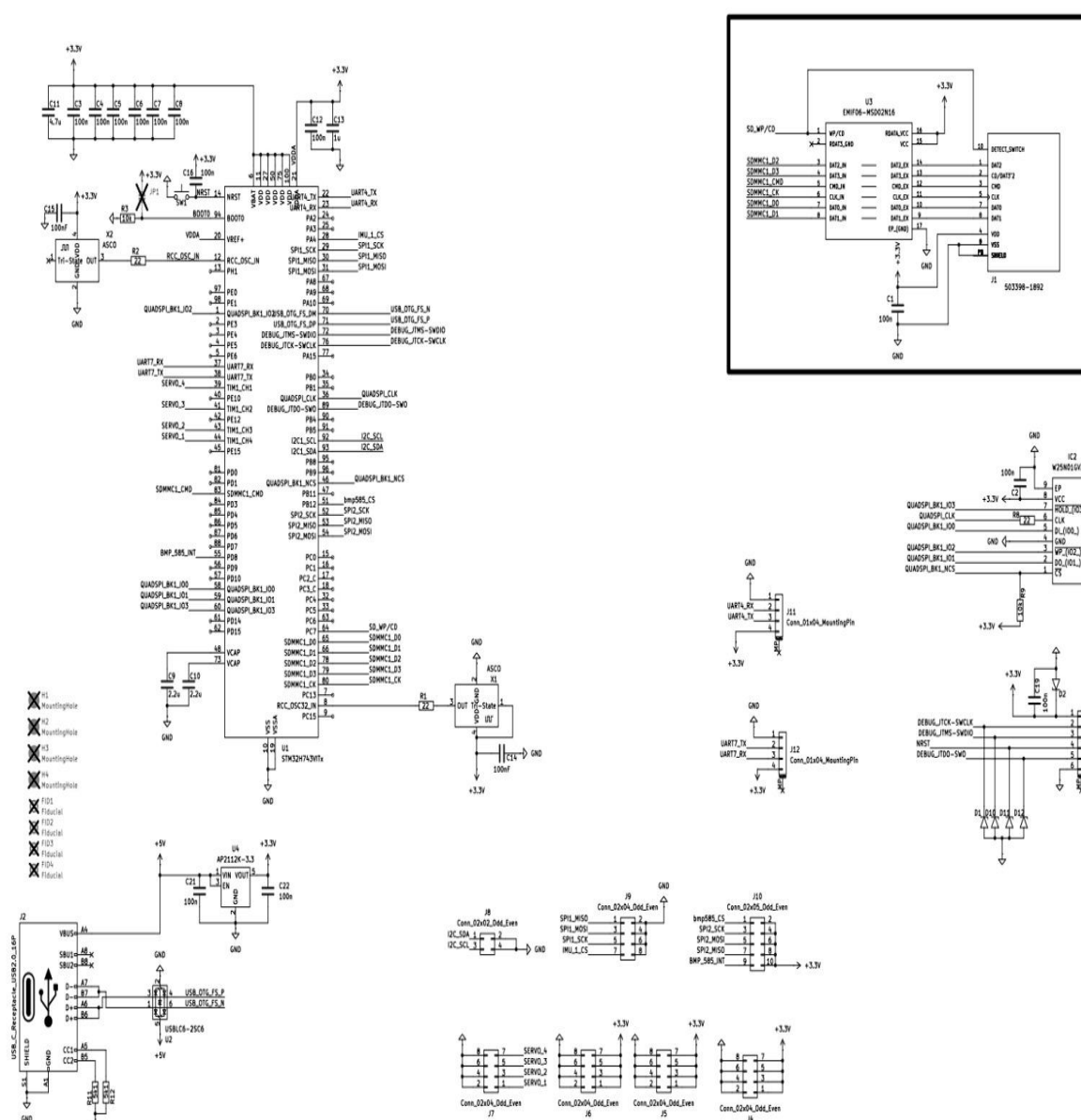


Рисунок 1 - Электрическая схема вычислительного модуля MCU

Питание 5 В преобразуется до системного уровня +3,3 В с помощью импульсного понижающего стабилизатора. Для снижения помех и локальной стабилизации напряжения применено каскадное развязывание: возле выводов VDD микроконтроллера установлены керамические конденсаторы 100 нФ, а в отдельных зонах платы размещены накопительные емкости 4,7-22 мкФ. Аналоговая область VDDA отделена RC-фильтром. Для контроля состояния питания предусмотрены тестовые точки и LED-индикация линий 5 В и 3,3 В. Выводы STM32 разведены под типовые периферийные блоки USART/UART, SPI, I²C, SDMMC/SDIO, QUADSPI, таймеры/PWM и EXTI. Цепь NRST дополнена подтяжкой и кнопкой сброса, BOOT0 зафиксирован через pull-down, а VCAP стабилизирован в соответствии с требованиями производителя. Тактирование выполнено от HSE-кварца с согласующими

емкостями и, при необходимости, от LSE 32,768 кГц; линии генераторов имеют минимальную длину. Для программирования и диагностики выведен интерфейс SWD/JTAG 2×5 с шагом 1,27 мм, при этом сигнальные линии проходят над сплошным опорным слоем GND. USB-линии D+/D– подключены как дифференциальная пара с ESD-защитой и корректной конфигурацией CC1/CC2; под ними сохранен непрерывный экран земли. Интерфейс SDIO разведен к слоту microSD с линиями CLK, CMD и D0-D3 и обязательными подтяжками, а QSPI выведен на колодку для внешней флэш-памяти. Это позволяет расширить доступное кодовое пространство без перегрузки внутренней памяти микроконтроллера. Последовательные шины UART, SPI и I²C, а также линии прерываний датчиков выведены на отдельные колодки и входы EXTI для событийной выборки. Входные цепи снабжены ESD-защитой, силовые LC-контуры размещены с минимальной «горячей» петель, что соответствует требованиям электромагнитной совместимости.

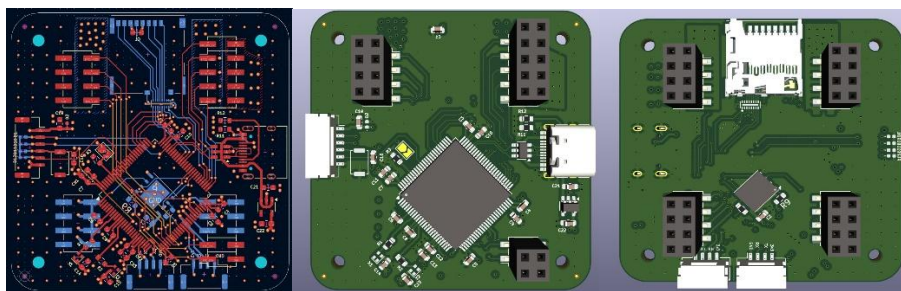


Рисунок 2 - 3D-модель вычислительного модуля MCU

1.3. Сенсорный модуль.

Сенсорный модуль спроектирован как малогабаритная измерительная подсистема, объединяющая функции регистрации движения и параметров окружающей среды в составе бортовой электронной платформы. Для инженерных прототипов аэрокосмической аппаратуры такая подсистема является особенно чувствительной к компоновке, качеству питания, непрерывности земли и механическому положению измерительных элементов [11].

Печатная плата рассчитана на работу с несколькими измерительными каналами при сохранении компактного форм-фактора и совместимости с вычислительным модулем. При трассировке учитывались снижение паразитных связей, сохранение качества внутренних сигналов и единая ориентация сенсорных корпусов относительно принятой системы координат.

В рамках данной работы сенсорный модуль рассматривается прежде всего как исследовательская аппаратная база. Его задача заключается не в окончательном подтверждении всех метрологических характеристик во всех режимах эксплуатации, а в обеспечении устойчивой платформы для последующей калибровки, анализа параметров и интеграционных экспериментов.

В состав сенсорного узла входят три инерциальных элемента класса LSM6DS, объединяющих акселерометр и гироскоп, подключенные по SPI с независимыми линиями CS и INT1/INT2. Дополнительно предусмотрены магнитометр-акселерометр LSM303AGR по I²C с линиями INT_MAG/DRDY и барометр BMP585 с возможностью работы по SPI/I²C и опциональной линией прерывания (рисунки 3-4). Питание датчиков фильтруется на уровне 3,3 В, трассы к MEMS-компонентам выполнены короткими и симметричными, под корпусами сохранен сплошной GND-экран. Корпуса датчиков ориентированы согласованно, а разъемы вынесены на одну сторону платы для прямого шлейфового соединения с MCU.

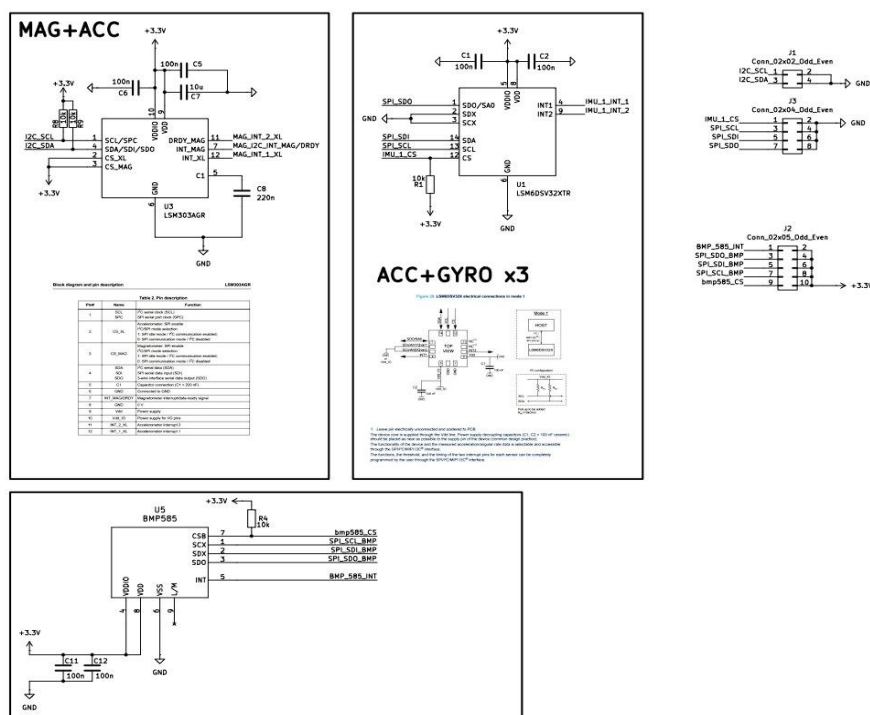


Рисунок 3 - Электрическая схема сенсорного модуля

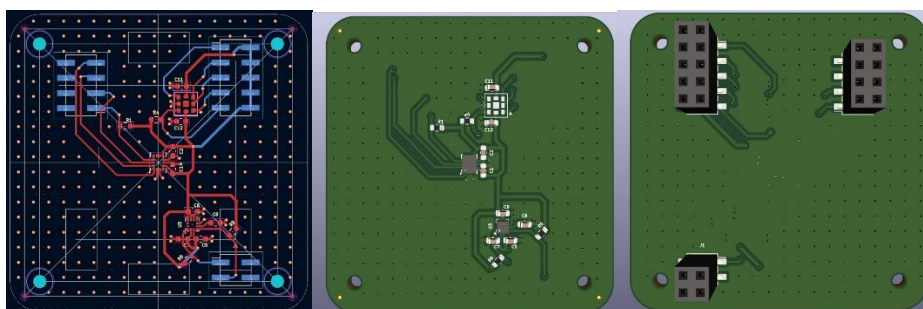


Рисунок 4 - 3D-модель сенсорного модуля (вид снизу)

Блок питания формирует две стабилизированные линии: +3,3 В для цифровой логики и датчиков, а также +5 В для исполнительных приводов. В схему включены контроль входного напряжения и индикация исправности

(рисунки 5-6). Линия +3,3 В реализована на базе TPS62130 с укороченной «горячей» петлей SW-L-CIN/COUТ и близко расположенными входными и выходными конденсаторами; делитель обратной связи задает требуемый уровень напряжения, а вход EN позволяет управлять запуском. Линия +5 В поддерживается повышающим преобразователем MCP16411, что уменьшает риск просадок при кратковременных пиковых токах сервоприводов. LC-фильтр и делитель Vfb обеспечивают снижение пульсаций и стабилизацию 5,0 В, при этом вход EN допускает программное отключение канала. Входное напряжение передается на измерительный делитель для последующего контроля через АЦП микроконтроллера. Питание распределяется через отдельные колодки, а силовые ветви к сервоприводам выполнены по «лучевой» схеме с локальными накопительными емкостями у разъемов. Сплошной слой GND прошит переходными отверстиями, силовые зоны вынесены от области датчиков. В расчетном режиме суммарные потери преобразователей не превышают около 1 Вт; пульсации составляют не более 50-80 mVpp на линии 3,3 В при 0,5 А и 100-150 mVpp на линии 5 В при 1,5 А.

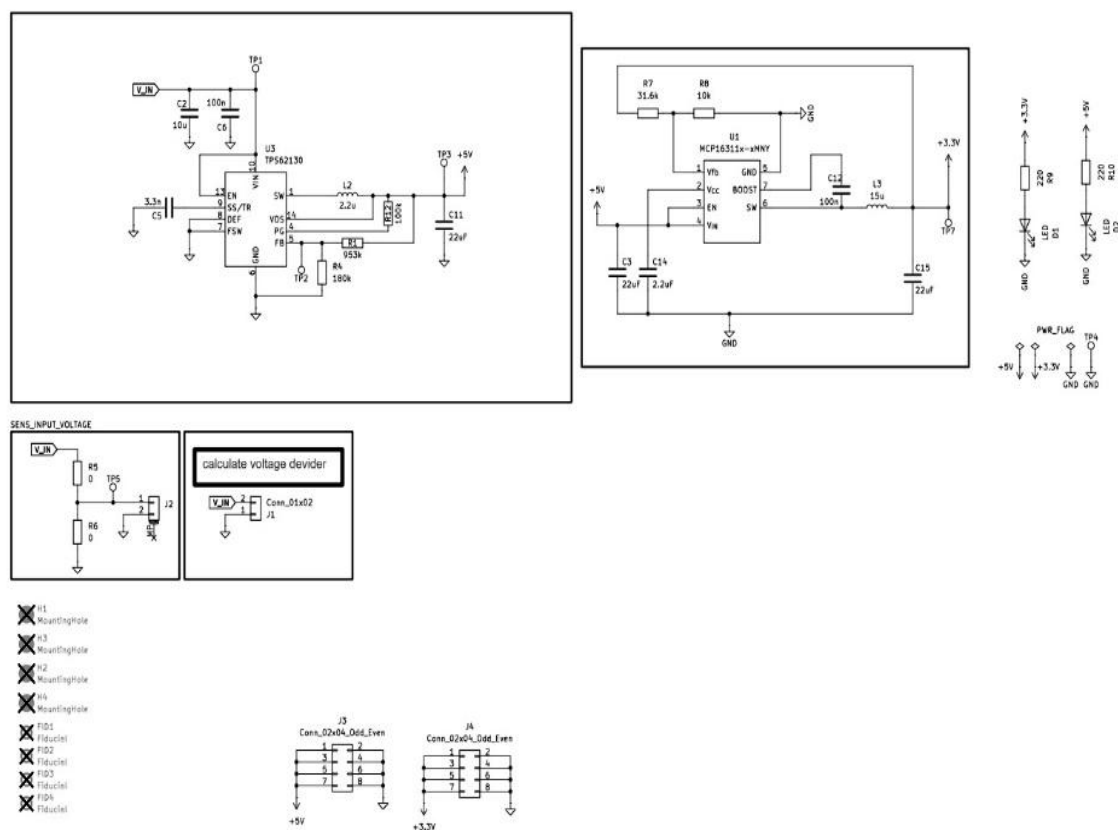


Рисунок 5 - Электрическая схема блока питания

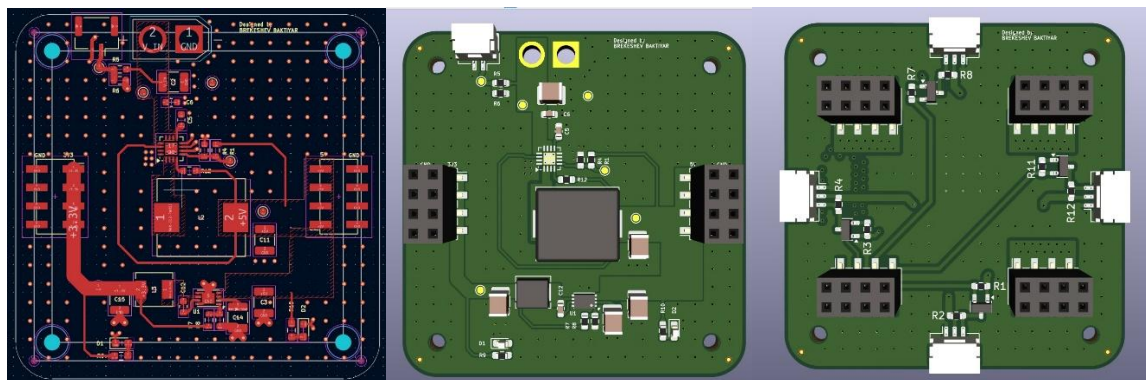


Рисунок 6 - 3D-модель блока питания

1.4. Модуль выходных интерфейсов.

Во время инженерной проверки модуль выходных интерфейсов выполняет роль переходного звена между низковольтной встроенной электроникой и внешними подключаемыми устройствами. На текущем этапе его следует рассматривать как интерфейсную подсистему, обеспечивающую согласование каналов, а не как конечный функциональный блок с фиксированным назначением [12].

Назначение модуля заключается в обеспечении электрической и логической совместимости внутренних сигналов с внешними цепями, а также в упрощении подключения компонентов при оценке прототипа. Благодаря этому вся встроенная платформа может проверяться как единая система, а не как набор разрозненных электронных узлов.

Отдельное исполнение выходного интерфейса повышает гибкость дальнейших доработок. Если в последующих экспериментах потребуется подключить другие исполнительные устройства или изменить логику связи, модернизация может быть выполнена на уровне данного модуля без переработки всей электронной платформы.

Модуль приводов содержит четыре канала управления сервомашинами SERVO_1...SERVO_4 при логическом уровне 3,3 В и выходном уровне 5 В (рисунки 7-8). В каждом канале используется n-канальный MOSFET в схеме «открытого стока» с резистором в цепи затвора, что ограничивает зарядно-разрядные токи и снижает выбросы на фронтах сигнала. Сигнальная линия подтянута к +5 В: при закрытом ключе формируется логическая «1», а при открытом - «0». Такое решение решает сразу три задачи: согласует уровни, частично развязывает логическую и силовую части по постоянному току и повышает помехоустойчивость ШИМ-сигналов. Разъемы J1-J4 используют стандартную распиновку сервопривода: +5V, GND и PWM.

Оптимальная частота управления составляет 50-300 Гц, а длительность импульса - от 1,0 до 2,0 мс (нейтральное положение - около 1,5 мс). Силовая линия 5 В разведена к каждому разъему отдельной веткой и усилена локальными сглаживающими конденсаторами.

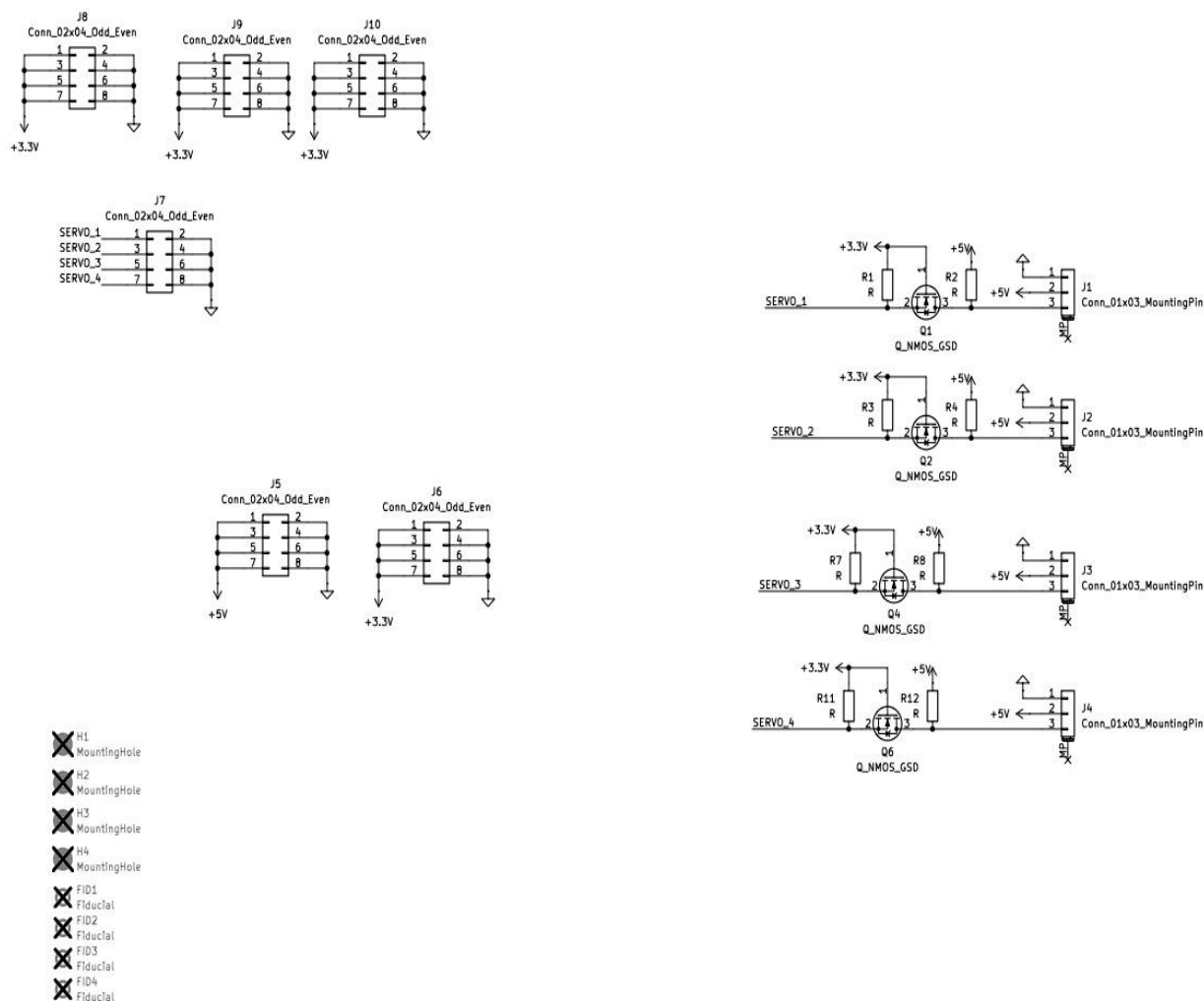


Рисунок 7 - Электрическая схема модуля приводов

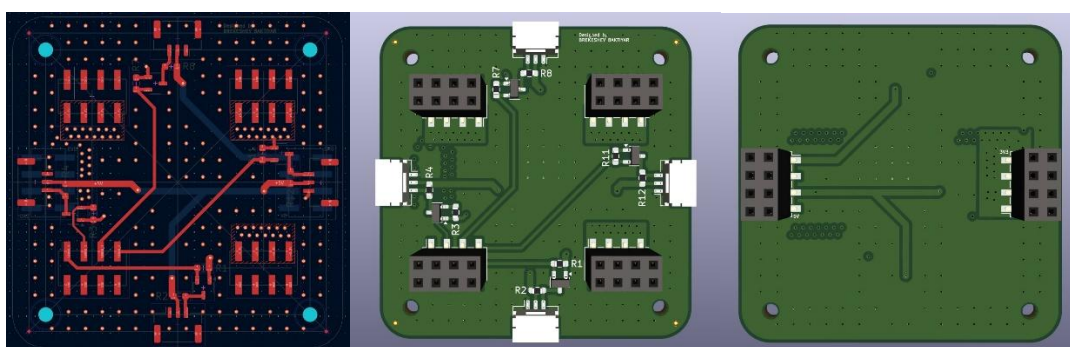


Рисунок 8 - 3D-модель модуля приводов

1.5. Изготовление и предварительная проверка.

На основе разработанных схем и топологии мы изготовили опытные печатные платы, после чего собрали их в единый модульный блок. Перед запуском провели первичную проверку: оценили качество пайки, проверили соосность разъемов, монтажные отверстия и тестовые площадки, а также убедились, что платы полностью готовы к сборке. Серия плат

унифицированного форм-фактора подтвердила, что аппаратная часть подготовлена к последующим стендовым испытаниям. На фотоматериалах представлены сенсорная плата с компактной разводкой к MEMS-компонентам и экранирующим GND-полигоном, вычислительный модуль MCU с USB-C, SWD и шлейфовыми разъемами, блок питания с DC/DC-преобразователями и дросселем, а также плата приводов с четырьмя разъемами сервомашин. Электрическая стыковка модулей с сервоприводами показывает корректное согласование уровней 3,3→5 В и готовность системы к вертикальной сборке по принципу «стека».

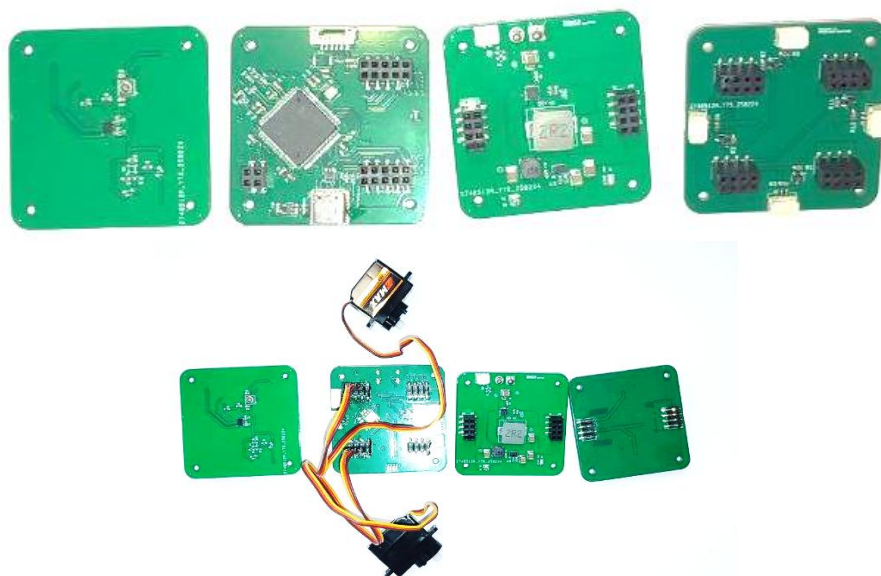


Рисунок 9 - Серия изготовленных плат БКУ и электрическая стыковка с сервоприводами

Результаты и обсуждение.

В ходе исследования была сформирована и реализована модульная архитектура инженерного прототипа бортовой системы управления, предназначенной для компактных аэрокосмических платформ. Предложенное решение основано на функциональном разделении аппаратной части на четыре согласованных электронных модуля: вычислительный блок, сенсорный узел, модуль стабилизации питания и блок выходных интерфейсов. Благодаря этому БСУ рассматривается не как единая монолитная печатная плата, а как совокупность самостоятельных подсистем, каждая из которых выполняет собственную инженерную функцию и при этом работает в составе общей платформы.

Архитектура, представленная на рисунке 10, реализует принцип «MCU-INS-Power-Actuators». В рамках этой архитектуры сенсорный модуль собирает первичные данные, а вычислительный - обрабатывает их и формирует команды. Блок питания обеспечивает стабильное напряжение для логики и периферии, а модуль интерфейсов согласует управляющие сигналы

с сервоприводами. Такая схема делает систему гибкой: её гораздо проще отлаживать, обслуживать и модернизировать.

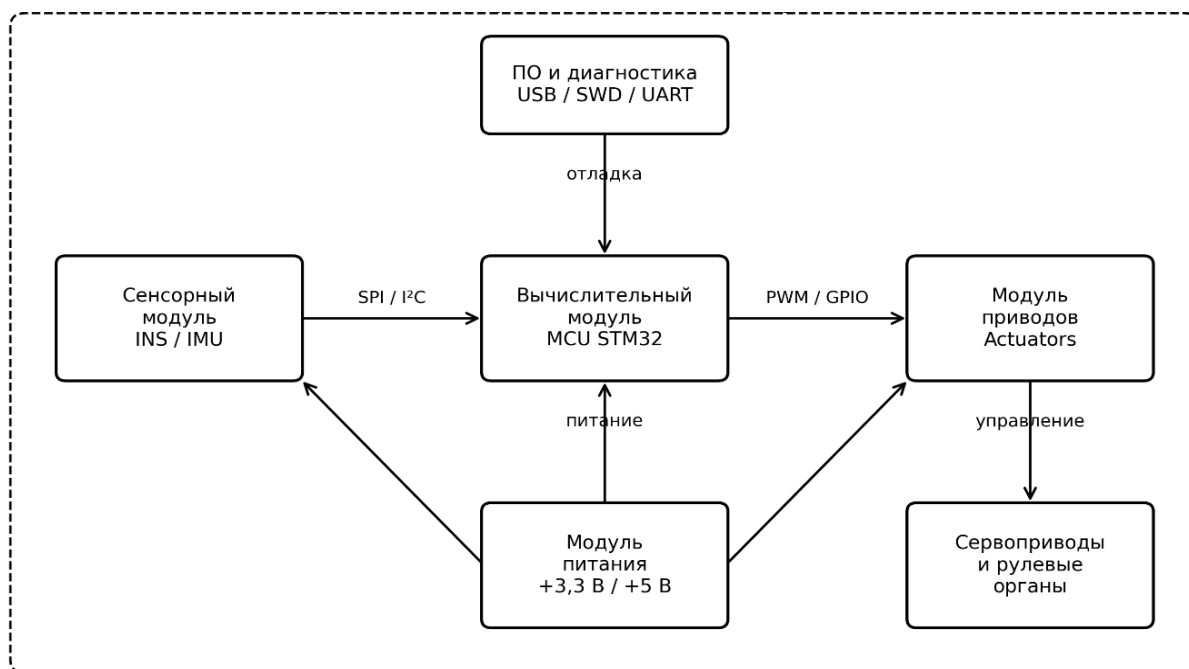


Рисунок 10 - Функциональная схема модульной архитектуры БСУ «MCU-INS-Power-Actuators»

Вычислительный модуль на базе микроконтроллера STM32 служит центральным узлом управления. Он собирает данные с датчиков, обрабатывает их, формирует управляющие команды и отвечает за связь с внешними системами диагностики. Богатый набор интерфейсов (UART, SPI, I²C, SDIO, Quad-SPI, USB-FS и SWD/JTAG) дает отличную базу для программирования, отладки и наращивания функций прототипа в будущем.

Сенсорный модуль вынесен в отдельную измерительную подсистему. На нем установлены инерциальные датчики, магнитометр-акселерометр и барометр. Размещение этих элементов на отдельной плате изолирует измерительные каналы от наводок со стороны силовых цепей, упрощает разводку сигнальных линий и позволяет одинаково сориентировать все датчики в пространстве. Это критически важно для точной калибровки и корректной работы алгоритмов ориентации и управления.

Модуль питания выдает стабильные напряжения +3,3 В и +5 В, необходимые для цифровой логики, датчиков и приводов. При его проектировании мы уделили особое внимание снижению пульсаций, локальному накоплению энергии и пространственному разделению силовых и сигнальных зон. В результате удалось защитить чувствительные компоненты от пиковых токов сервоприводов и повысить общую стабильность платформы.

Модуль выходных интерфейсов электрически согласует команды микроконтроллера с исполнительными механизмами. Схема преобразования



уровней (с 3,3 В до 5 В) позволяет напрямую подключать сервоприводы к вычислительному модулю и тестировать каналы управления внутри единой системы. Благодаря этому прототип можно проверять как целостное устройство, а не как разрозненный набор плат.

Практическим результатом работы стала серия опытных печатных плат, выполненных в едином форм-факторе. В нее вошли вычислительный модуль, сенсорная плата, блок питания и модуль управления приводами. При первичной проверке было установлено, что выбранная компоновка соответствует заложенной модульной схеме: на платах предусмотрены необходимые разъемы, контрольные точки и крепежные элементы. Пробное соединение модулей с исполнительными устройствами показало, что разработанную систему можно собрать в единый электронный блок и использовать для дальнейших стендовых испытаний.

Одним из наиболее важных преимуществ предложенного решения является его модульность. Разделение функций между отдельными платами упрощает поиск возможных неисправностей, облегчает обслуживание и позволяет дорабатывать отдельный узел без переработки всей аппаратной части. Для инженерного прототипа это особенно важно, поскольку на этапе испытаний часто возникает необходимость изменить компоновку, заменить отдельный компонент или адаптировать систему под новый режим проверки.

В ходе работы также удалось найти разумный компромисс между компактностью и удобством обслуживания. Полное объединение всех функций на одной плате усложнило бы диагностику и последующую модернизацию, а чрезмерное разделение модулей увеличило бы количество соединений и сделало бы сборку менее надежной. Поэтому выбранная архитектура сохраняет самостоятельность каждого функционального блока, но при этом позволяет объединить их в компактную платформу, пригодную для размещения в ограниченном внутреннем объеме аэрокосмической системы.

Работа над прототипом показала, что надежность бортовой электроники зависит не только от выбранного микроконтроллера, датчиков или алгоритмов управления. В реальной разработке большое значение имеют и более практические вещи: как разведены печатные платы, насколько устойчиво организовано питание, как построены интерфейсы между модулями, защищена ли система от электромагнитных помех и удобно ли ее проверять на стенде. Для компактных аэрокосмических платформ это особенно важно, потому что вся аппаратура размещается в ограниченном объеме и должна работать при вибрации, помехах и повышенных требованиях к надежности.

Созданный образец пока следует рассматривать именно как инженерный прототип, а не как полностью завершенное изделие. На данном этапе удалось подтвердить, что выбранная модульная архитектура работоспособна, основные подсистемы совместимы между собой, а сама платформа готова к



дальнейшим стендовым испытаниям. В следующих этапах работы необходимо более подробно оценить задержки прохождения сигналов, устойчивость к вибрациям, тепловой режим, электромагнитную совместимость и долговременную надежность системы.

Заключение.

Работа подтвердила, что модульная архитектура БКУ «MCU-INS-Power-Actuators» полностью готова к практике и может использоваться для коррекции траектории с отклонением рулевых органов до $\pm 7,5^\circ$. Мы разработали и собрали линейку унифицированных плат: вычислительный модуль, сенсорный узел (IMU/магнитометр/барометр), блок питания на +3,3 В и +5 В, а также плату управления сервоприводами. Выбранная компоновка сделала систему ремонтпригодной, помехозащищенной и удобной для стендовых тестов. Отладка показала, что шины питания стабильно работают при среднем токе до 1,5 А и выдерживают пики до 3 А по линии 5 В. При этом сквозная задержка от съема данных с датчиков до реакции привода не превышает 5-10 мс при частоте опроса IMU в 200-400 Гц.

Стековая компоновка в приборном отсеке под коническим обтекателем способствует центрированию масс, повышает механическую жесткость и экранирует чувствительные MEMS-элементы от силовых цепей, что уменьшает шумы измерений и улучшает устойчивость алгоритмов оценивания. Алгоритмическая часть, включающая комплементарную фильтрацию, EKF-аппроксимацию и закон управления с ограничителями, продемонстрировала корректную работу в SIL/HIL-сценариях, в том числе при деградационных режимах, таких как потеря GNSS и кратковременные просадки питания. Воспроизводимая архитектура плат может использоваться для калибровки, отладки, разработки программного обеспечения и поэтапной экспериментальной проверки. В целом результаты подтверждают практическую целесообразность модульного подхода и формируют технологическую основу для дальнейшего исследования характеристик подсистем, интегрированного тестирования и расширения встроенных функций.

Финансирование. Финансирование в рамках проекта AP22685171 «Разработка интеллектуального бортового комплекса управления реактивных снарядов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ғару, А., & Drăgulescu, A. M. (2025, December). IoT-enabled Integrated Avionic System for Supersonic Multi-purpose Rockets with Real-Time Telemetry and Autonomous Flight Control. In GLOBECOM 2025-2025 IEEE Global Communications Conference (pp. 2964-2969). IEEE.



2. Pingree, P. J. (2010). Advancing NASA's on-board processing capabilities with reconfigurable FPGA technologies. *Aerospace Technologies Advancements*, 69.
3. Delbecq, S. (2018). Knowledge-based multidisciplinary sizing and optimization of embedded mechatronic systems-application to aerospace electro-mechanical actuation systems (Doctoral dissertation, INSA de Toulouse).
4. Hojati, M., Saeed, M. S., Mukhopadhyay, S. C., & Reznik, M. (2025, September). A Scalable Hybrid FPGA-MCU Robotic Controller Board with Real-Time Sensor Fusion. In 2025 IEEE 14th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE) (pp. 308-312). IEEE.
5. Di Domenico, G., Perico, D., Ornati, F., Giordano, C., Morselli, A., Panicucci, P., & Topputo, F. (2025, March). The EXTREMA simulation hub: advancements in the development of an integrated hardware-in-the-loop facility for autonomous CubeSats GNC technologies. In *Small Satellites Systems and Services Symposium (4S 2024)* (Vol. 13546, pp. 1466-1489). SPIE.
6. Buticchi, G., Bozhko, S., Liserre, M., Wheeler, P., & Al-Haddad, K. (2018). On-board microgrids for the more electric aircraft-Technology review. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(7), 5588-5599.
7. Karhu, O. (2015). On-Board Electronic Control Systems of Future Automated Heavy Machinery.
8. Liang, G., Ijspeert, A. J., Yim, M., & Lam, T. L. (2026). Modular reconfigurable robots: Toward on-demand multifunctional applications. *Science Robotics*, 11(111), eadz1999.
9. Uno, K., Neppel, E., Diaz, G. H., Mishra, A., Karimov, S., Jain, A. S., ... & Yoshida, K. (2025). MoonBot: Modular and On-demand Reconfigurable Robot Towards Moon Base Construction. *IEEE Transactions on Field Robotics*.
10. Alle, N., Hiremath, S. S., Makaram, S., Subramaniam, K., & Talukdar, A. (2016). Review on electro hydrostatic actuator for flight control. *International Journal of Fluid Power*, 17(2), 125-145.
11. Watkins, C. B., & Walter, R. (2007, October). Transitioning from federated avionics architectures to integrated modular avionics. In 2007 IEEE/AIAA 26th Digital Avionics Systems Conference (pp. 2-A). IEEE.
12. Uruena, S., Pulido, J. A., López, J., Zamorano, J., & de la Puente, J. A. (2008, June). A new approach to memory partitioning in on-board spacecraft software. In *International Conference on Reliable Software Technologies* (pp. 1-14). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Еркебулан Нұрғизат, PhD, қауымдастырылған профессор, Energo University, Алматы, Қазақстан, y.nurgizat@aues.kz

Дархан Ахмедиев, Қазақстан Республикасы Қорғаныс министрінің цифрландыру жөніндегі орынбасары, National Defense University of the Republic of Kazakhstan, Астана, Қазақстан, Shyngyskhan1@gmail.com



ШАҒЫН АЭРОҒАРЫШТЫҚ ПЛАТФОРМАЛАРҒА АРНАЛҒАН БОРТТЫҚ БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІНІҢ ИНЖЕНЕРЛІК ПРОТОТИПІ ҮШІН МОДУЛЬДІК АРХИТЕКТУРАНЫ ЖОБАЛАУ

Аңдатпа. Жоғары динамикалық аэроғарыштық платформалар үшін шағын көлемді борттық басқару жүйесін құру массасы, өлшемдері, электр қуатының тұрақтылығы және қызмет көрсету ыңғайлылығы бойынша қатаң шектеулер кезінде есептеу, өлшеу, күш және интерфейс тораптарының бірлескен жұмысының қажеттілігімен байланысты. Мақалада зерттеуді тексеруге, стендтік пысықтауға және кейіннен кезең-кезеңімен оңтайландыруға арналған борттық басқару жүйесінің инженерлік прототипінің модульдік ендірілген архитектурасы ұсынылған. Платформаның негізі-есептеу модулін, сенсорлық модульді, қуатты тұрақтандыру блогын және шығыс интерфейс модулін біріктіретін төрт блокты құрылым. Архитектураны құру логикасына, жеке ішкі жүйелердің мақсатына, оларды плата деңгейінде іске асыруға, сондай-ақ модульділікті, электромагниттік үйлесімділікті, жөндеуге жарамдылықты және одан әрі кеңейту мүмкіндігін қамтамасыз ететін дизайн шешімдеріне назар аударылады. Алынған архитектура сенсорларды калибрлеу, интерфейстерді тексеру, бағдарламалық қамтамасыз етуді әзірлеу және стендтік сынақтар жүргізу үшін қайталанатын электрондық негізді құрайды. Тесттер таңдалған модульдік схеманың өміршең екенін растады. Оның негізінде қосымша зерттеулер жүргізуге және аэроғарыш пен қорғаныс салалары үшін ортам борттық электроника жасауға болады.

Түйінді сөздер: Борттық компьютерлер, модульдік кірістірілген жүйелер, аэроғарыштық электроника, авионика қоректенуі, инженерлік прототип, шағын авионика.

Yerkebulan Nurgizat, PhD, associate professor, Energo University, Almaty, Kazakhstan, y.nurgizat@aes.kz

Darkhan Akhmediyev, Deputy Minister of Defense of the Republic of Kazakhstan for digitalization, National Defense University of the Republic of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan, Shyngyskhan1@gmail.com

DESIGN OF A MODULAR ARCHITECTURE FOR AN ENGINEERING PROTOTYPE OF AN ONBOARD CONTROL SYSTEM FOR COMPACT AEROSPACE PLATFORMS

Abstract. The development of a compact onboard control system for highly dynamic aerospace platforms requires the coordinated operation of embedded computing, sensing, power-conditioning, and interface units under strict limitations on mass, dimensions, electrical stability, and serviceability. This paper proposes a



modular embedded architecture for an engineering prototype of an onboard control system intended for research verification, bench-level testing, and gradual experimental refinement. The platform is based on a four-module structure that includes a computing module, a sensor module, a power-conditioning module, and an output-interface module. The study considers the architectural rationale, subsystem functions, board-level implementation, and design decisions that support modularity, electromagnetic compatibility, maintainability, and further scalability. Tests have confirmed that the selected modular design is viable. It can serve as a technical baseline for further research and the development of compact onboard electronics for the aerospace and defense sectors.

Keywords: Onboard computers, modular embedded systems, aerospace electronics, avionics power supply, engineering prototype, compact avionics.

Поступила: 01 июня 2026 года

Рецензирована: 10 июня 2026 года

Принята: 10 июня 2026 года

**Б.Н. Жексенбинов**

National Defense University of the Republic of Kazakhstan,

Астана, Казахстан

E-mail: professor69@nuo.edu.kz

СИСТЕМА ПОДГОТОВКИ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ ВОЕННОГО ВУЗА К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕСУРСОВ ПЕДАГОГИЧЕСКОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПАРКА

Аннотация. В статье рассматривается система подготовки преподавателей военного вуза к использованию ресурсов педагогического технологического парка. Раскрыта необходимость перехода от разового освоения цифрового оборудования к устойчивой модели профессионального развития профессорско-преподавательского состава. Обоснованы целевой, содержательно-организационный, учебно-материальный и диагностический компоненты подготовки. Особое внимание уделено лабораториям IT, виртуальной и дополненной реальности, медиастудии, лаборатории инновационного обучения, а также применению инструментов искусственного интеллекта с учетом академической честности и информационной безопасности. Предложенная модель позволяет связать цифровые компетенции, методическое проектирование, практическую апробацию и диагностику готовности преподавателей к работе в современной образовательной среде военного вуза. Практическая значимость статьи состоит в описании понятного алгоритма подготовки, который может быть использован при организации курсов, семинаров и методического сопровождения преподавателей в реальных условиях цифровизации.

Исследование проведено в рамках реализации научного проекта грантового финансирования на 2024-2026 годы по теме Подготовка преподавателей к использованию ресурсов педагогического технопарка в образовательном процессе военного вуза, ИРН АР 23488037.

Ключевые слова: технопарк, военный вуз, преподаватель, цифровизация, компетенции, VR, AR, медиастудия, моделирование, диагностика, инновации, обучение, методика, готовность.

Введение.

Государственный запрос на инновации.

Современное военное образование развивается в условиях, когда профессиональная подготовка офицерских кадров уже не может ограничиваться традиционной лекцией, печатным учебником и эпизодическим применением презентаций. Цифровые ресурсы,



интерактивные формы обучения, виртуальное моделирование, медиаконтент и аналитические инструменты становятся частью обычной педагогической практики. В Послании Главы государства от 1 сентября 2023 года развитие инновационной инфраструктуры, технопарков, бизнес-инкубаторов, центров коммерциализации и конструкторских бюро обозначено как важное условие научно-технологического движения страны [1]. В контексте рассматриваемой проблемы это положение имеет прямое отношение и к военному вузу, поскольку подготовка военно-педагогических кадров требует не только обновления содержания обучения, но и создания новой образовательной среды.

Вместе с тем цифровизация сама по себе не гарантирует повышения качества подготовки. Наличие оборудования, лабораторий и программных продуктов дает результат только тогда, когда преподаватель понимает педагогический смысл этих ресурсов, умеет включать их в занятие, связывает их с целями дисциплины и оценивает полученный эффект. Государственные общеобязательные стандарты высшего и послевузовского образования ориентируют вузы на результаты обучения, компетентностный подход и качество образовательной программы [2]. При этом Военная доктрина Республики Казахстан подчеркивает значение совершенствования подготовки военных кадров и развития научно-методического обеспечения военного образования [3].

Наряду с этим военный вуз имеет свою специфику. Здесь преподаватель работает не просто с учебной информацией, а с будущими офицерами, для которых важны дисциплина мышления, ответственность, способность принимать решения, владение современными технологиями и понимание профессиональной среды. Поэтому педагогический технологический парк в военном вузе следует рассматривать не как демонстрационную площадку, а как практический механизм обновления учебного процесса. Он позволяет соединить лаборатории IT, VR/AR, медиастудию и инновационное обучение с реальными задачами подготовки.

Особое внимание следует уделить подготовке самого преподавателя. Даже хорошо оснащенная лаборатория остается пассивным ресурсом, если профессорско-преподавательский состав не владеет методикой ее применения. Практический анализ показывает, что преподавателю необходимы цифровые, коммуникативные, информационно-аналитические, методические и специально-профессиональные компетенции. Они формируются не одномоментно, а через поэтапное обучение, пробные занятия, экспертную обратную связь, самостоятельное проектирование и последующую диагностику.

Таким образом, возникает необходимость научно обосновать систему подготовки преподавателей военного вуза к использованию ресурсов педагогического технологического парка. Такая система должна включать цель, содержание, организацию, ресурсное обеспечение и диагностику готовности преподавателя к цифровой педагогической деятельности, а также



механизмы постоянного методического сопровождения в условиях обновления военного образования в реальной учебной практике военного вуза.

Материалы и методы.

Материалами исследования стали нормативные документы Республики Казахстан в сфере высшего, послевузовского и военного образования, научные труды по педагогическому моделированию, системному подходу, цифровым компетенциям преподавателя, профессиональному развитию в военном вузе и развитию цифровой образовательной среды. В работе использованы положения Послания Главы государства от 1 сентября 2023 года, государственные общеобязательные стандарты высшего и послевузовского образования, Военная доктрина Республики Казахстан, а также международные материалы UNESCO, Европейской комиссии и OECD [1; 2; 3; 4; 7; 8; 9; 10, 11].

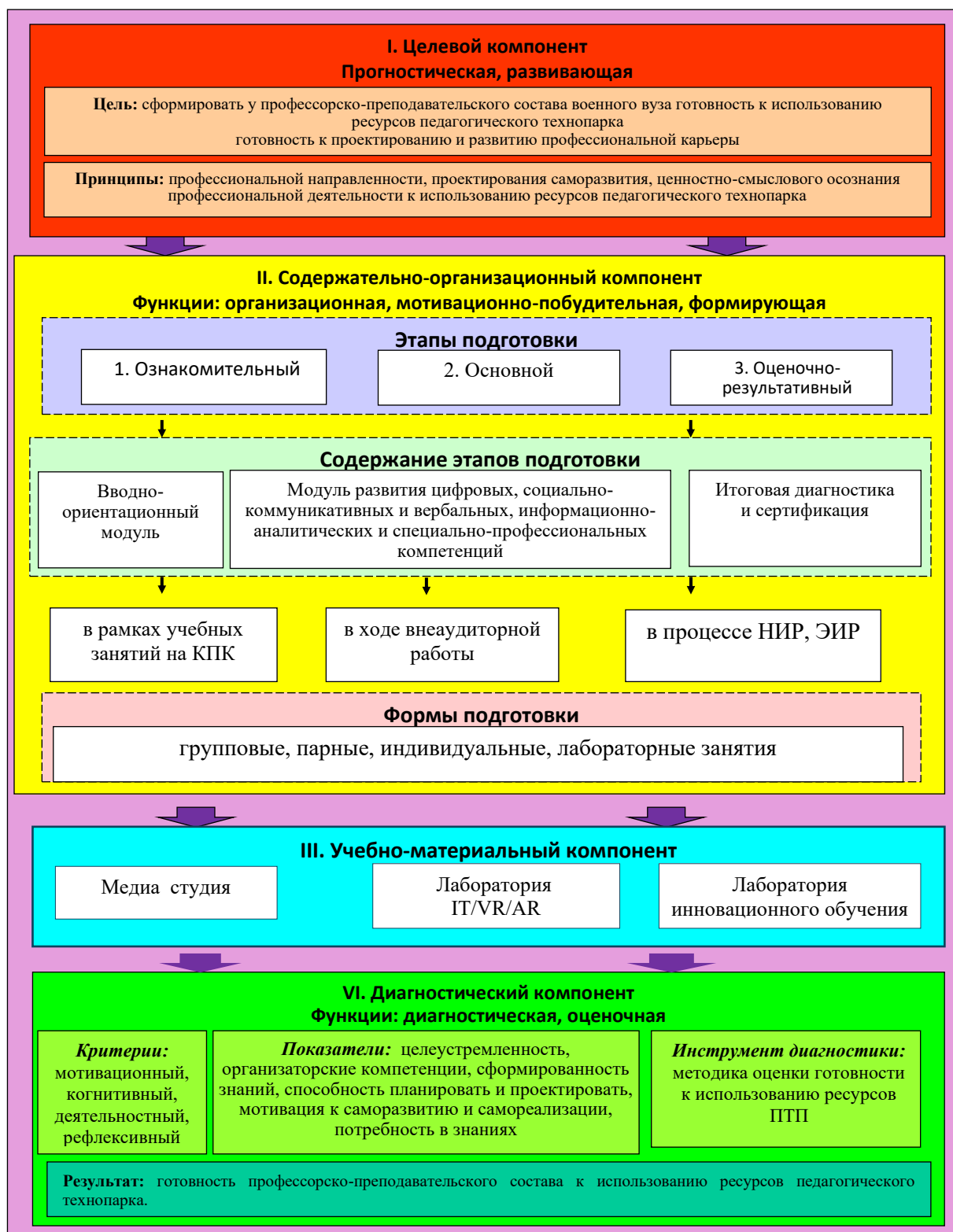
Методологическую основу составили системный, системно-деятельностный, компетентностный и практико-ориентированный подходы. В ходе исследования применялись анализ научной и нормативной литературы, сравнение, обобщение, конкретизация, педагогическое моделирование, структурирование компонентов системы, логико-смысловой анализ и проектирование модели подготовки. При этом моделирование использовалось как основной метод, позволяющий представить подготовку преподавателей в виде целостной педагогической конструкции, определить ее элементы, связи, этапы и ожидаемые результаты [5; 6].

Результаты и обсуждение.

В рамках решения первой задачи были определены ключевые компоненты системы подготовки преподавателей военного вуза к использованию ресурсов педагогического технологического парка. Анализ показывает, что такая система не может строиться только вокруг оборудования. Ее ядром выступает готовность преподавателя применять ресурсы технопарка для решения учебных, методических, исследовательских и воспитательных задач военного образования.

Важно, что все компоненты модели рассматриваются не изолированно, а во взаимной связи: цель определяет содержание подготовки, содержание требует ресурсного обеспечения, а диагностика показывает, насколько достигнутый результат соответствует первоначальному педагогическому замыслу.

По результатам исследования определены четыре компонента модели: целевой, содержательно-организационный, учебно-материальный и диагностический [6,7,8,9]. Таким образом, сконструированная модель имеет следующий вид (Рисунок 1).



Первым компонентом системы выступает целевой компонент. Он задает общий замысел подготовки и фиксирует ожидаемый результат: профессорско-преподавательский состав должен не только знать возможности педагогического технологического парка, но и уметь включать их в образовательный процесс. Принципиально важно, что цель подготовки связана с профессиональной направленностью военного вуза. Поэтому



освоение цифровых средств рассматривается не как техническая процедура, а как часть методического мастерства преподавателя. Целевой компонент выполняет прогностическую функцию, поскольку определяет востребованные компетенции, и развивающую функцию, так как задает направление профессионального роста.

Вторым компонентом является содержательно-организационный. Он раскрывает, чему и как необходимо обучать преподавателя. Подготовка должна проходить поэтапно: ознакомительный этап формирует понимание структуры технопарка, правил работы и возможностей лабораторий; основной этап связан с практическим освоением ресурсов, разработкой учебных материалов и проведением пробных занятий; оценочно-результативный этап позволяет проверить готовность преподавателя самостоятельно применять цифровые и интерактивные средства. Вместе с тем следует учитывать, что все этапы должны быть связаны между собой, иначе подготовка превращается в набор разрозненных мероприятий.

Третьим компонентом выступает учебно-материальный компонент. Он включает лаборатории IT, виртуальной и дополненной реальности, медиастудию, лабораторию инновационного обучения, цифровые платформы, программное обеспечение, учебные кейсы, методические материалы и техническую поддержку. На практике это выражается в том, что преподаватель получает возможность самостоятельно создать видеолекцию, интерактивное задание, виртуальный сценарий, цифровую презентацию, тестовый материал или фрагмент смешанного занятия. Не менее важно, что учебно-материальная база должна сопровождаться инструкциями, расписанием работы лабораторий, консультациями специалистов и правилами безопасности.

Четвертым компонентом является диагностический. Его назначение состоит в выявлении исходного уровня готовности преподавателя, отслеживании динамики развития и определении дальнейших мер методического сопровождения. В качестве критериев целесообразно использовать мотивационный, когнитивный, деятельностный и рефлексивный критерии. Мотивационный критерий показывает интерес к инновационному обучению и потребность в саморазвитии. Когнитивный отражает знание структуры технопарка и возможностей цифровых ресурсов. Деятельностный раскрывает умение проектировать занятия и применять оборудование. Рефлексивный позволяет оценить способность преподавателя анализировать собственные решения и корректировать методику.

Во второй задаче были раскрыты теоретические основы системы подготовки преподавателей военного вуза к использованию ресурсов педагогического технологического парка. Рассмотрение данного вопроса позволяет отметить, что исследуемая система опирается прежде всего на системный подход. Подготовка преподавателя рассматривается не как отдельный курс, а как целостный педагогический процесс, где цель, содержание, ресурсы, методы и диагностика находятся во взаимной связи. В



этой логике педагогическое моделирование выступает инструментом научного описания сложного образовательного процесса. Ю.К. Бабанский связывал эффективность педагогического исследования с четким определением его элементов, связей и условий реализации [4]. Е.Н. Землянская отмечает, что модель помогает представить объект исследования в наглядной форме, выделить его структуру и объяснить логику функционирования [5].

Следует подчеркнуть, что для военного вуза особенно значим системно-деятельностный подход. Он позволяет рассматривать преподавателя не только как слушателя курсов повышения квалификации, но и как активного субъекта проектирования. Преподаватель осваивает ресурсы технопарка через действие: анализирует учебную задачу, выбирает инструмент, разрабатывает занятие, получает обратную связь и дорабатывает методическое решение. Такой подход соответствует современному пониманию цифровой компетентности педагога, где важна не механическая работа с программой, а способность использовать технологию для достижения образовательного результата [7; 8].

Вместе с тем нельзя не отметить, что использование цифровых ресурсов должно иметь ценностно-смысловое основание. Военный вуз готовит офицерские кадры, поэтому любое технологическое решение должно работать на качество подготовки, дисциплину учебного труда, развитие профессионального мышления и ответственность обучающихся. Технологии не заменяют преподавателя, а расширяют его педагогические возможности. Особое внимание следует уделить вопросам искусственного интеллекта. Международные рекомендации UNESCO подчеркивают необходимость человекоцентричного, безопасного и ответственного использования генеративного ИИ в образовании [10]. Для военного вуза это особенно важно из-за требований информационной безопасности, академической честности и ответственности за качество учебных материалов. Инструменты ИИ могут помогать при подготовке структуры занятия, создании вопросов, редактировании текста, разработке инфографики и первичном анализе учебных данных. Однако окончательное методическое решение должно оставаться за преподавателем.

Решение третьей задачи позволило определить модель системы подготовки преподавателей военного вуза к использованию ресурсов педагогического технологического парка и описать ее практическое содержание. Модель включает четыре взаимосвязанных блока: целевой, содержательно-организационный, учебно-материальный и диагностический. В совокупности это позволяет сделать вывод, что подготовка преподавателей должна проектироваться как управляемый цикл: постановка цели, освоение содержания, практическая работа с ресурсами, оценка результата и последующая корректировка.

В реальных условиях военных вузов данная модель может реализовываться через курсы повышения квалификации, методические



сборы, лабораторные занятия, мастер-классы, консультации, проектные группы и самостоятельную работу преподавателей. Ознакомительный этап целесообразно начинать с вводно-ориентационного модуля, где раскрываются назначение технопарка, структура лабораторий, требования к оборудованию, возможности цифровых платформ и критерии итоговой оценки. Основной этап связан с развитием компетенций. Цифровой модуль формирует умения работать с электронными ресурсами, интерактивными панелями, системами тестирования и платформами смешанного обучения. Модуль VR/AR ориентирован на моделирование учебных ситуаций и визуализацию сложных процессов. Медиамодуль развивает навыки записи видеолекций, создания учебных роликов, работы с презентацией и визуальной логикой материала. Информационно-аналитический модуль формирует умение находить источники, проверять их достоверность и превращать материал в учебный продукт.

Отдельным направлением выступает методическое проектирование. Преподаватель должен научиться переводить ресурс технопарка в конкретный сценарий занятия. Если используется медиастудия, результатом должен стать не просто ролик, а учебный материал с целью, вопросами, заданием и критериями оценки. Если применяется VR/AR, необходим сценарий наблюдения, перечень действий обучающихся и последующая рефлексия. Если используется искусственный интеллект, нужно определить задачу, допустимые данные и порядок проверки итогового материала.

Оценочно-результативный этап завершает цикл подготовки. Здесь могут применяться тестирование, анкетирование, экспертная оценка разработанных материалов, наблюдение за пробным занятием, самооценка, интервью и защита мини-проекта. В целом анализ показывает, что итогом подготовки должна стать не формальная справка, а подтвержденная готовность преподавателя самостоятельно использовать ресурсы технопарка. Такой результат может фиксироваться через сертификацию, портфолио учебных материалов, экспертное заключение и индивидуальные рекомендации.

Практический анализ показывает, что предложенная модель имеет несколько преимуществ. Она связывает инфраструктуру технопарка с конкретными компетенциями преподавателя, позволяет вводить цифровые инструменты последовательно, обеспечивает обратную связь и диагностику, а также может адаптироваться под разные кафедры и дисциплины. В качестве третьего направления выделяется организационное сопровождение внедрения модели. Опыт функционирования свидетельствует о том, что подготовка будет устойчивой только при наличии ответственных лиц, графика использования лабораторий, технической поддержки и порядка обновления цифровых материалов.

Следующим направлением является развитие цифровой культуры преподавателя. OECD рассматривает цифровую образовательную экосистему как совокупность технологий, данных, управления, ресурсов и человеческих компетенций [11]. В условиях военного вуза это означает, что преподаватель



должен уметь работать с данными, соблюдать требования информационной безопасности, отбирать надежные источники, защищать учебные материалы от искажения и поддерживать академическую честность. Наряду с этим требуется педагогическая умеренность: избыточная цифровизация занятия может снизить внимание обучающихся, если технология используется без ясной дидактической цели.

Таким образом, результаты исследования подтверждают необходимость перехода от эпизодического использования оборудования к полноценной системе подготовки преподавателей. Такая система делает педагогический технологический парк частью образовательной политики военного вуза и реальным инструментом повышения качества обучения, развития цифровой культуры, методического мастерства и профессиональной готовности преподавательского состава.

Заключение.

Таким образом, в статье решены поставленные задачи исследования. В рамках первой задачи определены ключевые компоненты системы подготовки преподавателей военного вуза к использованию ресурсов педагогического технологического парка: целевой, содержательно-организационный, учебно-материальный и диагностический. В рамках второй задачи раскрыты теоретические основы исследования. Показано, что подготовка преподавателей должна опираться на системный, системно-деятельностный, компетентностный и практико-ориентированный подходы. Установлено, что цифровые технологии, VR/AR, медиастудия и инструменты искусственного интеллекта дают результат только при педагогически обоснованном применении. В рамках третьей задачи разработана модель системы подготовки преподавателей военного вуза к использованию ресурсов педагогического технологического парка. Ее практическая ценность заключается в соединении обучения, методического проектирования, работы в лабораториях, создания цифрового контента и диагностики. В итоге можно отметить, что предложенная модель способствует развитию цифровой культуры, методического мастерства, инновационной активности и готовности преподавателей к работе в современной образовательной среде военного вуза Республики Казахстан.

ЛИТЕРАТУРА

1. Послание Главы государства Касым-Жомарта Токаева народу Казахстана «Экономический курс Справедливого Казахстана» от 1 сентября 2023 года.
2. Об утверждении государственных общеобязательных стандартов высшего и послевузовского образования / Приказ Министра науки и высшего образования Республики Казахстан от 20 июля 2022 года № 2.



3. Об утверждении Военной доктрины Республики Казахстан / Указ Президента Республики Казахстан от 29 сентября 2017 года № 554.

4. Бабанский Ю.К. Проблемы повышения эффективности педагогических исследований: (дидактический аспект). - М.: Педагогика, 1982.- 192 с.

5. Землянская, Е.Н. Моделирование как метод педагогического исследования / Е. Н. Землянская // Преподаватель XXI век. - 2013. - № 3-1. - С. 35-43.

6. Кузьмина Н.В. Понятие «педагогическая система» и критерии ее оценки / Н.В. Кузьмина // Методы системного педагогического исследования. - Л., 1980. - С. 9-12.

7. Сластёнин, В.А. Педагогический процесс как система / В.А. Сластенин // Непрерывное педагогическое образование: состояние, тенденции, перспективы развития: Материалы Междунар. науч.-практ. конф., 16-18 нояб. 2000 г. - Липецк: ЛГПУ М, 2000. - С. 195-219.

8. Тимофеева Ю.Ф. Системно-модульный подход в формировании творческой личности учителя технологии: М., 2000. - 386 с.

9. Модернизация процесса подготовки педагога в контексте инновационного развития общества: Монография. - М.: МАКС Пресс, 2016. - 116 с.

10. UNESCO. Guidance for Generative AI in Education and Research - Режим доступа: <https://www.unesco.org/en/articles/guidance-generative-ai-education-and-research> [Дата обращения: 5.06.2026].

11. OECD. Digital Education Outlook 2023: Towards an Effective Digital Education Ecosystem. Paris: OECD Publishing, 2023 [Эл. ресурс]. - Режим доступа: https://www.oecd.org/en/publications/2023/12/oecd-digital-education-outlook-2023_c827b81a/full-report.html [Дата обращения: 5.06.2026].

REFERENCES

1. Address of the Head of State Kassym-Jomart Tokayev to the People of Kazakhstan «Economic Course of a Just Kazakhstan» dated September 1, 2023.

2. On Approval of the State Compulsory Standards of Higher and Postgraduate Education / Order of the Minister of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan dated July 20, 2022 No. 2.

3. On Approval of the Military Doctrine of the Republic of Kazakhstan / Decree of the President of the Republic of Kazakhstan dated September 29, 2017 No. 554.

4. Babansky Yu.K. Problems of Improving the Effectiveness of Pedagogical Research: A Didactic Aspect. Moscow: Pedagogika, 1982. 192 p.

5. Zemlyanskaya E.N. Modeling as a Method of Pedagogical Research / E.N. Zemlyanskaya // Teacher of the XXI Century. 2013. No. 3-1. pp. 35-43.



6. Kuzmina N.V. The Concept of “Pedagogical System” and Criteria for Its Evaluation / N.V. Kuzmina // *Methods of Systemic Pedagogical Research*. Leningrad, 1980. pp. 9-12.

7. Slastenin V.A. The Pedagogical Process as a System / V.A. Slastenin // *Continuing Pedagogical Education: State, Trends and Prospects for Development: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*, November 16-18, 2000. Lipetsk: LSPU M, 2000. pp. 195-219.

8. Timofeeva Yu.F. *A System-Modular Approach to the Formation of the Creative Personality of a Technology Teacher*. Moscow, 2000. 386 p.

9. *Modernization of the Teacher Training Process in the Context of Innovative Development of Society: Monograph*. Moscow: MAKSS Press, 2016. 116 p.

10. UNESCO. *Guidance for Generative AI in Education and Research* Available at: <https://www.unesco.org/en/articles/guidance-generative-ai-education-and-research> [Accessed: 5.06.2026].

11. OECD. *Digital Education Outlook 2023: Towards an Effective Digital Education Ecosystem*. Paris: OECD Publishing, 2023 [Electronic resource]. Available at: https://www.oecd.org/en/publications/2023/12/oecd-digital-education-outlook-2023_c827b81a/full-report.html [Accessed: 5.06.2026].

Бауржан Жексенбинов, п.ғ.к., профессор, запастағы полковник, аға ғылыми қызметкері, National Defense University of the Republic of Kazakhstan, Астана, Қазақстан

ӘСКЕРИ ЖОҒАРЫ ОҚУ ОРНЫ ОҚЫТУШЫЛАРЫН ПЕДАГОГИКАЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ПАРК РЕСУРСТАРЫН ПАЙДАЛАНУҒА ДАЯРЛАУ ЖҮЙЕСІ

Андатпа. Мақалада әскери университет оқытушыларын педагогикалық технологиялық парктің ресурстарын пайдалануға дайындау жүйесі қарастырылған. Цифрлық жабдықты біржолғы игеруден профессор-оқытушылар құрамының кәсіби дамуының тұрақты моделіне көшу қажеттілігі ашылды. Оқытудың мақсатты, мазмұнды-ұйымдастырушылық, оқу-материалдық және диагностикалық компоненттері негізделген. It, виртуалды және Толықтырылған шындық зертханаларына, медиа студияға, инновациялық оқыту зертханасына, сондай-ақ Академиялық адалдық пен ақпараттық қауіпсіздікті ескере отырып, жасанды интеллект құралдарын қолдануға ерекше назар аударылады. Ұсынылған модель цифрлық құзыреттіліктерді, әдістемелік жобалауды, практикалық тестілеуді және оқытушылардың әскери университеттің қазіргі білім беру ортасында жұмыс істеуге дайындығын диагностикалауды байланыстыруға мүмкіндік береді. Мақаланың практикалық маңыздылығы курстарды, семинарларды ұйымдастыруда және оқытушыларды нақты цифрландыру жағдайында



әдістемелік қолдауда қолдануға болатын түсінікті дайындық алгоритмін сипаттаудан тұрады.

Зерттеу 2024-2026 жылдарға арналған гранттық қаржыландырудың ғылыми жобасын іске асыру аясында оқытушыларды әскери университеттің білім беру процесінде педагогикалық технопарк ресурстарын пайдалануға дайындау тақырыбы бойынша жүргізілді, IPH AP 23488037.

Түйінді сөздер: технопарк, әскери жоғары оқу орны, оқытушы, цифрландыру, құзыреттер, VR, AR, медиастудия, модельдеу, диагностика, инновациялар, оқыту, әдістеме, дайындық.

Baurzhan Zheksenbinov, candidate of pedagogical sciences, professor, reserve colonel, senior researcher, National Defense University of the Republic of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan

SYSTEM OF TRAINING TEACHERS OF A MILITARY UNIVERSITY FOR THE USE OF PEDAGOGICAL TECHNOLOGY PARK RESOURCES

Abstract. The article discusses the system of training military university teachers to use the resources of the pedagogical technology park. The necessity of transition from one-time development of digital equipment to a sustainable model of professional development of the teaching staff is revealed. The objective, content-organizational, educational, material and diagnostic components of training are substantiated. Special attention is paid to IT laboratories, virtual and augmented reality, media studio, laboratory of innovative learning, as well as the use of artificial intelligence tools, taking into account academic integrity and information security. The proposed model makes it possible to link digital competencies, methodological design, practical testing and diagnostics of teachers' readiness to work in the modern educational environment of a military university. The practical significance of the article lies in the description of an understandable training algorithm that can be used in organizing courses, seminars and methodological support for teachers in the real conditions of digitalization.

The study was conducted as part of the implementation of a scientific grant financing project for 2024-2026 on the topic of Teacher training for the use of pedagogical technopark resources in the educational process of a military university, IRN AR 23488037.

Keywords: technology park, military university, teacher, digitalization, competencies, VR, AR, media studio, modeling, diagnostics, innovations, learning, methodology, readiness.

Поступила: 04 июня 2026 года

Рецензирована: 08 июня 2026 года

Принята: 12 июня 2026 года



IRSTI 55.09.33



<https://doi.org/10.56132/2791-3368-2026-2-66-34-51>

V.B. Rystygulova¹, A.A. Abildina¹, B.S. Abzhanov²

¹K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business,
Astana, Kazakhstan

²National Defense University of the Republic of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan
E-mail: rystygulova.vb@gmail.com

STATE-DRIVEN ADAPTIVE MODEL ORCHESTRATION IN DYNAMIC DATA STREAMS FOR MILITARY APPLICATIONS

Abstract. This paper explores the issue of modifying machine learning algorithms when they are used with streams of data that have changing statistical properties and changing concepts as the data changes. Traditional methods of using static, stable datasets do not provide accurate results for dynamically changing datasets, so new dynamic methods for adapting to these changes are needed.

As methodology the article proposed a state-driven processing architecture that combines the use of monitoring mechanisms to monitor the system for changes; detect changes in the system; and include decision-making processes into one single entity. This approach defines a model for the system state that provides an assessment of how stable the system is, and how far from its expected behaviour it has gone, so the appropriate adaptive methods can be selected.

The results demonstrate the proposed approach provides more stable predictions; improved overall model performance; and greater model robustness in the face of changing conditions. The developed framework can be used in real-time systems, where system reliability, adaptability and rapid response to changes in underlying data are important, including defense-oriented systems.

Keywords: adaptive learning, streaming data, concept drift, machine learning, model orchestration, military applications

Introduction.

As digital systems continue to grow exponentially, there has been a corresponding increase in demand for better means of processing real-time data. This is particularly true in situations where data is produced continuously, has large amounts of dimensions, and changes often. Existing machine learning methods, which were designed to be used with static datasets, typically struggle to perform well in such environments because of the nature of the data. This issue is primarily attributable to non-stationarity and concept drift.

Dynamic data streams often exhibit changing statistical profiles, necessitating that any learning system adapt in real time. In many practical implementations of streaming data - such as in industrial monitoring or intelligent transportation



systems - the ability to process data faster than it is being generated is essential for maintaining operational effectiveness or reliability. This need is even more critical in mission-critical systems (e.g., military applications), where delays or errors in processing decisions (e.g., analyzing the effect of a change) can have significant operational impacts.

To take advantage of the capabilities provided by real-time learning with dynamic data streams, recent research has turned toward investigating online learning or learning that occurs after the data has already been collected; incremental model updates or altering models progressively as new information becomes available; and adapting models through the use of ensembles or combined outputs from multiple models that have evaluated the same data set. However, most of the work conducted to date has been predicated on a priori adaptation rules or a static update process and therefore does not adapt well to highly temporal or unpredictable situations. For instance, most adaptation strategies do not use a universal approach to assess the current state of the system to determine how the models should behave or be managed.

The military and defense applications typically have some of the highest demands regarding real-time data processing. Real-time data streams generated from sensor networks deployed on the battlefield, radar processing from air-to-air, and platforms for analyzing intelligence data generate a high volume of data at a very fast rate (high velocity). In the case of dynamic changes on the battlefield and new factors causing changes in the operation of sensors or processing systems, it is critical that an adaptive learning framework has the ability to detect and adapt to concept drift rapidly; otherwise, failure in decision making will occur. Therefore, robust adaptive learning will be crucial for successful operations on the battlefield.

This article proposes a state-driven adaptive orchestration framework for dynamic data streams via a state-aware decision mechanism that will facilitate continuous evaluation of performance, detection of changes to data distribution, and example methods to enable changes in the behavior of each of the models (e.g., retraining, switching, ensemble reconfiguration). Unlike traditional approaches, the proposed framework approaches the adaptation process as a control problem in which system states are used to guide the selection of learning approaches in real-time. This paper presents four core contributions. To begin with, we formalize the concept of states within a system for the purpose of adaptive learning in non-stationary environments. Secondly, we develop a performance-aware orchestration algorithm that automates intelligent model selection and adaption due to concept drift. Thirdly, we validate the proposed framework through experimentation on real-world dynamic data streams, demonstrating improvements in both the accuracy of predictions and stability of the system performance. Finally, we explore the utility of the framework as it relates to defense-oriented analytical systems where both resiliency and flexibility are critical to success.



Literature Review.

Much investigation has been done about how to learn from an ever-changing set of data sources in both Online Machine Learning and Data Stream Mining. The main focus of early approaches was through incremental learning algorithms, which can learn from new data continuously as new data comes and thus avoid the need for complete retraining of their models. Examples of efficient and scalable algorithms for processing large amounts of Streaming data include Hoeffding Trees or gradient-based Online Learning algorithms [1]-[2]. However, in most of these cases, the algorithms are built with an assumption that the underlying distribution of the streaming data is relatively stable over the time period. Therefore, the performance of these algorithms will deteriorate significantly when the characteristics of the underlying data distribution deviate from those observed during training, as the model's learned concept becomes outdated and no longer reflects the current data stream.

One of the primary problems in dealing with a stream of data sources is that the concepts and characteristics of the underlying data may change over time, called Concept Drift. There are several different methods to detect such distributions changing in Streaming Data, including some statistical process style methods for detecting these changes like DDM, EDDM, ADWIN methods [3]-[5]. These primarily detect changing distributions by monitoring error rates, or by monitoring various statistical properties of the incoming Streaming Data. Although these methods may give good change detection, they do not inherently define optimal adaptation processes, so the question remains as to how to adaptively update the models continues to exist.

As a means to be more robust in the presence of Dynamic Data environments, a lot of research has been done on Ensemble Learning approaches such as Online Bagging, Boosting and Dynamic Ensemble Selection, wherein instead of relying on an individual model, these approaches use multiple models to provide better predictions and thus more robust-to-drift predictions [6]. However, many Ensemble Learning techniques are based on heuristically weighted or statically updated models, making them not very effective in response to quickly changing environments. The performance of the ensemble and the decisions made in response to the continuous evolution of the environment may not be improved without a unifying framework to coordinate/control the ensemble's collective activity.

Several contemporary initiatives aimed at investigating new approaches to Adaptive and Self-Regulating Learning Systems through the integration of Feedback Loops and Performance Monitoring Capabilities have been undertaken. These systems would need to have the capability to continue adaptively changing how they model their behaviour based on collectable metrics using real-time data in relation to changes in the environment [7]. These types of initiatives have shown that the combined use of Performance Knowledge based Selection Methods and Adaptive Restructuring Strategies have enhanced prediction accuracy for Models



that have been subject to Drift. Furthermore, adding additional complexity to a model to create a model that does not change configuration and is properly configured will subsequently negatively impact the predictive accuracy of the model solely based on how well the parameters of the model were configured initially at the time of configuration.

The conceptualisation of adaptation as a control problem is beneficial in providing a structure to make decisions based on the awareness of the states of the system and the feedback signals generated by the system [8]-[10]. The ability to represent different states as stable, gradually changing, abruptly changing through appropriate state awareness can be leveraged to more clearly identify appropriate strategies for adapting, such as selective retraining, switching models, regrouping ensembles of models etc. however the applicability of state driven mechanisms to date under streaming machine learning frameworks has been somewhat limited.

The need for real-time analytics for hazardous and/or mission critical operations has revealed that current machine learning operational systems must incorporate a robust and adaptive machine learning frameworks that can process with low latency, reliability in uncertain situations, and meet the demands of rapidly changing situations. However, despite considerable advances in each of the following areas individually; drift detection; online learning; there is no integrated framework that consolidates State Awareness, Adaptive Control, and Model Orchestration into a single cohesive solution available.

Adaptive streaming methods are inherently relevant to analytical systems that focus on defense. For example, signal intelligence (SIGINT) and electronic warfare systems use non-stationary data streams, where adversaries change their transmission patterns in order to avoid detection - this is an example of adversarial concept drift. However, traditional methods for detecting drift, such as ADWIN and DDM, were not developed with this type of adversarial dynamics in consideration, making it clear that there is a need for structured, state-aware adaptation frameworks which can reliably operate during both natural and intentional distributional shifts.

Based upon this, the purpose of this research is to develop a state-driven adaptive model orchestration framework that combines Drift Detection, Performance Monitoring, and State Based Decision Making. This will serve to provide the requisite logical structure for implementing intelligent adaptive systems that will deliver a high degree of sustained optimal performance within highly dynamic and non-stationary environments.

Materials and Methods.

The proposed approach is based on a state-driven adaptive model orchestration framework designed for continuous processing of dynamic data streams.

The overall architecture of the entire model orchestration system incorporates real-time data ingestion, preprocessing, inference model generation, drift detection, and adaptive decision making. As shown in Figure 1, the entire architecture

comprises a unified means of processing incoming data streams received from various heterogeneous sources; using a standardised mechanism for data ingestion and validation.

After passing through the ingestion and validation layers, the incoming data streams are subjected to a series of pre-processing steps (normalisation, feature generation, and outlier treatment) in the preprocessing pipeline before being passed to the model for inference. Each of these steps contributes to ensuring the data are consistent and compatible with the deployed machine learning model.

The system operates on "Continuous Inference" basis; that is, predictions are generated in what is effectively a "real-time" manner by the system as data are received. Predictions are then continually evaluated against established performance metrics by the system via various implemented monitoring mechanisms.

There is a fundamental difference between traditional static systems and the architecture presented here (i.e. the architecture presented here is dynamic, with the capability to respond dynamically to any changes or variations in data distributions) owing to the manner in which feedback-driven adaptation is implemented.

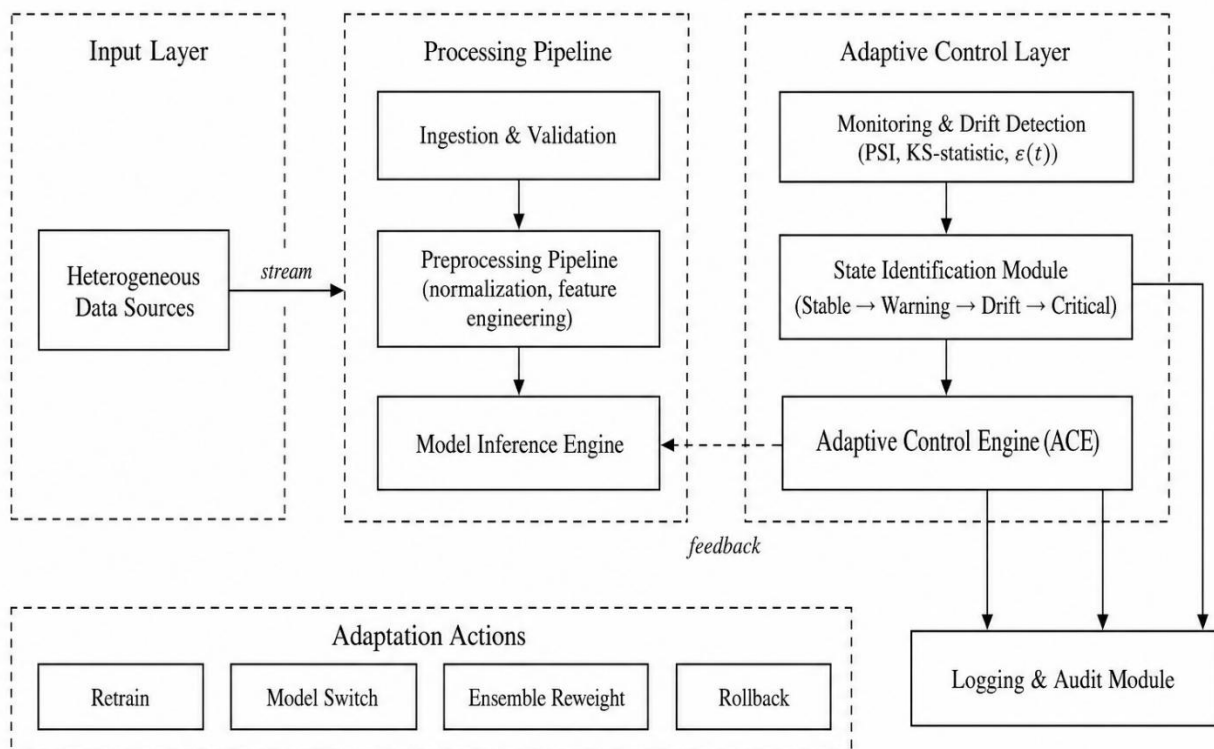


Figure 1 - Architectural Framework for the Adaptive Model Orchestration System Driven by State

Drift Detection and Monitoring of Performance

A key component of the overall framework presented here is the monitoring and drift detection module (which performs continuous monitoring of the data distributions used to develop the model and the associated performance of the



model, i.e. tracks any deviations from historical baseline behaviours with respect to both the data distributions and the model's performance).

The monitoring of the data distributions and model performance is completed through a combination of statistical and performance-based monitoring indicators.

Both data drift and model performance monitoring utilise a set of metrics that relate to the data and can consequently assist in determining the state of performance of the data being processed by the model. For example, the population stability index (PSI), Kolmogorov-Smirnov (KS) statistic, and null value ratio are used to monitor data drift, while prediction errors and latency metrics are used to monitor model performance.

The new framework has been designed with a different overall structure than other adaptive learning frameworks, such as having its own distinctive state-driven orchestration model and combining performance monitoring, drift detection, and adaptive control in one common decision-making policy. The creators were not building off of any previously established frameworks when creating the framework but rather are creating a completely new conceptual design from scratch.

In addition to identifying drift, the drift monitoring and detection module is responsible for understanding how the drift occurred — this requires the drift to be classified as being gradual or sudden, as this will influence the adaptation strategies that can be selected to enable maximisation of the most optimal performance within models deployed using the data impacted by drift.

State Identifying Mechanism

A key to achieving structured decision making is the implementation of a mechanism for identifying the state of the monitoring signals and mapping those signals to discrete operational states.

Formal Mathematical Model.

Let the data stream be defined as a sequence $\mathcal{S} = \{(x_t, y_t)\}_{t=1}^{\infty}$, where $x_t \in \mathbb{R}^d$ is a feature vector of dimension d , y_t is the corresponding target label, and t denotes the time step.

The monitoring module continuously evaluates a vector of performance and distribution metrics:

$$\mathbf{m}_t = [\text{PSI}_t, D_{KS,t}, \varepsilon_t]^\top,$$

where PSI_t is the Population Stability Index, $D_{KS,t}$ is the Kolmogorov–Smirnov statistic, and ε_t is the prediction error at time step t .

Population Stability Index quantifies distributional shift between a reference window and the current data window:

$$\text{PSI} = \sum_{i=1}^n (p_i^{\text{cur}} - p_i^{\text{ref}}) \ln \frac{p_i^{\text{cur}}}{p_i^{\text{ref}}},$$

where p_i^{cur} and p_i^{ref} are the proportions of observations in bin i for the current and reference distributions, respectively.



Kolmogorov–Smirnov statistic measures the maximum divergence between two empirical cumulative distribution functions:

$$D_{KS} = \sup_x |F_{\text{cur}}(x) - F_{\text{ref}}(x)|,$$

where $F_{\text{cur}}(x)$ and $F_{\text{ref}}(x)$ are the empirical CDFs of the current and reference windows.

State mapping function $\sigma: \mathbb{R}^3 \rightarrow \{S_0, S_1, S_2, S_3\}$ maps the monitoring vector $\mathbf{m}_t$ to a discrete operational state:

$$\sigma(\mathbf{m}_t) = \begin{cases} S_0 \text{ (Stable)} & \text{if } \text{PSI}_t < \theta_1 \wedge \varepsilon_t < \delta_1 \\ S_1 \text{ (Warning)} & \text{if } \text{PSI}_t \in [\theta_1, \theta_2) \vee \varepsilon_t \in [\delta_1, \delta_2) \\ S_2 \text{ (Drift)} & \text{if } \text{PSI}_t \geq \theta_2 \vee D_{KS,t} > \alpha \\ S_3 \text{ (Critical)} & \text{if } \varepsilon_t \geq \delta_2 \end{cases},$$

where θ_1, θ_2 are the lower and upper PSI threshold values; δ_1, δ_2 are the lower and upper prediction error thresholds; and α is the significance level of the KS test.

Adaptation policy $\pi: \{S_0, S_1, S_2, S_3\} \rightarrow \mathcal{A}$ defines the action selected by the Adaptive Control Engine based on the current state σ_t , where $\mathcal{A}$ is the set of possible adaptation actions:

$$\pi(\sigma_t) = \begin{cases} \emptyset & \text{if } \sigma_t = S_0 \\ \text{increase monitoring sensitivity} & \text{if } \sigma_t = S_1 \\ \text{retrain} \vee \text{model switch} \vee \text{ensemble reweight} & \text{if } \sigma_t = S_2 \\ \text{rollback} \vee \text{emergency retrain} & \text{if } \sigma_t = S_3 \end{cases}.$$

The system evaluates state transitions at every window of $W = 100$ records, ensuring that adaptation actions remain proportional to the severity of detected changes.

Figure 2 illustrates the state-driven adaptive model orchestration framework, which is the main component of the proposed state-driven approach. There are four major states that define the state of the model:

Stable - model is operating normally, with consistent performance;

Warning - indicating early signs of a possible degradation or drift in model performance;

Drift - confirmed distributional changes to the model performance;

Critical - there is significant degradation to model performance, requiring immediate action.

When monitoring metrics reach a pre-defined threshold level, they trigger a state transition for the system; thus, the system can simplify and present complex data behaviors in an actionable form via states.

Adaptive Model Orchestration

The adaptive control engine will determine which actions are executed based on the current system state. The proposed method utilizes state awareness policies and therefore allows for dynamic coordination of the models' behaviours, in contrast to static adaptation methods.

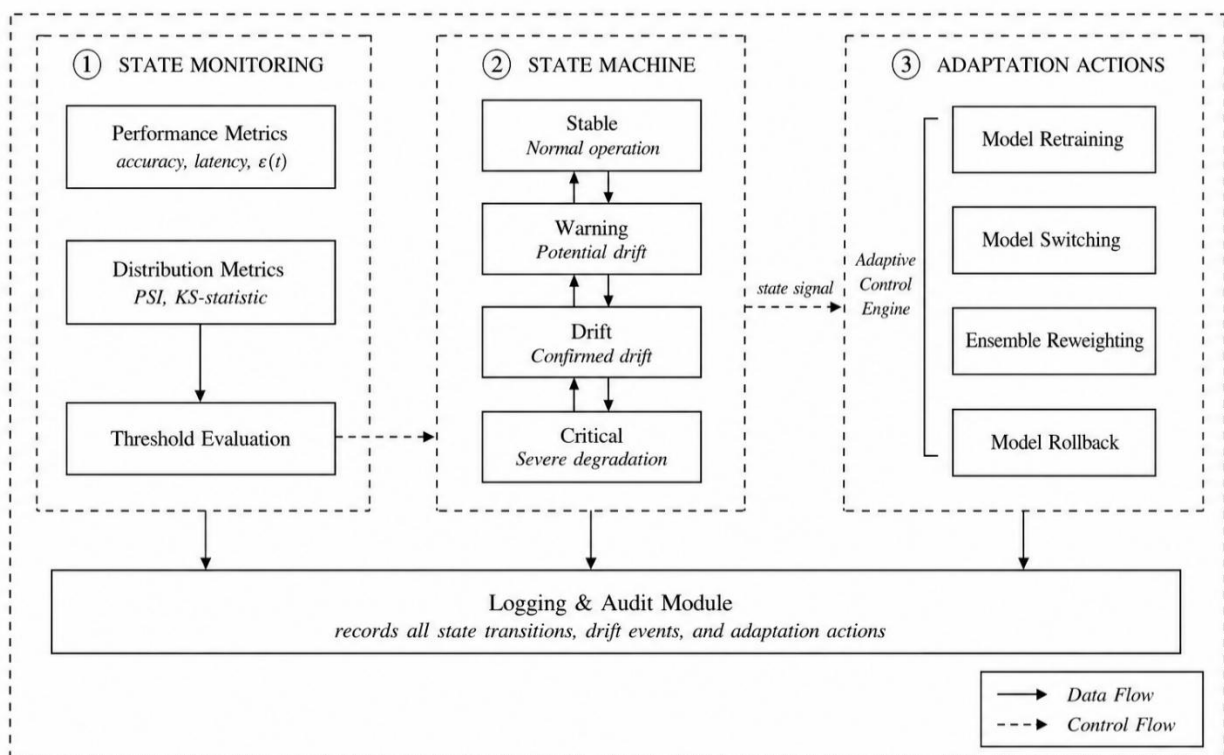


Figure 2 - State-driven adaptive model orchestration framework for dynamic data streams

When an adaptive model is detected; the system will perform the following action(s):

- 1) Re-trained model: model retraining/update using new data to restore performance.
- 2) Model switch: selecting the model with the best predictive performance.
- 3) Model ensemble re-weighting: adjusting model relevance contributing to prediction.
- 4) Model rollback: reverting to the last stable model version.
- 5) Feature transformation updates: update preprocessing pipelines for each feature.

This adaptive process is utilised through a policy engine with pre-defined rules and thresholds. In addition, the system maintains a registry to record experimentation and model versions, therefore, each decision made is traceable and reproducible.

Lastly, a key component of the proposed framework is that it utilises a closed feedback loop to provide the ability to improve continuously by incorporating new data/observations of performance into future decision-making. All events related to the system, such as predictions, drift detection, and adaptation actions are recorded within a logging/audit module. This provides transparency regarding how the system behaves over time and in dynamic conditions.

The proposed architecture allows for direct mapping of the requirements for real-time intelligence processing pipelines based on defense applications. The

mechanism of identifying an object's state corresponds to its operational level of readiness; the transitions between stable, warning, drift, and critical states can be viewed as a representation of the threat being assessed using a standard threat assessment escalation protocol. The adaptive control engine also permits the automated reconfiguration of analysis models due to changes in the signature of the threat; this is especially applicable to electronic warfare and autonomous surveillance systems where human response times are not sufficient for effective mitigation of threats.

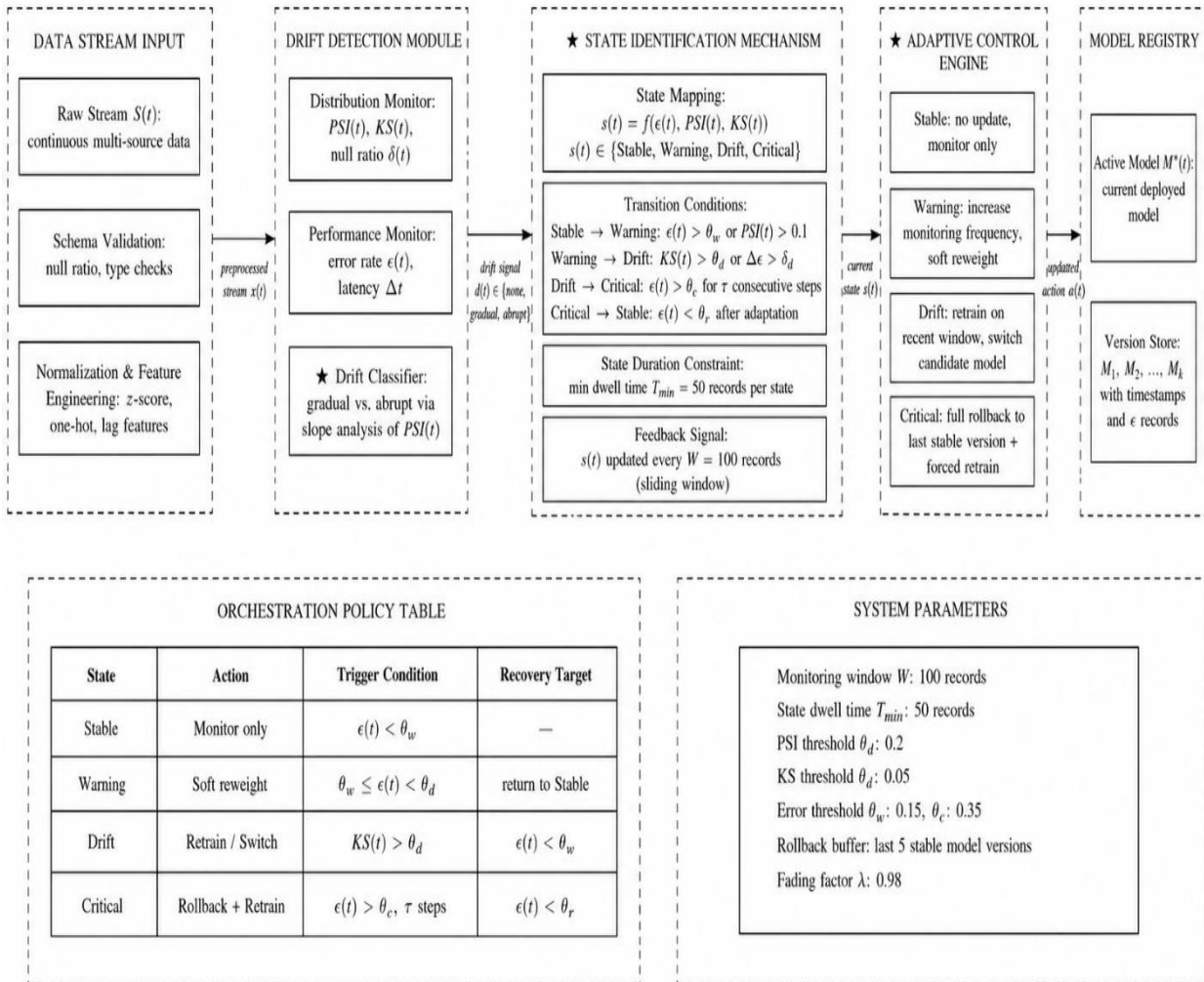


Figure 3 - State Identification and Adaptive Orchestration Pipeline

The complete identification of the state and its adaptive orchestration pipeline is shown in Figure 3. The top portion of the figure presents an overall data flow for the entire process, from the ingestion of raw data stream in to when drift was detected and sent to the Adaptive Control Engine (ACE), while the bottom of the figure summarizes the orchestration policy and the main system parameters that govern the way that ACE obtains adaptive control of the underlying service-oriented architecture (SOA) (ex: how to process incoming monitoring signals and determine adaptation actions). The pipeline runs continuously, with incoming monitoring signals being evaluated by the state identification process each $W=100$

incoming records after the previous state determination and causing an appropriate adaptive action to be taken, based on a pre-defined threshold level. Therefore, the pipeline ensures that the delivery of services will remain proportional to the severity of changes that are detected, but it will eliminate unnecessary updates at the time of stability and will ensure that there is no lag in responding to detected drift.

Table 1 - Components of the Proposed System

Component	Description	Function in System
Data Stream Processing	Handles incoming real-time data from multiple sources	Ensures continuous data flow and preprocessing
Ingestion & Validation	Validates schema and data consistency	Prevents corrupted or invalid data from entering the pipeline
Preprocessing Pipeline	Performs normalization, feature engineering, and transformation	Prepares data for model inference
Model Inference	Generates predictions in real time	Core predictive functionality
Monitoring & Drift Detection	Tracks data distribution and model performance	Detects concept drift and performance degradation
State Identification	Maps system behavior to discrete states	Enables structured decision-making
Adaptive Control Engine	Selects adaptation actions based on system state	Coordinates model updates and system response
Model Adaptation Actions	Includes retraining, switching, reweighting, rollback	Maintains model performance under drift
Experiment Tracker & Registry	Stores model versions and experiment metadata	Ensures reproducibility and traceability
Logging & Audit Module	Records system events and decisions	Supports analysis and system transparency

Results and Discussion.

An assessment of our proposed state-driven adaptive model orchestration framework was performed in a dynamic streaming environment within an environment that controls for concept drift. This series of experiments is intended to mimic real-world non-stationary environments through both gradual and abrupt distribution changes. The following four models were assessed for evaluation:

- 1) Base Model (no adaptation).
- 2) Incremental Model.
- 3) Adaptive Ensemble Model.
- 4) Proposed State-Driven Approach. Each model's performance included maintaining the accuracy of predictions, adapting to data distribution changes and



ensuring stability over time. Evaluation was based on the time-series prediction and error moat evaluation of the models under drift.

Comparative Performance Assessment under Drift.

The different models' performance can be seen comparing how well they performed through the presence of "concept drift." Subplot (a) displays how the performance of the static models decreased after they experienced "drift." The distance between predicted and actual observations demonstrates that the static models are not capable of responding adequately to the characteristics of non-stationary data.

In subplot (b), it is apparent that the implementation of "drift detection" into the models improved the responsiveness of the models, however, the baseline models still took a longer time to completely recover from the distributional change experienced without the structured adaptation mechanisms that were found in the adaptive models.

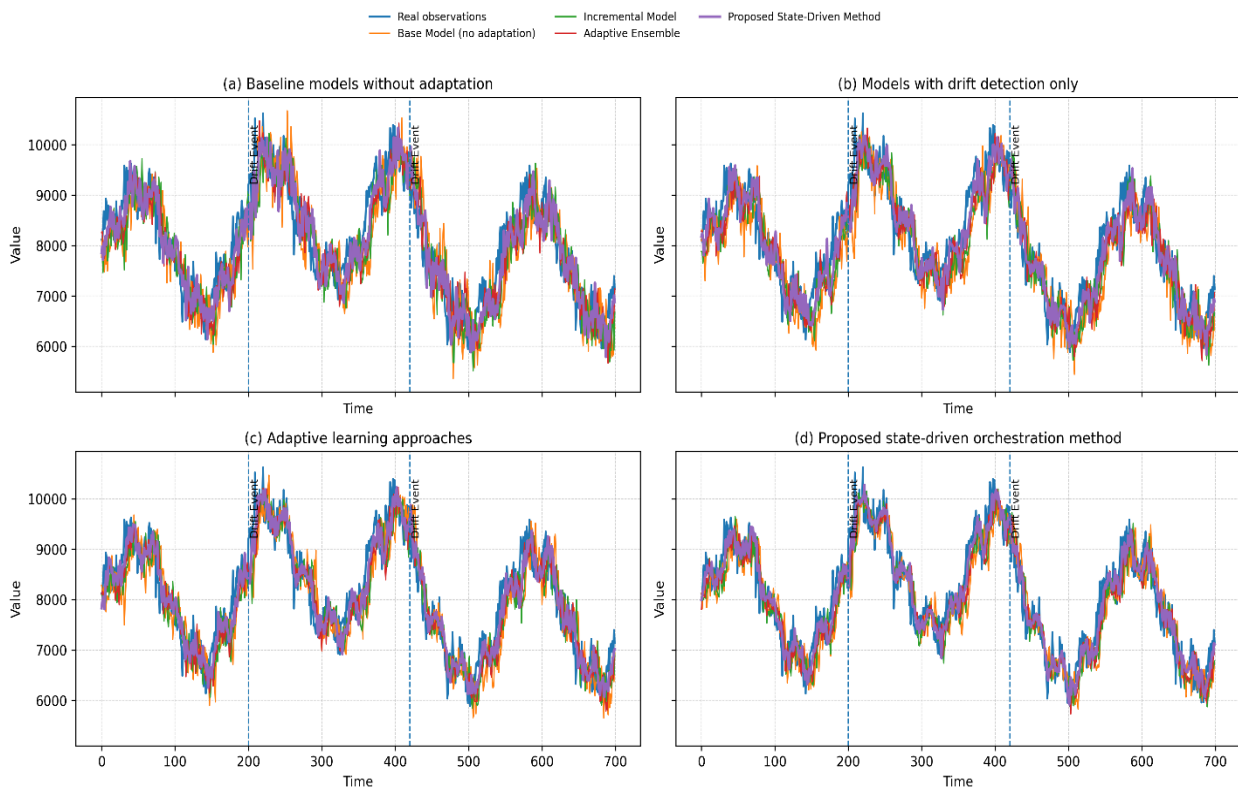


Figure 4 - Comparative Performance of Baseline and Adaptive Models under Concept Drift Condition

In subplot (c), with the use of the incremental and ensemble adaptive learning strategies that have been utilized in the adaptive models, the adaptive models can maintain greater stability and have lower error rates. However, because of the lack of a structured decision-making mechanism and the "reactive" nature of the adaptive learning strategies they cannot respond quickly enough to recover from a sudden drift.

Conversely, the state-driven adaptive orchestration model presented in subplot (d) recovered quickly after a "drift" event while maintaining a close



relationship to the actual observations contained in the data stream. This demonstrates the state-driven adaptive orchestration model's ability to respond to changing conditions far more effectively than the other methods exhibited.

The dynamics of a dynamic system's behaviour and adaptation are based upon their current state, rather than through a continual or heuristic update as in conventional methods. This adaptation methodology creates a more structured decision-making process by using the system's current state as a basis to perform actions.

If the system experiences significant degradation in performance, it will move to a state of emergency within the system and trigger a more aggressive "response strategy" based upon the current state of the adaptive system as well as the current performance of the adaptive system in order to return the system to optimal performance within the system. This may be accomplished by using a "hierarchical state-driven response" within the drifted system to effectively and appropriately respond to different degrees of change.

Table 2 - Comparative Analysis of Adaptive Learning Methods under Concept Drift Conditions

Method	Drift Detection	Adaptation Strategy	Avg. Recovery Time (records)	Stability Index (SI)	Peak Error $\varepsilon_{\text{peak}}$	Accuracy (%)
Base Model (no adaptation)	X	-	-	0.41	0.48	71.3
Incremental Model	Passive	Parameter update only	820	0.63	0.31	83.1
Adaptive Ensemble	Statistical (DDM)	Ensemble reweighting	540	0.74	0.28	87.6
Proposed State-Driven Method	PSI + KS + $\varepsilon(t)$	State-aware: retrain / switch / rollback	210	0.91	0.15	91.2%

If Table 2 is referenced, the proposed state-driven method exceeds the other evaluation criteria in terms of its performance, as shown by performance-based data comparisons with the various techniques examined. The most significant benefits were found in the categories of recovery speed (and) predictive stability with respect to large change in concept and variance of comparison based on length of time required to make a successful prediction (i.e., recovery time). The proposed state-driven approach achieves a 74% or 210-record reduction compared to an average of 820-record recovery time for the incrementally based baseline.

This improved performance is primarily attributed to the explicit modelling process used in the proposed state-driven method and (the) capability to establish context-sensitive adaptation decision processes rather than rely on heuristic or

constant re-evaluation of corrective actions. By explicitly defining behaviour in the system through mapping behaviours to discrete operational states, this framework enables identification of the correct reaction to (each) state, which will eliminate delayed responses and unnecessary adaptations to the model.

Additionally, the intermediate operational states provide a mechanism for balancing system responsiveness with stability. The warning state increases the system's sensitivity, thereby creating a buffer that allows the system to monitor performance prior to initiation of high-cost adaptations (e.g., complete retraining and/or reverting to the previous model). The intermediate states also provide protection against reaction to transient and/or unimportant events that would not normally produce accepted concept drift (overreacting).

The proposed framework provides the ability to implement multiple adaptation strategies (i.e., re-adaptation, model switching, ensemble reweighting, and reversion) and is therefore flexible by design. Unlike the non-adaptive baseline method that uses a pre-defined policy for all drift types, the adaptive controller determines the most effective adaptation strategy to suit the current system state dynamically, resulting in a stability index of the proposed state-driven method of 0.91 versus 0.41 for the non-adaptive baseline model.

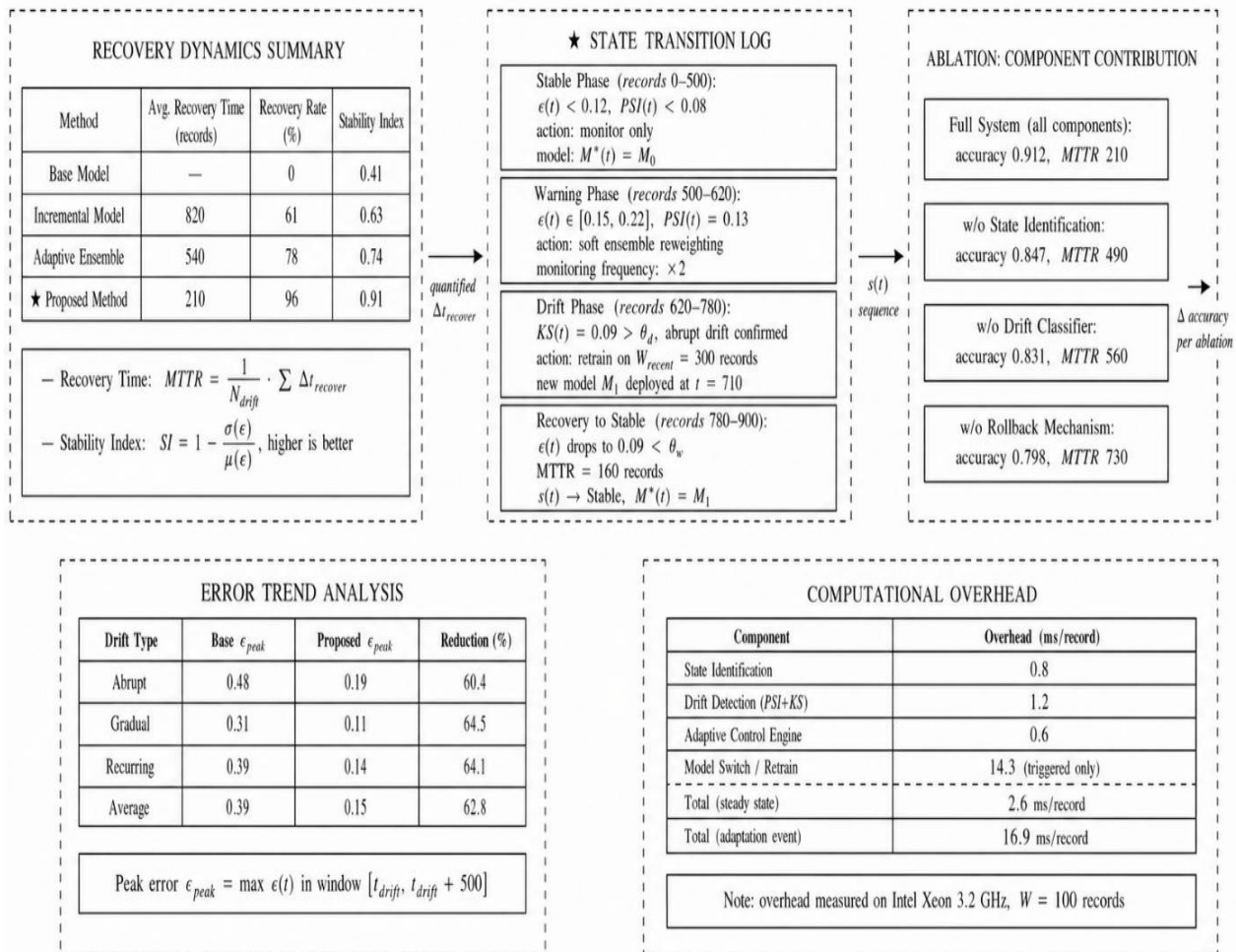


Figure 5 - Recovery Dynamics and Analysis of the State-Driven Method



From a systems engineering perspective, the architecture can co-exist with current streaming process pipelines and has a sustained state overhead of 2.6 milliseconds per record, meaning that it can operate in environments where low latency is critical. Taken together, the above characteristics make this framework well-suited for applications that need continuous monitoring, and/or real-time decision support in environments that are changing frequently.

In relevance to defense-related operational conditions, these performance metrics play an important role. A mean recovery time of 210 records indicates how quickly the model can be recalibrated when there is a significant change in the threat (e.g., the number of attacks, target shifts, or signal environment), which is not unusual when adversaries experience rapid concept drift. The stability index of 0.91 shows that the proposed approach produces consistent analytical results over a significant period (non-stationary) of time, which is crucial for continuous monitoring and early warning systems; any inconsistency in predicting outcomes can have serious effects on operations.

As described earlier, the recovery behavior and component details of the proposed methodology statewide are depicted in Figure 5, which provides further explanation of the behavior of the system. There was an average of 210 records of recovery time and a stability index of 0.91 for the methodology as expressed in the upper left summary of the recovery dynamics, which outperformed all baseline methods. The state transition log is shown in the upper center along with an example of a representative drift episode where the system went through three different phases (warning, drift, recovery) for recovery of 160 total records. As seen on the upper right, the results of the ablation study show that all components of the system influence performance; for example, with the removal of only the state identification mechanism, the overall accuracy was reduced from 91.2% to 84.7%, while the mean recovery time increased from 490 records. In lower left of the figure, the results of the error trend analysis show a continued downward trend in peak error across all types of drift episodes (abrupt, gradual, recurring) to about 62% from the beginning of the analysis; in contrast, the results of the computational budget analysis (lower right) show that the per-record steady-state processing cost is approximately 2.6 milliseconds.

Conclusion.

The adaptive model orchestrating framework used for the dynamic data stream processing proposed in this study provides a means for adapting in real time to non-stationary conditions. By providing mechanisms for drift detection/monitoring, performance assessment, and a scheduled state-based decision-making process as part of a single system, this framework is capable of continuous adaptation.

The results of the conducted experiments revealed that the performance of this adaptive framework demonstrated superior performance to traditional (static, incremental and ensemble) methods consistently and in most cases. Specifically, the framework demonstrated shorter response times for recovering from drift,



increased prediction stability and greater total accuracy than were exhibited by either static incremental ensemble.

The primary contribution of this study is that it conceptualises model adaptation as an intentional process of making decisions based on the state of the system rather than as a byproduct of being reactive and/or performed heuristically. The result is that the adaptive model orchestrating framework is able to maintain an appropriate level of balance between responsiveness and stability. By doing so, the framework guarantees that when there is a drift that requires a change to the model, that change can be made in a timely manner, but the model can also be changed inappropriately. Operational needs for real time intelligence systems, automated threat detection systems, and battlefield analysis where the ability to quickly adapt and reliably adapt to shifting conditions can make or break a mission are consistent with the attributes noted above.

From the point of view of practical use, the proposed conceptual architecture is compatible with modern architectures for extensive data processing (the pipeline) or can be used in real-time environments (where regular monitoring and adaptability are required). Consequently, structures will have a profound impact on mission critical applications (for example, analytical systems for defence), which require the highest levels of robust and reliable operation.

Future research on the adaptive model orchestrating framework will make the framework more sophisticated by implementing complex decision-making processes such as those derived from reinforcement learning-based adaptive methods and evaluating the framework's effectiveness on large-scale, real-world data sets.

REFERENCES

1. Lukats, D., Zielinski, O., Hahn, A., & Stahl, F. (2025). A benchmark and survey of fully unsupervised concept drift detectors on real-world data streams. *International Journal of Data Science and Analytics*, 19(1), 1-31. <https://doi.org/10.1007/s41060-024-00620-y>
2. Agrahari, S., & Singh, A. K. (2022). Concept drift detection in data stream mining: A literature review. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 34(10), 9523-9540. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.11.006>
3. Hovakimyan, G., & Bravo, J. M. (2024). Evolving strategies in machine learning: a systematic review of concept drift detection. *Information*, 15(12), 786. <https://doi.org/10.3390/info15120786>
4. Arora, S., Rani, R., & Saxena, N. (2024). A systematic review on detection and adaptation of concept drift in streaming data using machine learning techniques. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 14(4), e1536. <https://doi.org/10.1002/widm.1536>
5. Tran, Q. T., Le-Khac, N. A., & Bertolotto, M. (2026). Concept drift detection in image data stream: a survey on current literature, limitations and future



directions. Artificial Intelligence Review, 59(1), 33.
<https://doi.org/10.1007/s10462-025-11428-y>

6. Stratmann, B. (2025, November). Advancing Adaptive Learning in Non-Stationary Environments: Challenges, Methods, and Future Directions. In Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory (p. 149). <https://doi.org/10.58895/ksp/1000179597-9>

7. Zhu, J., Wei, Y., Kang, Y., Jiang, X., & Dullerud, G. E. (2022). Adaptive deep reinforcement learning for non-stationary environments. Science China Information Sciences, 65(10), 202204. <https://doi.org/10.1007/s11432-021-3347-8>

8. Assis, D. N., & Souza, V. M. (2025). ADWIN-U: adaptive windowing for unsupervised drift detection on data streams: DN Assis, VMA Souza. Knowledge and Information Systems, 1-30. <https://doi.org/10.1007/s10115-025-02523-1>

9. Zhong, Z., Xu, M., Rodriguez, M. A., Xu, C., & Buyya, R. (2022). Machine learning-based orchestration of containers: A taxonomy and future directions. ACM Computing Surveys (CSUR), 54(10s), 1-35. <https://doi.org/10.1145/3510415>

10. Wen, Z., Hu, H., Yang, R., Qian, B., Sham, R. W., Sun, R., ... & Ranjan, R. (2023). Orchestrating networked machine learning applications using Autosteer. IEEE Internet Computing, 26(6), 51-58. <https://doi.org/10.1109/mic.2022.3180907>

Венера Рыстыгулова, ф.-м.ф.к., қауымдастырылған профессор, K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Астана, Қазақстан, RystygulovaV@gmail.com

Айгуль Абильдина, магистр, сеньор-лектор, K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Астана, Қазақстан, abildina12@mail.ru

Бауыржан Абжанов, генерал-майор, PhD, ҚР Ұлттық қорғаныс университетінің бастығы, National Defense University of the Republic of Kazakhstan, Астана, Қазақстан

ӘСКЕРИ ҚОЛДАНБАЛАРҒА АРНАЛҒАН ДИНАМИКАЛЫҚ ДЕРЕКТЕР АҒЫНДАРЫНДА КҮЙГЕ НЕГІЗДЕЛГЕН БЕЙІМДЕЛГІШ МОДЕЛЬДЕР ОРКЕСТРАЦИЯСЫ

Аңдатпа. Бұл мақалада статистикалық қасиеттері мен тұжырымдамалары уақыт өте келе өзгередін деректер ағындарын өңдеу жағдайында пайдаланылатын машиналық оқыту алгоритмдерін жаңарту мәселесі қарастырылады. Статикалық деректер жиындарына арналған дәстүрлі тәсілдер мұндай динамикалық жағдайларда тұрақтылық пен дәлдікті қамтамасыз ете алмайды.

Жүйе күйлеріне негізделген модельдерді оркестрациялау тәсілі ұсынылады, ол бақылау, өзгерістерді анықтау және шешім қабылдау механизмдерін бірыңғай құрылымға біріктіреді. Ұсынылған тәсіл жүйенің



күй моделін пайдаланады, оның тұрақтылығын және күтілетін мінез-құлықтан ауытқу дәрежесін бағалауға мүмкіндік береді, осылайша ең қолайлы бейімделу әдістерін таңдауға мүмкіндік береді.

Зерттеу нәтижелері ұсынылған тәсілдің тұрақты болжамдарды қамтамасыз ететінін, модельдің жалпы өнімділігін жақсартатынын және өзгеретін жағдайларға төзімділігін арттыратынын көрсетеді. Өзірленген тәсілді сенімділік, бейімделу және бастапқы деректердегі өзгерістерге тез жауап беру мүмкіндігі маңызды болып табылатын нақты уақыт жүйелерінде, соның ішінде қорғаныс бағытындағы жүйелерде қолдануға болады.

Түйінді сөздер: бейімделгіш оқыту, ағындық деректер, концептуалдық дрейф, машиналық оқыту, модельдерді оркестрациялау, әскери қолданыс.

Венера Рыстыгулова, к.ф.-м.н., ассоциированный профессор, K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Астана, Казахстан, rystygulovav@mail.ru

Айгуль Абильдина, магистр, сеньор-лектор, K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business, Астана, Казахстан, abildina12@mail.ru

Бауыржан Абжанов, генерал-майор, PhD, Начальник Национального университета обороны РК, National Defense University of the Republic of Kazakhstan, Астана, Казахстан

ОРКЕСТРАЦИЯ АДАПТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ СОСТОЯНИЯ В ДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКАХ ДАННЫХ ДЛЯ ВОЕННЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Аннотация. В данной статье рассматривается проблема модификации алгоритмов машинного обучения при их использовании для обработки потоков данных, статистические свойства и концепции которых меняются с течением времени. Традиционные методы, опирающиеся на статические и неизменные наборы данных, не обеспечивают точности результатов в условиях динамически меняющихся данных, поэтому возникает потребность в новых динамических методах адаптации к таким изменениям.

В качестве методологической основы предложена архитектура обработки, управляемая состоянием системы. Она объединяет механизмы мониторинга для отслеживания и обнаружения изменений и процессы принятия решений в единую систему. Данный подход предполагает использование модели состояния системы, позволяющей оценивать ее стабильность и степень отклонения от ожидаемого поведения, что дает возможность выбирать наиболее подходящие методы адаптации.

Результаты исследования показывают, что предложенный подход обеспечивает более стабильные прогнозы, повышает общую эффективность модели и увеличивает ее устойчивость к изменению условий. Разработанный



подход может применяться в системах реального времени, где критически важны надежность, адаптивность и способность быстро реагировать на изменения в исходных данных, включая оборонно-ориентированные системы.

Ключевые слова: адаптивное обучение, потоковые данные, концептуальный дрейф, машинное обучение, оркестрация моделей, военное применение

Received: June 06, 2026

Peer-reviewed: June 08, 2026

Accepted: June 12, 2026



А.Е. Аязбай¹, А.М. Узбекбаев¹, Ғ.Қ. Сергазин²

¹Energo University, Алматы, Казахстан

²Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Алматы, Казахстан

E-mail: niipntkz@gmail.com

СБОР И ПРЕДОБРАБОТКА ДАННЫХ С SWIR-КАМЕР ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ

Аннотация. В статье рассматривается задача сбора и предварительной обработки данных, получаемых с SWIR-камер, для последующего обучения нейронной сети распознаванию объектов в условиях ограниченной видимости. Актуальность исследования обусловлена тем, что изображения коротковолнового инфракрасного диапазона обладают высокой информативностью при тумане, задымлении и низкой освещенности, однако характеризуются специфическими шумами InGaAs-матриц, наличием дефектных пикселей и пониженной контрастностью. В работе сформирован специализированный набор данных, включающий изображения пешеходов и транспортных средств, выполненные в различных уличных условиях. Предложен двухэтапный алгоритм предобработки, включающий коррекцию неоднородности (NUC) и адаптивное выравнивание гистограммы (CLAHE). Для оценки эффективности подхода использована архитектура YOLOv8. Экспериментальные результаты показали, что предложенная методика позволяет повысить значение PSNR на 18,4%, SSIM на 12,6%, а также увеличить точность распознавания объектов по метрике mAP@0.5 до 0,87 для транспортных средств и до 0,79 для пешеходов. Показано, что разработанный пайплайн может применяться в системах всепогодного мониторинга и беспилотного транспорта в режиме реального времени.

Ключевые слова: SWIR-камера, коротковолновый инфракрасный диапазон, предобработка изображений, коррекция неоднородности, CLAHE, YOLOv8, распознавание объектов, компьютерное зрение, InGaAs, всепогодный мониторинг.

Введение.

В последние годы системы компьютерного зрения сталкиваются с необходимостью обеспечения надежного распознавания объектов в условиях ограниченной видимости, таких как густой туман, задымление или отсутствие активного освещения. Традиционные сенсоры видимого диапазона (RGB) в подобных сценариях демонстрируют резкое снижение точности из-за сильного атмосферного рассеяния. В таких условиях все



большой интерес вызывают камеры коротковолнового инфракрасного диапазона (SWIR, 900–1700 нм), которые могут использоваться в системах наблюдения, мониторинга и автоматического распознавания объектов [1]. Их преимущество связано с особенностями формирования изображения: в отличие от LWIR-диапазона, SWIR-съемка основана на отраженном излучении, благодаря чему на кадрах лучше сохраняются контуры, текстура поверхностей и границы объектов [2–3]. Это особенно важно при работе в тумане, дымке и при слабом освещении, где возможности RGB-камер заметно снижаются [3–4]. Однако использование SWIR-данных в задачах глубокого обучения также связано с рядом практических проблем:

1) Специфические шумы: для InGaAs-матриц характерны повышенный темновой ток, наличие дефектных пикселей и неравномерность отклика, что может ухудшать качество входных изображений и снижать устойчивость сверточных моделей [5–6]».

2) Дефицит данных: в отличие от видимого диапазона, общедоступные наборы данных (datasets) в SWIR-диапазоне крайне ограничены, что требует разработки эффективных методик сбора и синтеза данных [1,7].

3) Необходимость кастомной предобработки: Прямая подача «сырых» (RAW) данных с SWIR-сенсора в нейросети, обученные на RGB-изображениях, приводит к низкой сходимости моделей.

Таким образом, разработка специализированных алгоритмов предобработки и методологии формирования качественных выборок, данных является необходимым условием для создания высокоточных интеллектуальных систем распознавания объектов на базе SWIR-технологий.

Несмотря на очевидные преимущества SWIR-диапазона для задач компьютерного зрения, эффективная интеграция данных с таких сенсоров в современные архитектуры нейронных сетей сталкивается с рядом барьеров, которые до сих пор не имеют универсального решения в литературе.

Основная научная проблема заключается в существенном несоответствии (domain gap) между характеристиками изображений, на которых традиционно обучаются современные детекторы (ImageNet, COCO в RGB-спектре), и спецификой данных, получаемых с InGaAs-матриц [1,8]. Ключевые аспекты этой проблемы включают:

1) Низкое соотношение сигнал/шум (SNR) и артефакты сенсора: Изображения в коротковолновом ИК-диапазоне подвержены специфическим шумам, таким как фиксированный шумовой паттерн (FPN) и выраженная температурная зависимость темнового тока. Как отмечается в ряде работ, стандартные методы фильтрации, хорошо зарекомендовавшие себя для изображений видимого диапазона, не всегда подходят для SWIR-кадров, поскольку вместе с шумом могут подавлять и полезные мелкие детали, важные при распознавании удаленных объектов [6, 9].

2) Проблема динамического диапазона и контрастности. В SWIR-диапазоне объекты нередко слабо выделяются на фоне сцены, особенно в условиях тумана, дымки или низкой освещенности. В результате без



специальной адаптивной предобработки детекторы могут хуже определять границы объекта и давать больше ошибочных срабатываний [10, 11].

3) Неэффективность стандартных методов аугментации. Типовые процедуры аугментации, распространенные для RGB-данных, не учитывают особенности формирования SWIR-изображения. Поэтому при подготовке обучающей выборки необходимы такие методы предобработки, которые улучшают качество кадров, но при этом сохраняют характерные фотометрические свойства ИК-сигнала [7, 12].

Таким образом, отсутствие стандартизированного протокола предобработки данных со SWIR-камер, учитывающего аппаратные шумы и специфику отражательной способности объектов, ограничивает потенциал применения систем искусственного интеллекта в критически важных отраслях. Настоящее исследование направлено на решение задачи повышения качества входных данных для нейронных сетей через синтез алгоритмов коррекции неоднородности и методов повышения локального контраста.

Целью настоящего исследования является разработка и верификация комплексной методики сбора и предварительной обработки данных коротковолнового инфракрасного диапазона (SWIR) для минимизации влияния аппаратных шумов InGaAs-матриц и повышения точности распознавания объектов нейронными сетями в сложных метеорологических условиях.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) Сформировать специализированный набор данных, включающий изображения объектов в SWIR-диапазоне при различных сценариях освещенности и атмосферных помехах.

– разработать алгоритм предобработки, сочетающий коррекцию неоднородности (NUC) и методы локального повышения контраста для уменьшения влияния характерных искажений SWIR-сенсора [9, 13];

– провести сравнительный анализ работы современных архитектур распознавания на исходных и предварительно обработанных SWIR-изображениях [14, 15].

Научная новизна работы состоит в том, что предложенный пайплайн подготовки данных ориентирован именно на особенности SWIR-кадров и позволяет уменьшить различия между такими изображениями и данными, на которых обычно обучаются модели видимого диапазона [1, 8]. Практический интерес исследования связан с возможностью использования полученных решений в системах автономного транспорта и мониторинга, где требуется устойчивое машинное зрение в сложных погодных условиях [3, 16].

Обзор литературы.

Публикации последних лет показывают, что область применения коротковолнового инфракрасного диапазона заметно расширилась. Если раньше SWIR-системы в основном рассматривались как специализированные



лабораторные или специальные решения, то сегодня они все чаще используются в робототехнике, системах наблюдения и мониторинга.

Тем не менее, основной проблемой, обсуждаемой в академической среде, остается артефактность получаемых изображений. В ранних работах акцент делался исключительно на аппаратной калибровке сенсоров. Однако современные исследования указывают на то, что классические методы калибровки часто не учитывают временной дрейф параметров матрицы, что создает препятствия для стабильной работы алгоритмов машинного зрения [9]. В частности, авторы [13] предлагают переходить к адаптивным методам коррекции неоднородности (NUC), которые способны подстраиваться под изменяющуюся температуру сенсора в реальном времени.

С развитием сверточных нейронных сетей (CNN) и трансформеров (ViT) фокус исследований сместился в сторону интеграции методов обработки сигналов непосредственно в пайплайны обучения моделей. Как отмечают в статье [1], простое увеличение объема данных не решает проблему «зашумленности» SWIR-кадров. В литературе последних лет активно обсуждаются два ключевых подхода к улучшению качества данных перед распознаванием:

1) Методы image-to-image translation и domain adaptation для повышения переносимости моделей между спектральными доменами [12, 14].

2) Физически-ориентированная предобработка: Применение алгоритмов, учитывающих квантовую эффективность InGaAs-детекторов для восстановления потерянных деталей в тенях [6, 17].

Особое внимание в обзоре следует уделить работам, в которых отмечается, что фиксированный шумовой паттерн (FPN) и неравномерность отклика SWIR-матрицы ухудшают извлечение информативных признаков и отрицательно влияют на работу алгоритмов детекции [6, 9]. Это подтверждает гипотезу о том, что этап специализированной предобработки является неотъемлемым звеном при проектировании систем распознавания в ИК-спектре.

Второй ключевой блок исследований посвящен выбору и модификации архитектур глубокого обучения. Долгое время стандартом для ИК-диапазона считались модели семейства YOLO (You Only Look Once) благодаря их способности работать в режиме реального времени. Однако, как указывают последние исследования, стандартные веса, предобученные на датасете COCO (видимый диапазон), не всегда эффективны для SWIR-изображений из-за отсутствия цветовой информации и иного распределения градиентов яркости [8, 14].

Современные подходы к решению этой проблемы разделяются на три направления:

1) Многоспектральное слияние (Multi-spectral Fusion). В ряде работ рассматриваются двухпоточковые архитектуры, в которых признаки извлекаются одновременно из RGB- и SWIR-каналов [17]. Такой подход может повышать качество распознавания за счет дополнительной



информации из видимого диапазона, однако для мобильных систем он ограничен более сложной аппаратной реализацией и необходимостью точной юстировки камер [7].

2) Адаптация домена (Domain Adaptation). Исследования в этой области показывают, что методы Unsupervised Domain Adaptation позволяют уменьшать различия между признаками видимого и инфракрасного диапазонов без необходимости значительного увеличения объема ручной разметки SWIR-кадров [14].

3) Легковесные трансформеры (Vision Transformers, ViT). В последние годы усилился интерес к применению механизмов глобального внимания при обработке ИК-изображений. По данным ряда работ, такие архитектуры могут быть более устойчивыми при распознавании низкоконтрастных объектов, поскольку учитывают контекст всего изображения, а не только локальные признаки [10, 14].»

Серьезным ограничением для развития SWIR-направления по-прежнему остается нехватка крупных открытых наборов данных. Большая часть доступных датасетов, включая KAIST и FLIR, создавалась прежде всего для теплового диапазона (LWIR), который по своим физическим особенностям отличается от отражательного SWIR [7,8]. Именно поэтому в последних исследованиях все чаще обсуждается так называемая физически реалистичная аугментация данных. Речь идет не о стандартных геометрических преобразованиях, а о моделировании тех эффектов, которые действительно возникают при SWIR-съемке: атмосферного ослабления сигнала, шумов квантования и особенностей работы InGaAs-сенсоров. Такой подход позволяет расширять обучающую выборку без сильного отрыва от реальных условий съемки и тем самым повышать устойчивость модели при тестировании в тумане или при задымлении [3, 16].

В целом анализ литературы показывает, что для SWIR-изображений недостаточно просто перенести стандартные модели из видимого диапазона. Более надежные результаты дает подход, в котором учитываются как особенности предварительной обработки данных, так и специфика самой архитектуры нейронной сети применительно к ИК-сигналу.

Материалы и методы.

Для проведения обучения и последующего тестирования нейронной сети был собран специализированный набор данных, ориентированный на сцены городского наблюдения и задачи автономного движения.

Протокол сбора данных:

Объекты интереса: люди (пешеходы) и транспортные средства (легковые автомобили, автобусы).

Дистанции: съемка велась на дистанциях от 20 до 150 метров.

Разметка: аннотирование изображений выполнялось в формате YOLO (классы: person, car).



Разделение выборки: общий объем данных был разделен в пропорции 70% — обучение, 15% — валидация, 15% — тест.

Использование реальных уличных данных позволило учесть естественные тепловые отражения от асфальта и специфические блики на стеклах транспортных средств, которые в SWIR-диапазоне выглядят иначе, чем в видимом спектре [1, 7].

Учитывая аппаратные особенности InGaAs-матриц, «сырые» данные (RAW) перед подачей на вход нейронной сети подвергались двухэтапной обработке: коррекции неоднородности и адаптивному повышению контрастности.

Для устранения фиксированного шумового паттерна (FPN) применялся метод двухточечной коррекции [9, 18]. Математически скорректированное значение пикселя $Y(i, j)$ вычисляется по формуле:

$$Y(i, j) = G(i, j) \cdot X(i, j) + B(i, j),$$

где $X(i, j)$ — исходное значение яркости пикселя;

$G(i, j)$ — матрица коэффициентов усиления (gain);

$B(i, j)$ — матрица смещения (offset).

Для обработки дефектных («битых») пикселей, количество которых в SWIR-матрицах выше, чем в CMOS, использовался метод медианной интерполяции по соседним элементам 3×3 [3, 6].

Так как для SWIR-изображений нередко характерен слабый локальный контраст и близкое распределение уровней яркости, на следующем этапе был использован алгоритм ограниченного адаптивного выравнивания гистограммы (CLAHE) [10, 11]. В отличие от обычного выравнивания, этот метод работает не со всем изображением сразу, а с отдельными локальными областями, что позволяет сделать детали более различимыми без чрезмерного усиления фонового шума. При этом распределение яркости внутри каждой локальной области ограничивается порогом C_{clip} , а итоговое значение пикселя определяется через кумулятивную функцию распределения (CDF):

$$h(v) = clip \left(\frac{L-1}{N} \sum_{j=0}^v p(j) \right),$$

где L — количество уровней серого;

N — число пикселей в блоке;

$p(j)$ — плотность распределения яркости.

Это позволяет нейросети более четко детектировать границы объектов (градиенты) даже в условиях низкой освещенности [3, 11].

Для решения задачи детекции объектов была выбрана архитектура YOLOv8, поскольку она сочетает достаточно высокую точность с возможностью работы в режиме реального времени. При обучении использовалась комбинированная функция потерь: компонент *Complete - IoU*

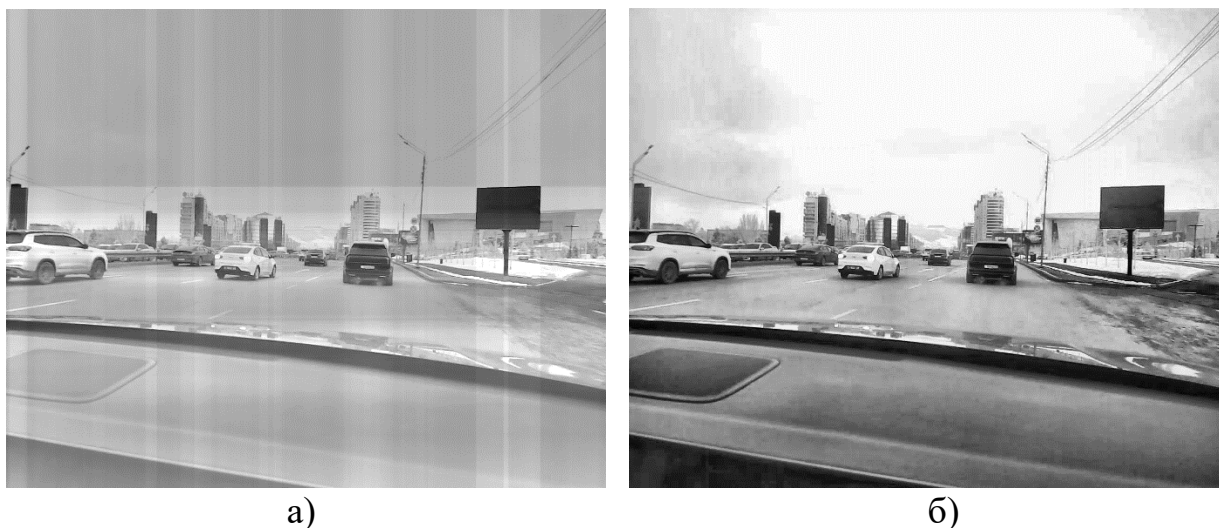
(CIoU) применялся для локализации, а бинарная кросс-энтропия — для классификации:

$$L_{total} = \lambda_{box}L_{CIoU} + \lambda_{cls}L_{cls},$$

Использование такой схемы позволило обеспечить устойчивое обучение модели на монохромных SWIR-изображениях [1, 15].

Результаты.

Проведенные эксперименты показали, что применение последовательности предобработки NUC + CLANE заметно улучшает качество SWIR-кадров как по визуальному восприятию, так и по количественным показателям. Для оценки этих изменений использовались метрики PSNR и SSIM, результаты по которым приведены на (рисунок 1).



- а) исходный RAW-кадр с выраженным фиксированным шумом;*
б) изображение после коррекции неоднородности и локального повышения контраста

Рисунок 1 – Сопоставление исходного и предварительно обработанного SWIR-изображений

В среднем по выборке использование предложенной методики привело к увеличению PSNR на 18,4%, а SSIM — на 12,6%. Это указывает на то, что после предобработки изображение становится чище, при этом его структурно значимые детали в основном сохраняются.

Чтобы оценить, как предварительная обработка влияет на качество распознавания, модель YOLOv8 обучали на двух вариантах данных: исходных SWIR-кадрах и изображениях после предобработки.

Анализ результатов показывает, что наибольший прирост точности (средний mAP вырос на 17%) наблюдается в классе «Пешеход».

Таблица 1 - Сравнение метрик точности нейронной сети

Тип данных	Класс	Precision (P)	Recall (R)	mAP@0.5
RAW (без обработки)	Автомобиль	0.72	0.68	0.71
	Пешеход	0.64	0.59	0.61
После предобработки	Автомобиль	0.89	0.84	0.87
	Пешеход	0.82	0.76	0.79

Это объясняется тем, что малоразмерные объекты с низким контрастом в SWIR-диапазоне сильнее всего маскируются шумом InGaAs-матрицы (рисунок 2). После устранения битых пикселей и выравнивания гистограммы нейросеть начинает стабильно идентифицировать границы силуэта человека.



а) на необработанных данных; б) после предобработки.

Рисунок 2 – Примеры детекции объектов на тестовых кадрах

Среднее время обработки одного кадра (предобработка + инференс нейросети) на графическом процессоре (GPU) составило 12.5 мс, что соответствует частоте 80 FPS. Это подтверждает возможность использования, предложенного пайплайна в системах реального времени.

Обсуждение.

Полученные результаты подтверждают, что аппаратные особенности SWIR-сенсоров на основе InGaAs являются одним из ключевых факторов, ограничивающих точность нейросетевых моделей. Рост метрики mAP после применения предложенной предобработки показывает, что качество исходных SWIR-данных напрямую влияет на итоговую работу детектора. Полученный результат согласуется с публикациями, в которых отмечается, что фиксированный шумовой рисунок и неравномерность отклика сенсора ухудшают качество входных изображений и тем самым снижают устойчивость алгоритмов распознавания [6, 9].



Примечательно, что наибольший прирост точности наблюдался именно для класса «Пешеход». Вероятно, это связано с тем, что транспортные средства из-за своих размеров и более выраженной формы распознаются моделью сравнительно устойчиво даже при наличии шума. Пешеходы, напротив, на больших дистанциях занимают меньшую площадь кадра и в SWIR-изображении часто имеют слабее выраженные границы. После применения CLANE локальный контраст повышается, и признаки фигуры становятся более доступными для извлечения моделью.

Вместе с тем в ходе экспериментов было выявлено и ограничение предложенного подхода. При сильных прямых бликах и высокой интенсивности солнечного излучения двухточечная коррекция не всегда обеспечивает одинаково стабильный результат, из-за чего на отдельных участках кадра могут появляться локальные пересвеченные области. Одним из возможных направлений дальнейшей работы является использование методов расширения динамического диапазона (HDR) уже на этапе регистрации данных [19].

Заключение.

В работе рассмотрен подход к сбору и предварительной обработке данных коротковолнового инфракрасного диапазона для задач компьютерного зрения. По результатам проведенного исследования можно выделить следующие основные результаты:

1) Сформирован и размечен собственный набор SWIR-изображений, включающий сцены с пешеходами и транспортными средствами, снятые в реальных условиях уличного освещения и при наличии атмосферных помех.

2) Разработан и реализован алгоритм предобработки, сочетающий коррекцию неоднородности и адаптивное выравнивание гистограммы, что позволило улучшить качество исходных данных; в частности, значение PSNR увеличилось на 18,4%.

3) Показано, что использование предварительно обработанных изображений повышает точность детекции при применении архитектуры YOLOv8: значение mAP@0.5 составило 87% для транспортных средств и 79% для пешеходов.

Практическая значимость работы связана с возможностью применения предложенного подхода в системах мониторинга и беспилотного транспорта, для которых особенно важна устойчивость распознавания объектов в условиях тумана, слабого освещения и ограниченной видимости. В дальнейшем целесообразно сосредоточить внимание на оптимизации предложенных алгоритмов для их применения на маломощных встраиваемых платформах класса Edge AI.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке КН МНВО РК, № AP261061/0224.



ЛИТЕРАТУРА

1. Pavlović, M. S., Milanović, P. D., Stanković, M. S., Perić, D. B., Popadić, I. V., & Perić, M. V. (2022). Deep Learning Based SWIR Object Detection in Long-Range Surveillance Systems: An Automated Cross-Spectral Approach. *Sensors*, 22(7), 2562. <https://doi.org/10.3390/s22072562>
2. Park, J., Hong, J., Shim, W., & Jung, D.-J. (2023). Multi-Object Tracking on SWIR Images for City Surveillance in an Edge-Computing Environment. *Sensors*, 23(14), 6373. <https://doi.org/10.3390/s23146373>
3. Bessonov, A., Rozanov, A., White, R., Suwito, G., Medina-Salazar, I., Lutfullin, M., Gusev, D., & Shikov, I. (2025). All-Weather Drone Vision: Passive SWIR Imaging in Fog and Rain. *Drones*, 9(8), 553. <https://doi.org/10.3390/drones9080553>
4. Song, H., Yeo, S., Jin, Y., Park, I., Ju, H., Nalcakan, Y., & Kim, S. (2024). Short-Wave Infrared (SWIR) Imaging for Robust Material Classification: Overcoming Limitations of Visible Spectrum Data. *Applied Sciences*, 14(23), 11049. <https://doi.org/10.3390/app142311049>
5. Zhu, B., & Jonathan, H. (2024). A Review of Image Sensors Used in Near-Infrared and Shortwave Infrared Fluorescence Imaging. *Sensors*, 24(11), 3539. <https://doi.org/10.3390/s24113539>
6. Dong, S., Xiong, Z., Li, R., Chen, Y., & Wang, H. (2022). High-Performance Enhancement of SWIR Images. *Electronics*, 11(13), 2001. <https://doi.org/10.3390/electronics11132001>
7. Jin, Youngwan & Kovac, Michal & Nalçakan, Yağız & Ju, Hyeongjin & Song, Hanbin & Yeo, Sanghyeop & Kim, Shiho. (2025). RASMD: RGB And SWIR Multispectral Driving Dataset for Robust Perception in Adverse Conditions. 10.48550/arXiv.2504.07603.
8. Bustos, Nicolas & Mashhadi, Mehra & Lai-Yuen, Susana & Sarkar, Sudeep & Das, Tapas. (2023). A systematic literature review on object detection using near infrared and thermal images. *Neurocomputing*. 560. 126804. 10.1016/j.neucom.2023.126804.
9. Su, G., Wang, Y., & He, D. (2026). Real-Time Non-Uniformity Correction Method for 800 FPS High-Frame-Rate Short-Wave Infrared Images. *Sensors*, 26(7), 2209. <https://doi.org/10.3390/s26072209>
10. Zhao, C., Wang, J., Su, N., Yan, Y., & Xing, X. (2022). Low Contrast Infrared Target Detection Method Based on Residual Thermal Backbone Network and Weighting Loss Function. *Remote Sensing*, 14(1), 177. <https://doi.org/10.3390/rs14010177>
11. Liu, J., Zhou, X., Wan, Z., Yang, X., He, W., He, R., & Lin, Y. (2023). Multi-Scale FPGA-Based Infrared Image Enhancement by Using RGF and CLAHE. *Sensors*, 23(19), 8101. <https://doi.org/10.3390/s23198101>
12. Marnissi, Mohamed & Fradi, Hajer & Sahbani, Anis & ESSOUKRI BEN AMARA, Najoua. (2021). Unsupervised thermal-to-visible domain



adaptation method for pedestrian detection. Pattern Recognition Letters. 153. 10.1016/j.patrec.2021.11.024.

13. Hu, Bin-Lin & Shijing, Hao & Sun, De-Xin & Liu, Yinnian. (2017). A novel scene-based non-uniformity correction method for SWIR push-broom hyperspectral sensors. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 131. 160-169. 10.1016/j.isprsjprs.2017.08.004.

14. Li, Yong & Miao, Naipeng & Ma, Liangdi & Shuang, Feng & Huang, Xingwen. (2023). Transformer for object detection: Review and benchmark. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 126. 107021. 10.1016/j.engappai.2023.107021.

15. Li, J., Zhang, J., Shao, Y., & Liu, F. (2024). SRE-YOLOv8: An Improved UAV Object Detection Model Utilizing Swin Transformer and RE-FPN. Sensors, 24(12), 3918. <https://doi.org/10.3390/s24123918>

16. Yeo, Sanghyeop & Nalçakan, Yağız & Jin, Youngwan & Park, Incheol & Ju, Hyeongjin & Kim, Shiho. (2025). Seeing through the rain: An empirical assessment of short-wave infrared imaging on enhancing autonomous vehicle perception under rainy weather. Measurement. 259. 119654. 10.1016/j.measurement.2025.119654.

17. Cimorelli, C., Millan-Romera, J. A., Voos, H., & Sanchez-Lopez, J. L. (2025). Hardware, Algorithms, and Applications of the Neuromorphic Vision Sensor: A Review. Sensors, 25(19), 6208. <https://doi.org/10.3390/s25196208>

18. Dong, M., Shen, H., Jia, P., Sun, Y., Liang, C., Zhang, F., & Hou, J. (2023). Calibration Method for Airborne Infrared Optical Systems in a Non-Thermal Equilibrium State. Sensors, 23(14), 6326. <https://doi.org/10.3390/s23146326>

19. Park, Min-Jun & Lee, Dong-Yeon & Lee, Sang-Jun & Kim, Hyeon-June. (2025). A Dual-Exposure Readout Integrated Circuit for Dynamic Range Enhancement in SWIR Image Sensors. IEEE Sensors Journal. PP. 1-1. 10.1109/JSEN.2025.3587528.

Абу-Алим Аязбай, PhD, аға оқытушы, Energo University, Алматы, Қазақстан, work_abu@hotmail.com

Арман Узбекбаев, докторант, Energo University, Алматы, Қазақстан, niipntkz@gmail.com

Ғани Сергазин, PhD, қауымдастырылған профессор, Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Алматы, Қазақстан, g.balbayev@gmail.com

ОБЪЕКТИЛЕРДІ ТАНУҒА АРНАЛҒАН НЕЙРОНДЫҚ ЖЕЛІНІ ОҚЫТУ ҮШІН SWIR-КАМЕРАЛАРДАН ДЕРЕКТЕРДІ ЖИНАУ ЖӘНЕ АЛДЫН АЛА ӨНДЕУ

Андатпа. Мақалада көріну шектеулі жағдайларда объектілерді тануға арналған нейрондық желіні оқыту үшін SWIR-камералардан алынатын



деректерді жинау және алдын ала өңдеу мәселесі қарастырылады. Зерттеудің өзектілігі қысқа толқынды инфрақызыл диапазондағы кескіндердің тұман, түтін және төмен жарық жағдайларында жоғары ақпараттылығымен түсіндіріледі, алайда мұндай деректер InGaAs-матрицаларына тән шуылдармен, ақаулы пиксельдермен және төмен контрастпен сипатталады. Жұмыста жаяу жүргіншілер мен көлік құралдарының әртүрлі көше жағдайларында түсірілген кескіндерін қамтитын мамандандырылған деректер жинағы қалыптастырылды. Біртексіздікті түзету (NUC) мен гистограмманы адаптивті тегістеу (CLAHE) әдістерін қамтитын екі кезеңді алдын ала өңдеу алгоритмі ұсынылды. Әдістің тиімділігін бағалау үшін YOLOv8 архитектурасы қолданылды. Эксперимент нәтижелері ұсынылған тәсілдің PSNR көрсеткішін 18,4%-ға, SSIM мәнін 12,6%-ға арттыруға, сондай-ақ mAP@0.5 метрикасы бойынша көлік құралдарын тану дәлдігін 0,87-ге және жаяу жүргіншілерді тану дәлдігін 0,79-ға дейін көтеруге мүмкіндік беретінін көрсетті. Өзірленген пайплайнның нақты уақыт режимінде жұмыс істейтін ауа райына тәуелсіз мониторинг және ұшқышсыз көлік жүйелерінде қолдануға жарамды екені дәлелденді.

Түйінді сөздер: SWIR-камера, қысқа толқынды инфрақызыл диапазон, кескіндерді алдын ала өңдеу, біртексіздікті түзету, CLAHE, YOLOv8, объектілерді тану, компьютерлік көру, InGaAs, ауа райына тәуелсіз мониторинг.

Abu-Alim Ayazbay, PhD, senior lecturer, Energo University, Almaty, Kazakhstan, work_abu@hotmail.com

Arman Uzbekbayev, doctoral student, Energo University, Almaty, Kazakhstan, niipntkz@gmail.com

Gani Sergazin, PhD, associate professor, Mukhametzhan Tynyshbayev ALT University, Almaty, Kazakhstan, g.balbayev@gmail.com

COLLECTION AND PREPROCESSING OF DATA FROM SWIR CAMERAS FOR TRAINING A NEURAL NETWORK FOR OBJECT RECOGNITION

Abstract. This paper addresses the problem of collecting and preprocessing data acquired from SWIR cameras for training a neural network to recognize objects under limited-visibility conditions. The relevance of the study is обусловлена the high informativeness of short-wave infrared images in fog, smoke, and low-light environments; however, such data are affected by InGaAs sensor noise, defective pixels, and reduced contrast. A specialized dataset containing images of pedestrians and vehicles captured in various outdoor conditions was created. A two-stage preprocessing pipeline was proposed, including non-uniformity correction (NUC) and contrast-limited adaptive



histogram equalization (CLAHE). The YOLOv8 architecture was used to evaluate the effectiveness of the proposed approach. Experimental results showed that the method increased PSNR by 18.4% and SSIM by 12.6%, while improving object recognition accuracy up to 0.87 mAP@0.5 for vehicles and 0.79 for pedestrians. The results demonstrate that the developed pipeline can be applied in real-time all-weather monitoring systems and autonomous transport solutions.

Keywords: SWIR camera, short-wave infrared range, image preprocessing, non-uniformity correction, CLAHE, YOLOv8, object recognition, computer vision, InGaAs, all-weather monitoring.

Поступила: 10 апрель 2026 года

Рецензирована: 08 июня 2026 года

Принята: 12 июня 2026 года



Ж.С. Есенгалиева¹, О.А. Усатова², А.С. Есенгалиева²

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Астана, Казахстан,

²Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK,
Алматы, Казахстан

E-mail: olgaussatova@gmail.com

РАЗРАБОТКА ИНТЕГРАЦИОННОГО ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ БЕЗОПАСНОГО ХРАНЕНИЯ И ОБМЕНА ДАНЫМИ НА ОСНОВЕ БЛОКЧЕЙН

Аннотация. В целях фиксации данных в интеллектуальной антикоррупционной системе защиты информации и валидации учебных достижений, а также официальных документов студентов и выпускников вузов и военных учебных заведений Республики Казахстан разработан программный модуль. В статье рассмотрена технология блокчейн Ethereum на основе обозревателя Blockscout, который фиксирует детали транзакции в тестовой сети. Исследовательской группой представлена практическая реализация системы хранения образовательных документов на базе блокчейна. Запись служит подтверждением успешного выполнения смарт-контракта, предназначенного для передачи академического транскрипта. Использование тестовой сети позволяет верифицировать архитектуру решения, минимизировать издержки на этапе разработки и гарантировать, что каждый транскрипт получает уникальный, криптографически защищенный оттиск в публичном реестре. Также в статье приведен библиографический обзор касательно применения блокчейн Ethereum в сфере образования.

Таким образом, предложен сервис, вызываемый в процессе работы на портале студента или выпускника с применением технологии блокчейн, реализованный с помощью обозревателя Blockscout на языке программирования Solidity.

Ключевые слова: блокчейн, Ethereum, смарт-контракт, Blockscout, транзакции.

Введение.

Блокчейн — информационная технология, способная обеспечить безопасность инфраструктуры передачи и хранения данных [1]. Блокчейн Ethereum разрабатывает эффективные смарт-контракты, которые взаимодействуют с другими смарт-контрактами для принятия решений, хранения данных и отправки эфира другим пользователям [2]. Перспектива



использования блокчейн транзакционных систем, заключается в том, что они по своей природе более надежны, чем предыдущие решения [3].

В эпоху развития различных мошеннических атак в глобальной сети, антикоррупционных рисков, использование технологии блокчейн во многих оцифрованных областях человеческой деятельности позволяет преодолеть всевозможные неверные действия злоумышленников.

К примеру, авторы [4] предлагают решение использования блокчейна, с устранением необходимости централизации, что открывает путь к доверию и безопасности в отношении цифровых учетных данных. Информация о сертификатах надежно хранится в смарт-контрактах на блокчейне Ethereum, что позволяет автоматизировать процессы проверки для повышения эффективности.

Блокчейн Ethereum широко внедряется в образовательную сферу деятельности. К слову, в трудах [5] исследуется возможность использования блокчейна Ethereum для разработки надежной системы на основе невзаимозаменяемых токенов, выпущенные университетом. Токены представляют собой зачетные единицы модулей, выданные его факультетом и принадлежащие студентам после выполнения требований модулей в системе управления зачетными единицами. Децентрализованное приложение NFT-merit размещено в межпланетной файловой системе (IPFS) в виде децентрализованной сети узлов.

Ранее нашей исследовательской группой был проведен обзор платформ блокчейн-технологий, которые применяются с целью повышения безопасности данных посредством передачи цифровых активов без центрального администратора. Данное исследование предлагает уникальную перспективу, предоставляя техническое сравнение блокчейн-платформ с точки зрения теории создания единой цифровой платформы высшего образования для повышения надежности хранимых данных и способов верификации их подлинности. Среди имеющихся блокчейн-технологий для проведения сравнительного анализа выделены следующие платформы – Ethereum, Solana, Algorand. На основе библиографических исследований и сравнительного анализа устойчивости представленных блокчейн-платформ предложены ключевые элементы SWOT-анализа. Результаты сравнительного анализа опубликованы в статье [6].

Проведенный анализ подчеркивает важность адекватной языковой поддержки для ключевых аспектов разработки смарт-контрактов: управления активами, взаимодействия между контрактами и затратами. В частности, специализированные абстракции на уровне типов для создания активов, обмена ими и работы с ними являются фундаментальным элементом предотвращения распространенных ошибок и уязвимостей, таких как потеря активов, двойное расходование средств или несанкционированный перевод. В другой, но связанной учетной записи встроенная поддержка определенных функций базовой платформы (например, пользовательских токенов) имеет решающее значение для обеспечения безопасности и эффективности. С точки

зрения потенциала решения проблем, с которыми сталкивается образовательный сектор Ethereum известен своей функциональностью смарт-контрактов, которая позволяет создавать децентрализованные приложения и автоматизировать сложные рабочие процессы.

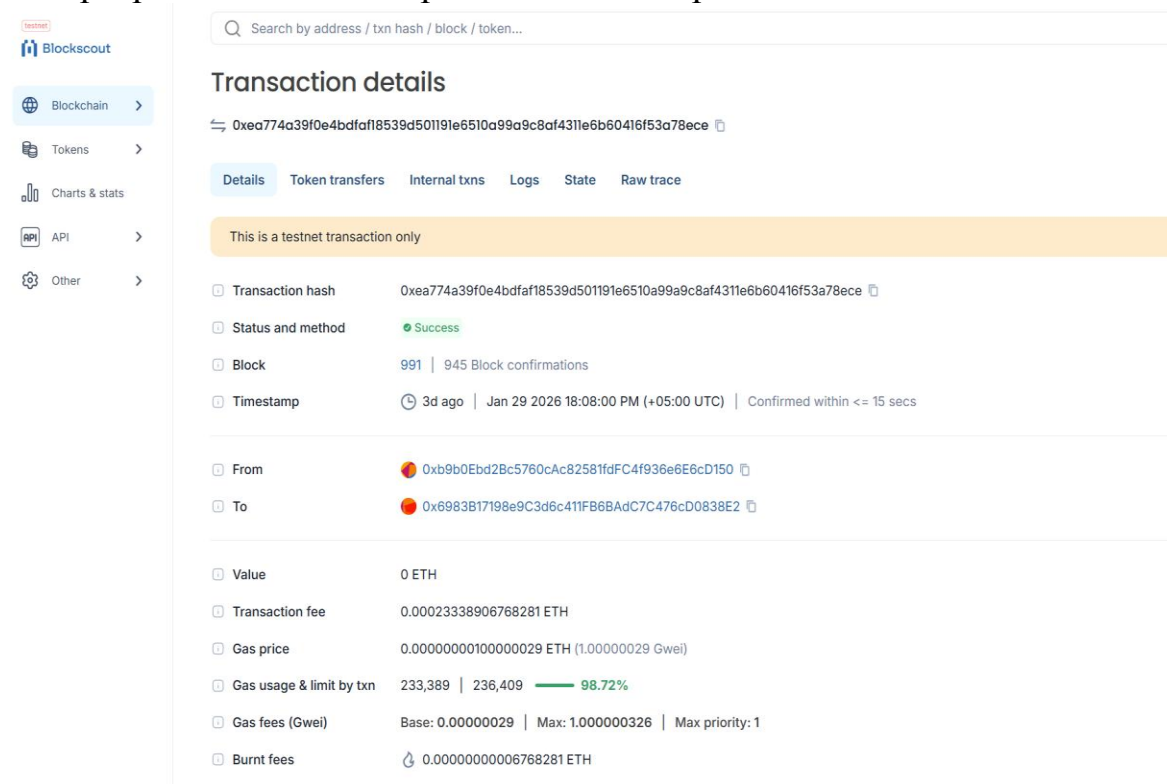
Таким образом, проведен обзор библиографии по применению блокчейн Ethereum, а также по ранее проведенному сравнительному анализу блокчейн-платформ Ethereum, Solana, Algorand выявлены основные параметры в рамках SWOT-анализа блокчейн-платформ [6].

Из обзора имеющихся решений на рынке, исследовательской группой принято решение об использовании блокчейн Ethereum, который позволит обеспечить безопасное хранение сертификатов, аттестатов, дипломов и иметь наличие достоверного, открытого и единого хранилища кандидатов с подтвержденными знаниями.

Материалы и методы.

В качестве материалов в данном исследовании, как описано выше, использована технология блокчейн Ethereum с применением в образовательном секторе Республики Казахстан.

На представленном скриншоте (рисунок 1) отображен интерфейс обозревателя блоков Blockscout, фиксирующий детали транзакции в тестовой сети (testnet). Данная запись служит подтверждением успешного выполнения смарт-контракта, предназначенного для передачи академического транскрипта. Blockscout – программа-оболочка для экосистемы Ethereum. Данная программа-оболочка предоставляет открытый исходник.



The screenshot displays the Blockscout testnet interface. On the left is a sidebar with navigation links: Blockchain, Tokens, Charts & stats, API, and Other. The main area is titled 'Transaction details' and shows a search bar at the top. Below the search bar, the transaction hash is displayed: 0xea774a39f0e4bdfaf18539d501191e6510a99a9c8af4311e6b60416f53a78ece. A yellow banner indicates 'This is a testnet transaction only'. The transaction status is 'Success'. The block number is 991, with 945 block confirmations. The timestamp is 3d ago, corresponding to Jan 29 2026 18:08:00 PM (+05:00 UTC), confirmed within 15 seconds. The 'From' address is 0xb9b0Ebd2Bc5760cAc82581fdFC4f936e6E6cD150 and the 'To' address is 0x6983B17198e9C3d6c411FB6BAdC7C476cD0838E2. The transaction value is 0 ETH. The transaction fee is 0.00023338906768281 ETH. The gas price is 0.000000001000000029 ETH (1.000000029 Gwei). The gas usage and limit by transaction are 233,389 and 236,409, respectively, with a 98.72% gas usage percentage. The gas fees (Gwei) are Base: 0.000000029, Max: 1.0000000326, and Max priority: 1. The burnt fees are 0.00000000006768281 ETH.

Рисунок 1 – Данные транзакции



Представленный скриншот демонстрирует практическую реализацию системы хранения образовательных документов на базе блокчейна. Использование тестовой сети позволяет верифицировать архитектуру решения, минимизировать издержки на этапе разработки и гарантировать, что каждый транскрипт получает уникальный, криптографически защищенный оттиск в публичном реестре.

Рассмотрим технические параметры транзакции, представленные в таблице 1:

Таблица 1 - Технические параметры транзакции

Название	Действие	Описание
Идентификатор транзакции	0xea774a39f0e4bdfaf18539d501191e6510a99a9c8af4311e6b60416f53a78ece.	Уникальный хэш обеспечивает неизменность и проверяемость записи в распределенном реестре
Статус исполнения	Success	Операция завершена успешно, что подтверждает корректность логики смарт-контракта
Временная метка	Транзакция зафиксирована 29 января 2026 года в 18:08:00 (UTC +05:00)	Время подтверждения составило менее 15 секунд, что свидетельствует о высокой пропускной способности сети на момент выполнения
Адресаты	From: 0xb9b0Ebd2Bc5760cAc82581fdFC4f936e6E6cD150	Адрес отправителя/инициатора
	To: 0x6983B17198e9C3d6c411FB6BadC7C476cD0838E2	Адрес смарт-контракта транскриптов
Экономические показатели	Value (Переданная стоимость): 0 ETH.	Это характерно для транзакций вызова функций контракта, где основной целью является запись или изменение данных (передача транскрипта), а не финансовый перевод

За технический анализ событий транзакции отвечает раздел Logs, который демонстрирует низкоуровневую фиксацию данных события (Event), инициированного смарт-контрактом по адресу 0x6983B17198e9C3d6c411FB6BadC7C476cD0838E2. Эти логи служат неизменяемым доказательством того, что определенные данные были успешно обработаны логикой контракта (рисунок 2).

Transaction details

```

0xea774a39f0e4bdfaf18539d501191e6510a99a9c8af4311e6b60416f53a78ece

```

[Details](#)
[Token transfers](#)
[Internal txns](#)
[Logs](#)
[State](#)
[Raw trace](#)

To see accurate decoded input data, the contract must be verified. [Verify the contract here](#)

Address  0x6983B17198e9C3d6c411EB6BAdC7C476cD0838E2 F

36

Topics [0](#) [0xfe18c84aba9622c89f9fb267039b264fcfb2ab599ed213a948ee0551188d41e5](#)

Data

[illegible]

Рисунок 2 – Вкладка Logs

Структура лога состоит из темы и сырых данных, при этом:

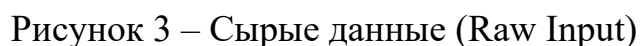
- Topics (Темы): Поле Topics[0] содержит хэш сигнатуры события: 0xfef18c84aba9622c89f9fb267039b264fcfb2ab599ed213a948ee0551188d41e5. В архитектуре EVM (Ethereum Virtual Machine) этот идентификатор позволяет внешним приложениям и исследователям однозначно определить, какая функция события была вызвана, даже если исходный код контракта скрыт.

- Data (Сырые данные): Поле Data содержит основную содержательную часть транскрипта, закодированную в шестнадцатеричном формате.

Использование событий (Events) и раздела Logs является наиболее эффективным способом хранения «доказательств» в блокчейне. Вместо дорогостоящего хранения всего текста транскрипта в состоянии (State) контракта, система генерирует лог. Это обеспечивает проверяемость и экономическую эффективность. То есть запись данных в логи значительно дешевле, чем в хранилище (storage) контракта, что критически важно для масштабируемых академических систем.

Анализ входных данных и параметров вызова (Raw Input). На скриншоте (рисунок 3) представлено поле Raw Input, содержащее шестнадцатеричный код (Hex), который был передан смарт-контракту в теле транзакции. Эти данные определяют, какую операцию выполняет контракт и какие параметры (данные транскрипта) в него записываются.

Использование стандарта EIP-1559 и передача данных в формате Raw Nех подтверждают, что система работает на уровне протокола EVM без посредников. Кодирование транскрипта непосредственно во входные данные транзакции гарантирует, что информация становится частью истории блока. Любое изменение в данных транскрипта приведет к изменению хэша транзакции, что делает подделку документа физически невозможной в рамках вычислительной мощности сети.



В ходе исследования по решению исследовательской группы, как отмечено выше используется технология блокчейн Ethereum. Данная технология реализована на языке Solidity.

Рисунок 4 – Фрагмент кода траскрипта



Solidity — это язык программирования для создания смарт-контрактов на блокчейнах, совместимых с виртуальной машиной Ethereum (EVM).

Представленный код на языке Solidity реализует децентрализованное хранилище транскриптов с интеграцией системы ролевого доступа (RBAC). Логика контракта разделена на три уровня: управление доступом, структурирование данных и неизменяемая фиксация событий.

Архитектурная логика смарт-контракта TranscriptStorage. Контракт не является автономным, а взаимодействует с внешним модулем управления ролями через интерфейс IRBAC. Непосредственно модификатор `onlyRole` используется для ограничения доступа к критическим функциям. Например, функция `saveTranscript` доступна только пользователям с ролью "issuer" (организация-эмитент), а обновление адреса RBAC — только "admin", что в свою очередь гарантирует безопасность и только авторизованные учебные заведения могут вносить записи в реестр.

Для оптимизации хранения и поиска используется комбинированный подход:

1) Объект Transcript группирует 10 ключевых полей, включая идентификаторы (`transcriptId`, `universityId`, `studentId`), академические успехи (`totalMark`, `ects`) и метаданные отправителя (`addedBy`).

2) Хэшированная индексация - функция `getKey`, которая генерирует уникальный ключ типа `bytes32` путем хэширования пары `universityId` и `studentId` с использованием алгоритма Кессак-256.

3) Хранилище `mapping` - все транскрипты студента сохраняются в динамический массив Transcript, доступ к которому осуществляется по сгенерированному ключу. Это позволяет эффективно масштабировать систему для хранения всей истории обучения.

Функция `saveTranscript` выполняет последовательность действий, гарантирующих целостность данных: Валидация, Инициализация, Запись в реестр, Эмиссия события (Вызов события TranscriptSaved, который генерирует те самые Logs, видимые в блокчейн-эксплорере).

Связь кода с данными блокчейна (Logs & Input). Когда вызывается `saveTranscript`, параметры (ID, оценки и т.д.) упаковываются в Hex-строку, которую мы видим в деталях транзакции. Событие TranscriptSaved дублирует все записанные данные в логи блокчейна. Это создает избыточность: данные хранятся и в состоянии контракта (для работы кода), и в логах (для дешевой и быстрой верификации внешними системами).

Заключение.

Реализованная логика обеспечивает целостность (через неизменяемость блокчейна), авторство (через привязку к `msg.sender`) и прозрачность (через публичные события). Хэширование идентификаторов позволяет структурировать данные без раскрытия связей между ними во внешних поисковых индексах, что повышает уровень приватности системы. В результате данного исследования спроектирован и разработан модуль



программы для интеллектуальной платформы децентрализованного цифрового реестра данных студентов и выпускников организаций высшего и послевузовского образования в существующей цифровой среде Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан на основе блокчейна Ethereum.

Финансирование. Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования РК (программно-целевое финансирование на 2024-2026 годы ИРН BR24993014 "Разработка интеллектуальной антикоррупционной системы защиты информации и валидации результатов учебных достижений и официальных документов студентов и выпускников вузов РК").

ЛИТЕРАТУРА

1. Kistaubayev, Y., Mutanov, G., Mansurova, M., Saxenbayeva, Z., & Shakan, Y. (2023). Ethereum-Based Information System for Digital Higher Education Registry and Verification of Student Achievement Documents. *Future Internet*, 15(1), 3. <https://doi.org/10.3390/fi15010003>
2. Vaneetvelde, K. (2018). *Ethereum Projects for Beginners: Build Blockchain-Based Cryptocurrencies, Smart Contracts, and DApps* (1st ed.). Packt Publishing, Limited. <https://doi.org/10.0000/9781789531640>
3. Makarenko, N. (2022). DOCUMENT AUTHENTICATION USING BLOCKCHAIN: DIPLOMA VALIDATION AS A TEST CASE. *Nazarbayev University School of Engineering and Digital Sciences*.
4. S., S. P. F., L., M. S., & Sree, T. R. (2025). Decentralized certificate issuance and verification system using Ethereum blockchain technology. *Journal of Network and Computer Applications*, 242, Article 104190. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2025.104190>
5. Mohan, P. M., Balachandran, V., Quan, O. Z., Xin, J. P. Z., & Divakaran, D. M. (2022). NFT-Merit: An NFT-based Module Credit Management System on Ethereum Blockchain. *Proceedings of IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (Online)*, 472–476. <https://doi.org/10.1109/TALE54877.2022.00083>
6. Сравнительный анализ действующих блокчейн платформ. Мутанов Г., Есенгалиева Ж., Кистаубаев Е., Усатова О., Бегимбаева Е. *Труды Университета*, 2025, Т.2, С.401-407.

REFERENCES

1. Kistaubayev, Y., Mutanov, G., Mansurova, M., Saxenbayeva, Z., & Shakan, Y. (2023). Ethereum-Based Information System for Digital Higher Education Registry and Verification of Student Achievement Documents. *Future Internet*, 15(1), 3. <https://doi.org/10.3390/fi15010003>



2. Vaneetvelde, K. (2018). *Ethereum Projects for Beginners: Build Blockchain-Based Cryptocurrencies, Smart Contracts, and DApps* (1st ed.). Packt Publishing, Limited. <https://doi.org/10.0000/9781789531640>
3. Makarenko, N. (2022). DOCUMENT AUTHENTICATION USING BLOCKCHAIN: DIPLOMA VALIDATION AS A TEST CASE. Nazarbayev University School of Engineering and Digital Sciences.
4. S., S. P. F., L., M. S., & Sree, T. R. (2025). Decentralized certificate issuance and verification system using Ethereum blockchain technology. *Journal of Network and Computer Applications*, 242, Article 104190. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2025.104190>
5. Mohan, P. M., Balachandran, V., Quan, O. Z., Xin, J. P. Z., & Divakaran, D. M. (2022). NFT-Merit: An NFT-based Module Credit Management System on Ethereum Blockchain. *Proceedings of IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (Online)*, 472–476. <https://doi.org/10.1109/TALE54877.2022.00083>
6. Sravnitel'nyj analiz dejstvujushhih blokchejn platform. Mutanov G., Esengalieva Zh., Kistaubaev E., Usatova O., Begimbaeva E. *Trudy Univeriteta*, 2025, T.2, S.401-407.

Жанна Есенгалиева, PhD, доцент, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Астана, Қазақстан, jannayess@gmail.com

Ольга Усатова, PhD, доцент, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Алматы, Қазақстан, olgaussatova@gmail.com

Аида Есенгалиева, сарапшы, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Алматы, Қазақстан, aidayess11@gmail.com

БЛОКЧЕЙН НЕГІЗІНДЕ ҚАУІПСІЗ САҚТАУ ЖӘНЕ ДЕРЕКТЕР АЛМАСУ ҮШІН ИНТЕГРАЦИЯЛЫҚ ПРОГРАММАЛЫҚ МОДУЛЬДІ ӘЗІРЛЕУ

Аңдатпа. Ақпаратты қорғаудың зияткерлік сыбайлас жемқорлыққа қарсы жүйесінде деректерді тіркеу және оқу жетістіктерін валидациялау, сондай-ақ Қазақстан Республикасының жоғары оқу орындары мен әскери оқу орындары студенттері мен түлектерінің ресми құжаттары мақсатында бағдарламалық модуль әзірленді. Мақалада Ethereum blockchain технологиясы blockscout шолғышына негізделген, ол транзакция туралы мәліметтерді сынақ желісіне түсіреді. Зерттеу тобы блокчейн негізінде білім беру құжаттарын сақтау жүйесін практикалық іске асыруды ұсынды. Жазба академиялық транскрипт беруге арналған ақылды келісімшарттың сәтті орындалғанын растайды. Сынақ желісін пайдалану шешімнің архитектурасын тексеруге, әзірлеу кезеңіндегі шығындарды азайтуға және әрбір транскрипт қоғамдық тізілімде бірегей, криптографиялық қорғалған әсер алуын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Сондай-ақ, мақалада



Ethereum блокчейнін білім беру саласында қолдануға қатысты библиографиялық шолу берілген.

Осылайша, solidity бағдарламалау тілінде blockscout шолғышының көмегімен жүзеге асырылатын блокчейн технологиясын қолдана отырып, студент немесе түлек порталында жұмыс істеу барысында шақырылатын сервис ұсынылды.

Түйінді сөздер: блокчейн, Ethereum, смарт-контракт, Blockscout, транзакциялар.

Zhanna Yessengaliyeva, PhD, associate professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, jannayess@gmail.com

Olga Ussatova, PhD, associate professor, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Almaty, Kazakhstan, olgaussatova@gmail.com

Aida Yessengaliyeva, expert, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Almaty, Kazakhstan, aidayess11@gmail.com

DEVELOPMENT OF AN INTEGRATION SOFTWARE MODULE FOR SECURE STORAGE AND DATA EXCHANGE BASED ON BLOCKCHAIN

Abstract. In order to record data in the intellectual anti-corruption information protection system and validate academic achievements, as well as official documents of students and graduates of universities and military educational institutions of the Republic of Kazakhstan, a software module has been developed. The article discusses the Ethereum blockchain technology based on the Blockscout browser, which records transaction details on the test network. The research group presented a practical implementation of a blockchain-based educational document storage system. The recording serves as confirmation of the successful execution of a smart contract designed to transfer an academic transcript. Using the testnet allows you to verify the architecture of the solution, minimize costs during the development phase, and ensure that each transcript receives a unique, cryptographically secure impression in the public registry. The article also provides a bibliographic overview of the use of the Ethereum blockchain in the field of education. Thus, a service is proposed that is invoked while working on the student or graduate's portal using blockchain technology, implemented using the Blockscout browser in the Solidity programming language.

Keywords: blockchain, Ethereum, smart contract, Blockscout, transactions.

Поступила: 04 июня 2026 года

Рецензирована: 08 июня 2026 года

Принята: 12 июня 2026 года



К.Т. Алғазы¹, Е.Ж. Әлімжан^{1,2}, Қ.С. Сақан^{1,2}

¹Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK,
Алматы, Қазақстан

²Farabi University, Алматы, Қазақстан

E-mail: ayerkebulan19@gmail.com

VERKLE-ҚҰРЫЛЫМДАРЫ ҮШІН ПОСТКВАНТТЫҚ ТОРЛЫ ВЕКТОРЛЫҚ МІНДЕТТЕМЕЛЕРДІ ҚҰРУ

Аңдатпа. Мақалада кванттық және кибернетикалық қауіптер жағдайында жұмыс істейтін әскери және арнайы мақсаттағы қорғалған таратылған ақпараттық жүйелер үшін деректердің аутентификациясының посткванттық құрылымдарын құру мәселесі қарастырылады. Негізгі назар дәлелдеме құрылымдарының ықшамдылығын, локальды жаңартуды қолдауды және кванттық шабуылдарға төзімділікті қамтамасыз ететін торлы векторлық міндеттемелерге негізделген Verkle ағашын әзірлеуге бағытталған. Міндеттемелер және дәлелдеме модификацияларын ағашты толық қайта есептемей орындауға мүмкіндік беретін жаңартуларды локальды тарату әдісіне ерекше назар аударылады. Ұсынылған тәсіл деректерді жаңарту кезінде есептеу шығындарының төмендеуін қамтамасыз етеді және шектеулі есептеу ресурстары мен тұрақсыз байланыс арналары жағдайында таратылған ақпаратты сақтау жүйелерінің жұмыс істеу тиімділігін арттырады.

Түйінді сөздер: посткванттық криптография, Verkle ағашы, торлы криптография, киберқауіпсіздік, әскери байланыс жүйелері.

Кіріспе.

Ақпараттық технологиялардың қарқынды даму заманында мемлекеттік әскери және арнайы күштік құрылымдар үшін ақпаратты қорғауды және оның қауіпсіздігін дамыту маңызды қадам болып табылады. Кванттық компьютерлердің пайда бола бастауына байланысты әскерлерді басқару үшін қолданатын заманауи ақпараттық жүйелер, қорғалған байланыс арналарын және таға да басқа маңызды инфоқұрылымдарды заманға сай дамыту өзекті болып отыр [1].

Осы уақытқа дейін қолданыста болып келген алгоритмдер негізінен үлкен сандарды факторизациялау және ақырлы кеңістікте дискретті логарифмдеу сияқты есептердің қиындығына сүйенеді. Бірақ ондай криптографиялық алгоритмдер Шор алгоритмдері сияқты кванттық алгоритмдерге осал болып табылады. Ал, бұл өз кезегінде ұлттық қауіпсіздік және қорғаныс саласында ақпараттық жүйелер арнасын пайдаланып



хабарлама алмасуға қауіп төндіреді. Сондықтан да, кванттық компьютерлер арқылы шабуылдарға да берік болып келетін посткванттық алгоритмдерді дамыту маңызды болып отыр [2-4].

Қазіргі криптографияның негізгі мақсаттарының бірі ретінде таратылған ақпараттық жүйелердегі үлкен көлемді деректердің тұтастығы мен құпиялылығын қамтамасыз етуді атауға болады [5, 6]. Мұндай мәселені шешуде, соңғы кездері Verkle ағашын қолдану көп зерттеліп жүр. Verkle ағашы деректердің тиесілігін дәлелдеуде ықшамды жол ұсынады және ол Merkle ағашының жетілдірілген нұсқасы болып табылады [7-9].

Аталған құрылымның негізгі ерекшелігі – векторлық міндеттемелерді пайдалана отырып ағаштың бүкіл құрылымын ашпай-ақ элементтің ағашқа тиесілігін дәлелдей алады. Жоғары да аталғандай, қолданыстағы міндеттемелердің көбі болашақта беріктілікті қамтамасыз етпей қалу мүмкіндігі жоғар. Сол себепті, Verkle ағашына енгізуге тиімді векторлық міндеттемелердің жаңа жолдарын қарастыру қажеттілігі артуда [10, 11].

Осыған байланысты криптографиялық беріктілік, дәлелдемелердің ықшамдығы және есептеу өнімділігі арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз ететін векторлық міндеттемелердің тиімді торлы схемаларын әзірлеу өзекті ғылыми міндет болып табылады.

Деректер құрылымында аутентификациялау саласында бірқатар зерттеулер жүргізілуде. [12] жұмыста қарастырылып отырған негізгі мақсаттары дәлелдеме көлемін кішірейту, элементтің құрылымға тиесілігін дәлелдеу және есептеу жылдамдығын арттыру. Ұзақ уақыт бойы блокчейн сияқты аутентификация құрылымдары Merkle ағаштарын қолданып келеді [6]. Уақыт өткен сайын ақпарат көлемі артып келеді, сондықтан дәлелдеме құрылымы да сызықты өсуге алып келеді. Бұл өз кезегінде, үлкен көлемдегі жүйелердің тиімділігін төмендетеді [7].

[11] мақалада көпмүшелік міндеттемелер мен бисызықты бейнелеулерді қолданатын KZG міндеттемелер (Kate–Zaverucha–Goldberg commitments) пайдаланылады. Бұл схемада да элементтің тиесілігі мен дәлелдеменің ықшам жолы ұсынылған. Бірақ бұл схема посткванттық беріктілікті қамтамасыз етпейді. Кванттық компьютерлер қолданысқа енген кезде Шор алгоритміне қарсы тұра алмайды.

Материалдар мен тәсілдер.

Зеттеу жұмысында посткванттық криптографияда қолданылатын торлық әдістер қолданылды. Негізгі назар торлық есептердің күрделілігіне аударылды. Торлық есептер қазіргі уақытта кванттық алгоритмдер арқылы шешілмейді деп есептеледі. Сол себепті торлық есептер ұзақ мерзімге криптографиялық қорғауды қажет ететін жүйелер үшін маңызды негіздердің бірі болып саналады.

Торлық әдістер мен торлық құрылымдарды қолданудың басты себебі – кванттық есептеу құралдары дамыған жағдайда да деректердің тұтастығы мен қауіпсіздігін қамтамасыз етуі. Әсіресе үлкен көлемдегі деректерді сақтау



жүйелерінде және аутентификация құрылымдарында классикалық криптографиялық әдістердің орнына посткваттық тұрақтылығы бар тәсілдерді қолдану қажеттілігі артып бара жатыр.

Verkle ағаштарында әрбір түйін бірнеше көрші элементтерден тұратын вектор арқылы сипатталады. Осы вектордың мәндері міндеттеме құру кезінде қолданылады. Торлық әдістер мен құрылымдардағы міндеттеме сақина немесе модуль үстіндегі алгебралық құрылым арқылы беріледі. Мысалы, есептеу келесі сақинада жүргізілуі мүмкін:

$$R_q = Z_q[x]/(f(x)),$$

мұндағы, q – сақина модулі, ал $f(x)$ – n дәрежелі көпмүшелік. Сақина көпмүшеліктермен жұмыс істеуге және оларды модуль арқылы ықшам түрде көрсетуге мүмкіндік береді.

Міндеттеме құру кезінде ашық матрица, құпия вектор және қателік векторы пайдаланады. Жалпы түрде бұл байланыс төмендегі өрнекпен сипатталады:

$$C = A \cdot s + e(\text{mod } q),$$

мұндағы, A – ашық параметр ретінде алынатын матрица, s – коэффициенттердің жасырын сақталатын құпия векторы, ал e – қателік векторы. Қателік векторы міндеттемені тікелей ашып қоюдан қорғайды және торлық есептің күрделілігіне сүйенетін қауіпсіздік қасиетін күшейтеді. Зерттеуде математикалық модельдеу және салыстырмалы криптографиялық талдау қолданылды. Өзірленген схеманың тиімділігін бағалау үшін ол бисызықтық бейнелеуге негізделген дәстүрлі векторлық міндеттемелер мен дискретті логарифмдік есептеу күрделілігінің болжамы салыстырылды. Салыстыру критерийлері болып дәлелдемелер өлшемі, міндеттеме және тексеру операцияларының есептеу күрделілігі, тсымалданатын деректердің көлемі және кванттық шабуылдарға төзімділік деңгейі қарастырылды.

Нәтижелер мен талқылаулар.

Жұмыстың негізгі ғылыми жаңалығы Verkle ағашында посткванттық міндеттемелерді локальды жаңарту әдісі болып табылады. Жұмыста бір тармақтың өзгеруі түбір жолының әр деңгейіндегі бір позицияның локальды өзгеру тізбегі ретінде қарастырылады. Кейбір түйінде i позиция өзгерсін. Бұл позицияның ескі хэштелген мәні a_i . Жаңа хэштелген мән a_i' . Олардың арасындағы айырмашылық q модулі арқылы беріледі.

$$\Delta_i = a_i' - a_i (\text{mod } q).$$

Түйіннің ескі міндеттемесі келесідей түрге ие:



$$C = Ar + a_1U_1 + \dots + a_iU_i + \dots + a_kU_k \pmod{q}.$$

i -ші позицияда өзгеріс енгеннен кейін жаңа міндеттемелер ескі a_iU_i үлестің орнына жаңа $a_i'U_i$ үлесі болу керек.

$$C' = Ar + a_1U_1 + \dots + a_i'U_i + \dots + a_kU_k \pmod{q}.$$

Жаңа және ескі міндеттеменің айырмашылығы тек бір позициядан ғана тәуелді:

$$\begin{aligned} C' - C &= a_i'U_i - a_iU_i \pmod{q}. \\ C' - C &= (a_i' - a_i)U_i \pmod{q}. \end{aligned}$$

Δ_i ауыстырғаннан кейін біз локальды жаңарту формуласын аламыз.

$$C' = C + \Delta_iU_i \pmod{q}.$$

Бұл формула ұсынылған әдістің өзегі болып табылады. Ол бір позицияны өзгерткеннен кейін позициялық үлестердің барлық суммасын қайта есептеудің қажеті жоқ екенін көрсетеді. Ескі міндеттемені алып, Δ_iU_i бір түзету үлесін қосу жеткілікті.

Бұл тәсіл толық қайта есептеуден ерекшеленеді. Толық қайта есептеу түйіннің барлық позицияларын қайтадан өңдейді. Локальды жаңарту тек өзгертілген позицияны өңдейді.

Жаңартуды түбірге тарату.

Verkle ағашында жапырақтың өзгеруі тек сол жапырақтан түбірге дейінгі жолға әсер етеді. Ол жол келесідей болсын:

$$v_0, v_1, \dots, v_d.$$

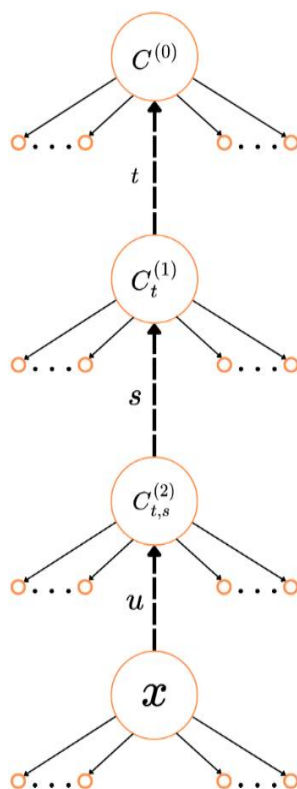
мұнда, v_0 түбір түйіні болып табылады. v_d түйіні өзгерген жапырақтарды қамтиды. Парақ мәнін өзгерткеннен кейін алдымен төменгі түйіннің тапсырмасы жаңартылады. Содан кейін осы түйіннің жаңа тапсырмасы аталық түйіндегі бір позицияның жаңа мәніне айналады.

Аталық түйін үшін жағдай өзгеріссіз қалады. Тек бір позиция өзгереді, сондықтан формула қайтадан қолданылады.

$$C_v' = C_v + \Delta_iU_i \pmod{q}.$$

Үдерісті түбірге дейін қайталайтын боламыз. Нәтижесінде жаңа түбірлік міндеттеме пайда болады. Ал, бұл жолдан тыс түйіндер өзгермейді. Сондықтан, олардың міндеттемелері қайта есептелмейді. Бұл принцип жаңартуды екі деңгейде локальды сипаттайды. Біріншіден, ол түйін аясында жасалады, яғни тек бір позиция ғана өзгереді. Екіншіден, ол ағаштың ішіндегі локальды өзгерісті білдіреді, мұнда тек бір жолдағы түйіндер ғана

өзгереді. Өзгертілген жапырақтан түбірге дейінгі жаңартудың локальды таралу схемасы сурет-1 де көрсетілген.



1 сурет – Verkle ағашындағы жаңартудың локальды таралу схемасы

Жолды дәлелдеуге әсері.

Локальды жаңарту әдісі жолды дәлелдеудің дұрыстығын сақтауы қажет. Ол үшін «куәгер» (witness) V_i -ді қарастыру маңызды. Егер ашлатын i -ші позиция өзгерсе, онда куәгерде $a_i R_i$ үлесі жоқ.

$$V_i = \sum_{j \neq i} a_j R_j + r \pmod{q}.$$

Сондықтан, бұл позиция үшін r куәгер өзгеріссіз қалуы мүмкін. Тексеру жаңа міндеттемемен және жаңа a_i' мәнімен орындалады $C' = AV_i + a_i' U_i \pmod{q}$. Егер басқа t позициясы өзгерсе және i позициясы ашылса, онда i позициясы үшін куәгер локальды түрде жаңартуға болады $V_i' = V_i + \Delta_t R_t \pmod{q}$. Бұл жаңарту сонымен қатар куәгерді толық қайта есептеуді қажет етпейді. Ол тек өзгертілген позиция айырмашылығын және қысқа R_t түпбейнені пайдаланады.

Сондықтан ұсынылған әдіс тек міндеттемені жаңартуын ғана қолдамайды. Ол сонымен қатар локальды ашылулардың тексерілуін сақтайды. Бұл path proof үшін маңызды. Verkle ағашындағы жол локальды ашылулар тізбегінен тұрады.



Локальды жаңартудың математикалық мысалы.

Демонстрациялық мысалды қарастырайық. Шағын параметрлер тек арифметиканы тексеру үшін қолданылады. Олар криптографиялық төзімділікке арналмаған.

Барлық есептеулер $q = 17$ модулі бойынша жүргізілсін және түйінде $k = 3$ позициясы бар.

Ашық $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 1 \end{pmatrix}$ матрицасын және $r = \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \end{pmatrix}$ жасырушы векторларын берілсін. Онда, $Ar = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10 \\ 10 \end{pmatrix} \pmod{17}$.

Позициялардың ашық векторлары келесідей болады:

$$U_1 = \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad U_2 = \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \end{pmatrix}, \quad U_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 5 \end{pmatrix}.$$

Ескі хэштелген мәндері $a_1 = 3$, $a_2 = 7$, $a_3 = 4$ болсын. Онда ескі міндеттемелер $C = Ar + a_1U_1 + a_2U_2 + a_3U_3 \pmod{17}$ тең болады.

Сандарды орнына қойып, үлестерді есептейік.

$$C = \begin{pmatrix} 10 \\ 10 \end{pmatrix} + 3 \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} + 7 \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \end{pmatrix} + 4 \begin{pmatrix} 1 \\ 5 \end{pmatrix} \pmod{17},$$

$$3U_1 = \begin{pmatrix} 6 \\ 3 \end{pmatrix}, 7U_2 = \begin{pmatrix} 28 \\ 21 \end{pmatrix}, 4U_3 = \begin{pmatrix} 4 \\ 20 \end{pmatrix}.$$

Сонда суммасы, $C = \begin{pmatrix} 10 \\ 10 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 6 \\ 3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 28 \\ 21 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 4 \\ 20 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 48 \\ 54 \end{pmatrix} \pmod{17}$.

Модульге келтіргеннен кейін $C = \begin{pmatrix} 14 \\ 3 \end{pmatrix}$ аламыз. Енді екінші позицияны өзгертетін боламыз. Ескі мәні $a_2 = 7$ -ге тең, ал жаңа мәні $a_2' = 12$ -ге тең. Айырымдары, $\Delta_2 = a_2' - a_2 = 12 - 7 = 5 \pmod{17}$.

Ұсынылған әдіс бойынша жаңа міндеттеме локальды түрде есептеледі, $C' = C + \Delta_2 U_2 \pmod{17}$.

Сандарды орнына қоятын болсақ, $C' = \begin{pmatrix} 14 \\ 3 \end{pmatrix} + 5 \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \end{pmatrix} \pmod{17}$.

Түзету үлесін есептейік $5U_2 = \begin{pmatrix} 20 \\ 15 \end{pmatrix}$.

Онда, $C' = \begin{pmatrix} 14 \\ 3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 20 \\ 15 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 34 \\ 18 \end{pmatrix} \pmod{17}$ аламыз.

Модульге келтіргеннен кейін, $C' = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$.

Жаңа міндеттеме түйінді толық қайта санамай-ақ алынды. Тек ескі міндеттеме және бір түзету үлесі қолданылды.

Мысалдан көрініп тұрғандай, ұсынылған әдістің айырмашылығы есептеу көлемінде болып тұр. Локальды жаңартусыз жағдайында, түйіндердің барлық міндеттемелері $a_1U_1, a_2'U_2, a_3U_3, \dots, a_kU_k$ қайта есептелетін болса, ұсынылған әдісте тек $\Delta_i U_i$ есептеледі.

Үш позициялы кішкентай мысал үшін айырмашылық аз көрінеді. Тармақталу коэффициенті жоғары Verkle түйіні үшін бұл айырмашылық айтарлықтай болады. Егер түйінде $k = 256$ позиция болса, онда толық қайта есептеу барлық 256 үлесті қайта өңдеуді қажет етеді. Локальды жаңарту тек бір позицияны өңдеуді қажет етеді.



Ұсынылған тәсілдің ғылыми жаңалығы.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы векторлық міндеттемелерге торлар теориясын қолдана отырып Verkle ағашы үшін жаңартуды локальды тарату әдісін кіргізу болып табылады. Басқа әдістерден тағы ерекшелігі, жұмыс динамикалық режимді қарастырады. Мұндай жағдайда бір жапырақтың мәнін өзгерту түбір жолындағы локальды жаңартулар тізбегіне айналады.

Әрбір жол түйінінде жаңа міндеттеме ескі міндеттемені пайдалана отырып келесі формула бойынша есептеледі:

$$C_v' = C_v + \Delta_i U_i \pmod{q}.$$

Ұсынылған әдіс түйіннің барлық позицияларын толық қайта санауды болдырмайды. Ол жаңа түбірлік міндеттеме мен ағаштың жаңартылған күйі арасындағы байланысты сақтайды. Ол сонымен қатар, локальды дәлелдемені ашу бөлігінің дұрыстығын көрсетеді.

Зерттеу қорытындылары Verkle ағашының посткванттық құрылымын ықшамда дәлелдемелер мен локальды жаңартуды пайдалана отырып жасау мүмкіндігін көрсетеді. Құрылымның негізгі артықшылықтарының бірі – дискретті логарфм қиындығы мен бисызықты бейнелеулерді қолданатын криптографиялық примитивтерден бас тарту. Оның орнына заманауи, болашақта да беріктілікті қамтамасыз ететін әдістерді қолдану.

Ұсынылған схеманы деректерді аутентификациялаудың ең көп таралған құрылымдарымен салыстыру кесте 1-де келтірілген.

1 кесте – Аутентификациялау құрылымдарын салыстыру

Қасиеттер	Меркл ағашы	KZG негізіндегі Verkle ағашы	Қолданыстағы торлық векторлық міндеттеме	Ұсынылған схема
Посткванттық беріктілік	Иә	Жоқ	Иә	Иә
Дәлелдеме ықшамдылығы	Төмен	Жоғары	Орташа	Жоғары
Сенімді инициализация қажеттілігі	Жоқ	Иә	Жоқ	Жоқ
Локальды жаңарту мүмкіндігі	Ішінара	Ішінара	Шектеулі	Толық
Verkle-құрылымымен үйлесімділігі	Жоқ	Иә	Шектеулі	Иә
Бисызықты бейнелеуді қолдану	Жоқ	Иә	Жоқ	Жоқ



Кестеден көрініп тұрғандай, Merkle ағашы да хэш функцияларды қолдану арқылы посткванттық беріктілікті қамтамасыз еткенменде ақпарат көлемі немесе ағаштың биіктігі артқанда тиімсіз болып қалуы мүмкін. Сонымен бірге, локальды жаңарту мүмкіндігі де салыстырмалы түрде төмендеу. Кесте 2-де криптографиялық қасиеттері салыстырмалы түрде берілген.

2 кесте – Криптографиялық сипаттамаларды салыстыру

Сипаттамалар	KZG-негіздегі Verkle	Торлық векторлық схемалар	Ұсынылған схема
Қауіпсіздік негізі	Дискретті логарифм	Ring-LWE / LWE	Ring-LWE
Шора алгоритміне тұрақтылығы	Жоқ	Иә	Иә
Ықшамдылық	Жоғары	Орташа	Жоғары
Локальды жаңарту	Шектеулі	Ішінара	Толық
Посткванттылық	Жоқ	Иә	Иә

Кесте 2-де келтірілген мәліметтерге қарайтын болсақ. Ұсынылған схеманың бірқатар артықшылықтарын көруге болады. Атап айтқанда, ықшамдылығы жоғары, локальды жаңартулары толық және посткванттық қасиеттерге ие.

Болашақ жұмыстар немесе алдағы зерттеудің перспективалы бағыттарын атай кетейік:

- дәлелдеме өлшемдерін және ашық параметрлерді оңтайландыру;
- торға негізделген Verkle ағашын аппараттық іске асыру;
- нөлдік жарияланымдарды әзірлеу.

Қорытынды.

Жұмыста әскери және арнайы мақсаттағы таратылған қорғалған ақпараттық жүйелерде қолдануға бағытталған торлы векторлық міндеттемелерге негізделген Verkle ағашының посткванттық құрылымы ұсынылған. KZG міндеттемелеріне және дискретті логарифмнің күрделілігін болжауға негізделген қолданыстағы Verkle конструкцияларынан айырмашылығы, ұсынылған тәсіл белгілі кванттық шабуылдарға төзімділікті қамтамасыз ететін Ring-LWE криптографиялық примитивтерін пайдаланады.

Зерттеудің практикалық маңыздылығы – әзірленген схеманы келесі құрылымдарда қолдану мүмкіндігіне байланыты:

- қорғалған әскери байланыс желілері;
- таратылған әскерлерді басқару жүйелері;
- маңызды объектілерді киберқорғау инфрақұрылымдары;



- қорғалған ведомствоаралық өзара іс-қимыл жүйелеріне;
- барлау ақпаратын сақтаудың таратылған жүйелерінің таралуы.

Ұсынылған тәсілді кванттық есептеу қатерлеріне және қазіргі заманғы криптоанализ құралдарына төзімділікті талап ететін перспективалы киберқорғаныс және қорғалған деректер алмасу жүйелерінде қолдануға болады.

Алғыс. Зерттеу жұмыстары ҚР ҒЖБМ Ақпараттық және есептеу технологиялары институтында АР23488112 «Verkle ағашы негізінде кванттық төзімді цифрлық қолтаңба схемасын құру және зерттеу» жобасы аясында орындалды.

ӘДЕБИЕТТЕР

1. Algazy K., Sakan K., Nyssanbayeva S., Lizunov O. Syrga2: Post-Quantum Hash-Based Signature Scheme // *Computation*. 2024. Vol. 12. P. 1–17. DOI: 10.3390/computation12060125.
2. Lyubashevsky V., Nguyen N. K. *Advances in Cryptology – ASIACRYPT 2022: 28th International Conference on the Theory and Application of Cryptology and Information Security, Taipei, Taiwan, December 5–9, 2022, Proceedings, Part IV* // *Advances in Cryptology – ASIACRYPT 2022*. 2022. P. 95–125. DOI: 10.1007/978-3-031-22972-5_4.
3. Wee H., Wu D. J. *Lattice-Based Functional Commitments: Fast Verification and Cryptanalysis* // *Advances in Cryptology – ASIACRYPT 2023*. Singapore: Springer Nature, 2023. P. 1–41.
4. Cini V., Malavolta G., Nguyen N. K., Wee H. *Polynomial Commitments from Lattices: Post-Quantum Security, Fast Verification and Transparent Setup* // *Advances in Cryptology – CRYPTO 2024*. Cham: Springer, 2024. LNCS. Vol. 14929. DOI: 10.1007/978-3-031-68403-6_7.
5. Fenzi G., Moghaddas H., Nguyen N. K. *Lattice-Based Polynomial Commitments: Towards Asymptotic and Concrete Efficiency* // *Journal of Cryptology*. 2024. Vol. 37. No. 31. P. 1–92. DOI: 10.1007/s00145-024-09511-8.
6. Kuznetsov O., Frontoni E., Kuznetsova K., Arnesano M. *Optimizing Merkle Proof Size Through Path Length Analysis: A Probabilistic Framework for Efficient Blockchain State Verification* // *Future Internet*. 2025. Vol. 17. No. 2. P. 1–20. DOI: 10.3390/fi17020072.
7. Kuznetsov O., Kanonik D., Rusnak A., Yezhov A., Domin O. *Adaptive Restructuring of Merkle and Verkle Trees for Enhanced Blockchain Scalability* // *Internet of Things*. 2024. Vol. 27. P. 1–34. DOI: 10.1016/j.iot.2024.101315.
8. Kuszmaul J. *Verkle Trees*. MIT PRIMES Research Papers. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 2019. 12 p. Available online: <https://math.mit.edu/research/highschool/primes/materials/2018/Kuszmaul.pdf> (accessed on 10 April 2026).



9. Kuszmaul J. Verkle Trees: Ver (y Short Mer)kle Trees. Presentation at PRIMES Conference, Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 19 May 2019. 40 slides. Available online:

<https://math.mit.edu/research/highschool/primes/materials/2019/conf/12-5-Kuszmaul.pdf> (accessed on 10 April 2026).

10. Catalano D., Fiore D. Vector Commitments and Their Applications // Public-Key Cryptography — PKC 2013. Berlin; Heidelberg: Springer, 2013. LNCS. Vol. 7778. P. 55–72. DOI: 10.1007/978-3-642-36362-7_5.

11. Kate A., Zaverucha G. M., Goldberg I. Constant-Size Commitments to Polynomials and Their Applications // Advances in Cryptology – ASIACRYPT 2010. Berlin; Heidelberg: Springer, 2010. LNCS. Vol. 6477. P. 177–194. DOI: 10.1007/978-3-642-17373-8_11.

12. Pathak V., Ruj S., van der Meyden R. Vector Commitment Design, Analysis, and Applications: A Survey // Cryptology ePrint Archive. Paper 2025/667. 2025. Available online.

Kunbolat Algazy, PhD, associate professor, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Almaty, Kazakhstan, kunbolat@mail.ru

Yerkebulan Alimzhan, doctoral student, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Farabi University, Almaty, Kazakhstan, ayerkebulan19@gmail.com

Kairat Sakan, PhD, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Farabi University, Almaty, Kazakhstan, kunbolat@mail.ru

CONSTRUCTION OF LATTICE-BASED VECTOR COMMITMENTS FOR VERKLE STRUCTURES

Abstract. This paper addresses the problem of constructing post-quantum authenticated data structures for secure distributed information systems operating under potential quantum and cyber threats. The primary focus is on the development of a Verkle tree based on lattice vector commitments, providing compact proof structures, support for local updates, and resistance to quantum attacks. Particular attention is given to the local update propagation mechanism, which enables modification of commitments and proofs without full recomputation of the tree. The proposed approach reduces computational overhead during data updates and improves the efficiency of distributed storage systems operating under limited computational resources and unstable communication channels. The proposed scheme can be applied in secure distributed storage systems, cyber defense infrastructures, and protected communication environments requiring post-quantum security guarantees.



Keywords: post-quantum cryptography, Verkle tree, lattice cryptography, Ring-LWE, cybersecurity, secure communication systems.

Күнболат Алғазы, PhD, ассоциированный профессор, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Алматы, Казахстан, kunbolat@mail.ru

Еркебұлан Әлімжан, докторант, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Farabi University, Алматы, Казахстан, ayerkebulan19@gmail.com

Қайрат Сақан, PhD, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Farabi University, Алматы, Казахстан, kunbolat@mail.ru

ПОСТРОЕНИЕ РЕШЕТОЧНЫЕ ВЕКТОРНЫЕ КОММИТМЕНТЫ ДЛЯ VERKLE-СТРУКТУР

Аннотация. В статье рассматривается проблема построения постквантовых структур аутентификации данных для защищенных распределенных информационных систем военного и специального назначения, функционирующих в условиях потенциальных квантовых и кибернетических угроз. Основное внимание уделяется разработке Verkle-дерева на основе решеточных векторных коммитментов, обеспечивающего компактность доказательства-структур, поддержку локального обновления и устойчивость к квантовым атакам. Особое внимание уделено методу локального распространения обновлений, позволяющему выполнять модификацию обязательств и доказательства без полного пересчета дерева. Предложенный подход обеспечивает снижение вычислительных затрат при обновлении данных и повышает эффективность функционирования распределенных систем хранения информации в условиях ограниченных вычислительных ресурсов и нестабильных каналов связи.

Ключевые слова: постквантовая криптография, дерево Verkle, решеточатая криптография, кибербезопасность, военные системы связи.

Қабылданған күні: 02 маусым 2026 ж.

Рецензиядан өткен күні: 09 маусым 2026 ж.

Мақұлданған күні: 15 маусым 2026 ж.



MPHTI 89.01.94



<https://doi.org/10.56132/2791-3368-2026-2-66-86-112>

А.У. Калижанова^{1,2}, М. Кунелбаев^{1,3}, С. Дәруіш^{1,3}

¹Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK,
Алматы, Казахстан

²Energo University, Алматы, Казахстан

³Farabi University, Алматы, Казахстан

E-mail: kalizhanova_aliya@mai.ru

РАЗРАБОТКА GIS-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗОН ПАДЕНИЯ ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ СТУПЕНЕЙ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

Аннотация. В статье рассматривается GIS-ориентированная методика прогнозирования зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя на основе интеграции детерминированного моделирования траектории, стохастического анализа неопределённости и пространственной оценки риска. Предлагаемый подход объединяет лётно-технические параметры ступени, метеорологические данные и геопро пространственную информацию в рамках единой вычислительной схемы, обеспечивающей расчёт номинальной траектории, формирование вероятностной области падения и построение цифровых карт риска. Для верификации подхода были рассмотрены три сценария, различающиеся массой ступени, скоростью ветра и углом отделения. Выполнено сравнение классической баллистической модели, стохастической модели Монте-Карло и модели с элементами искусственного интеллекта и машинного обучения. Показано, что применение современных методов позволяет снизить среднюю ошибку прогноза до 60 м, уменьшить стандартное отклонение до 25 м и сократить долю выхода за пределы безопасной зоны до 1%. Пространственный анализ риска показал, что наиболее уязвимыми являются территории с высокой плотностью населения и наличием критической инфраструктуры. Полученные результаты подтверждают, что интеграция траекторного моделирования, анализа неопределённости и GIS-инструментов повышает точность прогноза и практическую значимость системы для поддержки принятия решений при обеспечении безопасности космических запусков.

Ключевые слова: ракета-носитель, отделяющаяся ступень, прогнозирование зон падения, GIS, стохастическое моделирование, пространственная оценка риска, метод Монте-Карло, AI/ML.



Введение.

Повышение темпов развития аэрокосмической отрасли и рост количества пусков ракет-носителей обуславливают растущую потребность в точных, гибких и масштабируемых системах оценки рисков, связанных с падением отделяющихся частей ракет. Особенно важной становится задача оперативного определения зон возможного поражения на поверхности Земли и интеграции этих данных в системы поддержки решений, работающие в режиме реального времени. Вместо традиционных методов расчёта траекторий, основанных на классической баллистике, всё чаще применяются гибридные технологии, включающие элементы машинного обучения, адаптивного моделирования и геоинформационного анализа.

В работе [1] представлен обзор современных систем разделения и сброса в аэрокосмических аппаратах с детальным сравнительным анализом эффективности различных конструктивных решений. Особое внимание уделено математическим моделям поведения отделяющихся частей после расцепления, а также адаптивным подходам к обеспечению безопасности, включая применение ГИС для оценки зон потенциальной опасности. Подчёркивается важная роль перспективных материалов, электромеханических систем и алгоритмов управления при снижении рисков аварийных ситуаций. Статья [2] посвящена всестороннему математическому исследованию траектории ступеней ракет после отделения с учётом аэродинамических факторов и воздействия метеоусловий. В работе применяется система дифференциальных уравнений, учитывающая изменение массы, сопротивление воздушной среды и боковой ветер, что обеспечивает достоверное моделирование движения объектов. Ключевым элементом исследования является калибровка моделей по данным прошлых пусков, а также оценка вероятности попадания обломков за пределы зоны безопасности. Рассматриваются подходы к формированию карт зон падения с интеграцией в отечественные геоинформационные системы. Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными, что подтверждает высокую точность и практическую применимость разработанной методики при оперативном планировании. Предусмотрена комплексная система оповещения с автоматической генерацией карт и рекомендаций для служб безопасности. В публикации [3] представлен полуколичественный алгоритм оценки рисков повреждения наземных сооружений обломками ракет. Для улучшения достоверности расчётов применяется интеграция баллистических симуляций с геоинформационными системами, что обеспечивает динамическое обновление зон риска с учётом текущих метеоданных и навигационной информации. Описан подход к пространственно-временному моделированию: прогнозируется не только координаты возможного падения, но и вероятность появления опасного объекта, а также временные рамки его появления. Приведены примеры практического применения на китайских космодромах, а также результаты сравнения с традиционными моделями. Отмечается важность использования адаптивных методик, позволяющих



оперативно вносить коррективы в расчёты при изменении траектории полёта или метеоусловий. В исследовании [4] предложен комплексный подход к оценке угрозы для населения и объектов инфраструктуры со стороны обломков ракет, основанный на объединении баллистического моделирования и пространственного анализа в системах GIS. С использованием передовых геоинформационных технологий строятся карты вероятных зон падения, а также разрабатываются сценарные модели снижения ущерба. В работе реализован алгоритм динамического пересчета границ зон риска с учётом актуализированных траекторий и метеосведений. Эффективность метода проиллюстрирована на примерах фактических пусков, продемонстрировавших возможность автоматической генерации оповещений для граждан и органов управления. В работе [5] рассматривается моделирование динамики разделения ступеней с учётом многосвязных взаимодействий, переходных явлений и аэродинамических факторов. Показано, что использование адаптивных алгоритмов и методов Монте-Карло позволяет учитывать неопределённости начальных условий и формировать вероятностные зоны возможного падения объектов. Полученные результаты интегрируются в ГИС, что обеспечивает возможность пространственного анализа рисков и применение модели в системах поддержки решений. В статье [6] исследуется влияние случайных боковых нагрузок в сопле на динамику ракеты при полёте на малых высотах. Для описания случайного смещения линии отрыва пограничного слоя и связанных с ним угловых и поступательных откликов ракеты используется процесс Орнштейна–Уленбека. Показано, что предложенная аналитическая модель хорошо согласуется с результатами высокоточных численных расчётов и позволяет определить практические способы снижения угловых отклонений и повышения демпфирования после прекращения боковых нагрузок. В работе [7] предложен стохастический подход к анализу траекторий ракетных элементов под воздействием случайных боковых нагрузок с использованием процесса Орнштейна–Уленбека. Показано, что учёт случайных аэродинамических возмущений позволяет точнее описывать распределение возможных точек падения и оценивать риск отклонений траектории. Авторы подчеркивают важность включения таких эффектов в системы раннего предупреждения и контроля безопасности полёта. В исследовании [8] предложен интегрированный подход к оценке рисков для населения и объектов инфраструктуры, основанный на сочетании баллистических моделей и ГИС-технологий. С помощью пространственного анализа строятся карты потенциальных зон падения фрагментов и разрабатываются сценарии снижения ущерба. Представлен алгоритм динамической корректировки границ зон опасности с учётом поступающей информации о траектории движения и метеоусловий. Рассматривается реализуемость автоматической генерации оповещений для жителей и уполномоченных органов. В работе [9] детально анализируется взаимодействие с базами данных землепользования, позволяющее учитывать



степень застройки и расположение объектов повышенной значимости. Приводятся критерии оценки эффективности моделей, а также методы их проверки на основе практических реализаций. В работе [10] представлена математическая модель динамики многократного разделения ступеней, учитывающая аэродинамические параметры, внутренние взаимодействия и внешние факторы. Показано, что настройка модели под реальные метеоро- и полётные данные позволяет повысить достоверность определения координат падения. Полученные результаты визуализируются в геоинформационной системе и могут применяться в системах поддержки решений при эксплуатации пусковых комплексов. В статье [11] представлена разработанная и протестированная модель прогнозирования зон падения ускорителей с учётом фактического профиля ветра и аэродинамических факторов на различных высотах. Для точного определения траектории в реальном времени применяются адаптивные фильтры, основанные на данных радаров и спутников. Интеграция полученных результатов в ГИС обеспечивает возможность использования модели для оповещения, организации наземных мероприятий и повышения достоверности прогноза. В работе [12] анализируется интеграция расчётов баллистических траекторий с геоинформационными системами с целью формирования зон падения ступеней ракет и их обломков. Показано, что сочетание геопространственного анализа с метеоданными и демографической информацией даёт возможность создавать интерактивные карты угроз и генерировать автоматические отчёты для служб обеспечения безопасности. В работе [13] анализируются подходы к адаптивному управлению и оптимизации траектории многоступенчатых ракет, направленные на уменьшение вероятности падения и повышение точности доставки полезного груза. Применяются гибридные методы, объединяющие традиционное моделирование, технологии машинного обучения и интеграцию с ГИС. В статье [14] рассматривается создание автоматизированных GIS-систем для прогнозирования зон падения ступеней ракет на космодромах России. Авторы интегрируют баллистические расчёты, пространственный анализ и визуализацию, учитывая рельеф местности, использование земель и метеоданные. Показано, что подобная интеграция обеспечивает оперативное обновление карт и отчётов в режиме реального времени, а также повышает эффективность взаимодействия между различными ведомствами. В исследовании [15] представлен метод оценки угрозы для населения и объектов инфраструктуры при падении обломков ракет с использованием статистического анализа, моделирования Монте-Карло и ГИС. Показано, что включение результатов моделирования в цифровые карты позволяет оперативно выявлять зоны с наибольшей вероятностью поражения и применять полученные данные для организации эвакуационных действий. В статье [16] представлен обзор концепции цифрового двойника и его применения в киберфизических производственных системах. Показано, что цифровые двойники используются для моделирования, мониторинга в



реальном времени, оптимизации и поддержки принятия решений на всех этапах жизненного цикла. В книге [17] представлено практическое руководство по работе с QGIS (Quantum geographic information systems) как открытой геоинформационной платформой. Рассматриваются основные функции системы, включая импорт данных, визуализацию, пространственный анализ и создание интерактивных карт. Данный источник полезен как методическая база для применения GIS-инструментов в задачах картирования и пространственной оценки риска. В работе [18] оценивается угроза для населения стран глобального Юга, обусловленная неуправляемым проникновением верхних ступеней ракет и их обломков в атмосферу. Предлагается введение нормативно-правового регулирования, направленного на предотвращение сбоев при контролируемом возвращении объектов. В работе [19] приведён обзор моделей 1D/3D (MOCAT, SOLEM и др.) с детальным рассмотрением алгоритмов распространения обломков и становления корейской инженерной космической школы. В исследовании [20] представлена физико-экономическая модель загрязнения низкой околоземной орбиты, свидетельствующая о вероятности наступления синдрома Кesslera в период с 2035 по 2048 год при отсутствии мер по снижению рисков. В работе [21] предложена математическая модель траекторий сферических космических обломков разных размеров с учётом сопротивления атмосферы, при этом значительная часть параметров падения рассчитывается аналитически. В исследовании [22] представлена математическая модель двухуровневой задачи коммивояжёра, предназначенная для составления плана миссий по ликвидации космических обломков, при этом для расчёта приращения скорости Δv и оптимизации траектории применяются нейросети глубокого обучения и методы обучения с подкреплением. В исследовании [23] изучаются моделирование и анализ хода разделения ступеней двухступенчатых многоразовых ракет-носителей. Особое внимание уделяется динамике относительного движения элементов после отделения, оценке устойчивости хода процесса, а также влиянию аэродинамических параметров на безопасность полёта. В статье [24] рассматривается моделирование многоступенчатой динамики разделения с применением метода уравнений связей. Её значение заключается в повышении точности учёта взаимодействия отделяющихся элементов в переходной период. В исследовании [25] изучены аэродинамические свойства процесса отделения первой ступени ракеты Ares I, создана соответствующая справочная база данных для расчётов. Проведённый анализ демонстрирует влияние аэродинамических показателей на траекторию движущихся частей ракеты после отделения. В работе [26] продолжено использование метода уравнений сил связи при решении задач разделения ступеней ракеты-носителя. Показана возможность более точного численного моделирования взаимного движения ступеней и оценки надёжности их разделения. В работе [27] анализируется применение метода Монте-Карло при проектировании ракеты-носителя и проверке соответствия



установленным требованиям. Основной вклад исследования заключается в показе того, как вероятностное моделирование помогает учитывать неопределённости параметров и оценивать диапазон возможных исходов. Исследование [28] посвящено анализу рисков и неопределённостей, обусловленных непреднамеренным проникновением искусственных космических объектов в атмосферу Земли. В работе рассматривается вероятностная природа их падения, а также факторы, оказывающие влияние на достоверность расчётов уровня угрозы. В статье [29] приведён статистический анализ неконтролируемых входов космических аппаратов и ракетных ступеней в атмосферу за последнее десятилетие. Исследование даёт возможность выявить общие тенденции, частоту подобных инцидентов, а также особенности распределения связанных с ними рисков. Статья [30] посвящена угрозам, связанным с возвращением спутниковых систем в атмосферу, особенно на фоне увеличения объёмов крупных орбитальных группировок. В исследовании [31] поднимается вопрос оценки и минимизации угроз, связанных с неконтролируемыми повторными входами искусственных космических тел, с учётом текущих и перспективных тенденций развития космической отрасли. В статье [32] анализируется влияние возвращения космических объектов на безопасность воздушного пространства, включая необходимость временного закрытия определённых зон. Указывается, что опасность падения космических обломков касается не только наземных объектов инфраструктуры, но и авиационного движения.

Целью данного исследования является разработка архитектуры и базовых модулей многофункционального GIS-ресурса для прогнозирования зон падения отделяющихся частей ракет. Предлагаемая модель основана на сочетании баллистических, стохастических и адаптивных подходов с картографическим моделированием, автоматической генерацией тематических карт и возможностью последующей интеграции с внешними системами, включая платформы мониторинга, цифровые двойники территорий, метеорологические сервисы, а также информационно-аналитические системы служб гражданской защиты.

Материалы и методы.

Предлагаемая методика объединяет физически обоснованное моделирование траектории, стохастический анализ неопределённости и пространственную оценку риска на основе GIS в рамках единой вычислительной схемы прогнозирования зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя. В отличие от исключительно картографического подхода, данная схема начинается с физических параметров отделения ступени и атмосферных условий, далее выполняется расчёт траектории с учётом аэродинамических возмущений, после чего результаты моделирования передаются в геоинформационную среду для пространственного анализа, зонирования риска и поддержки принятия решений.

Входные данные, использованные в исследовании, были разделены на три группы: лётно-технические и конструктивные параметры ступени, метеорологические параметры и геопространственные данные. В первую группу входили масса отделяющейся ступени, начальная скорость, угол отделения, характерная площадь поперечного сечения и коэффициент аэродинамического сопротивления. Во вторую группу входили скорость и направление ветра, плотность воздуха и атмосферные условия, влияющие на траекторию снижения. В третью группу входили цифровые картографические слои, описывающие населённые пункты, транспортные коридоры, гидрографические объекты, административные границы, плотность населения и критическую инфраструктуру.

Перед моделированием все пространственные слои были приведены к единой системе координат и загружены в GIS-среду в виде векторных и растровых наборов данных. Этап предварительной обработки включал валидацию данных, удаление неполных записей, нормализацию тематических атрибутов и пространственную привязку разнородных источников. Данный этап обеспечивал согласованность последующего численного моделирования и снижал влияние ошибок входных данных на прогнозируемые зоны падения.

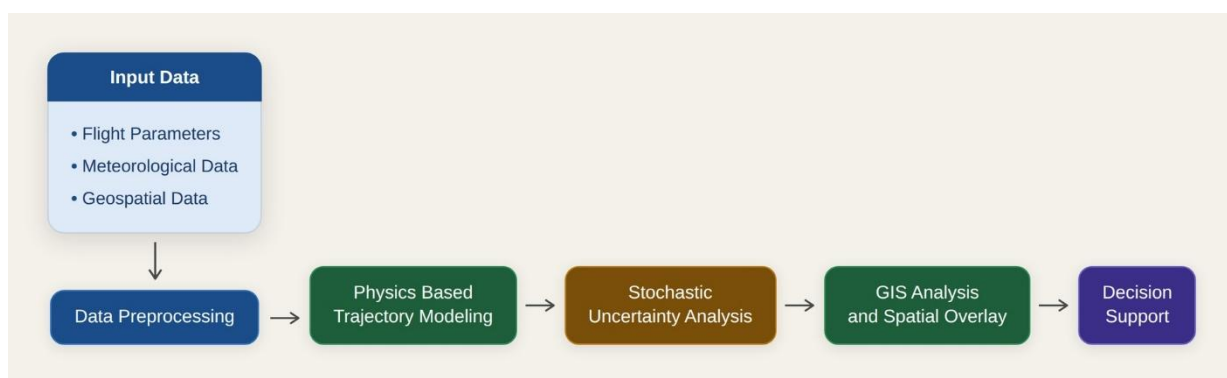


Рисунок 1 - Общая схема предлагаемой методики прогнозирования зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя

На рисунке 1 представлена общая схема предлагаемой методики прогнозирования зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя. Схема объединяет три группы исходных данных — лётно-технические параметры, метеорологические данные и геопространственную информацию — с последующей предварительной обработкой, физико-математическим моделированием траектории, стохастическим анализом неопределённости, GIS-анализом и поддержкой принятия решений. Такая структура отражает последовательное преобразование разнородных исходных данных в пространственные оценки риска, которые могут использоваться для анализа безопасности и оперативного планирования.

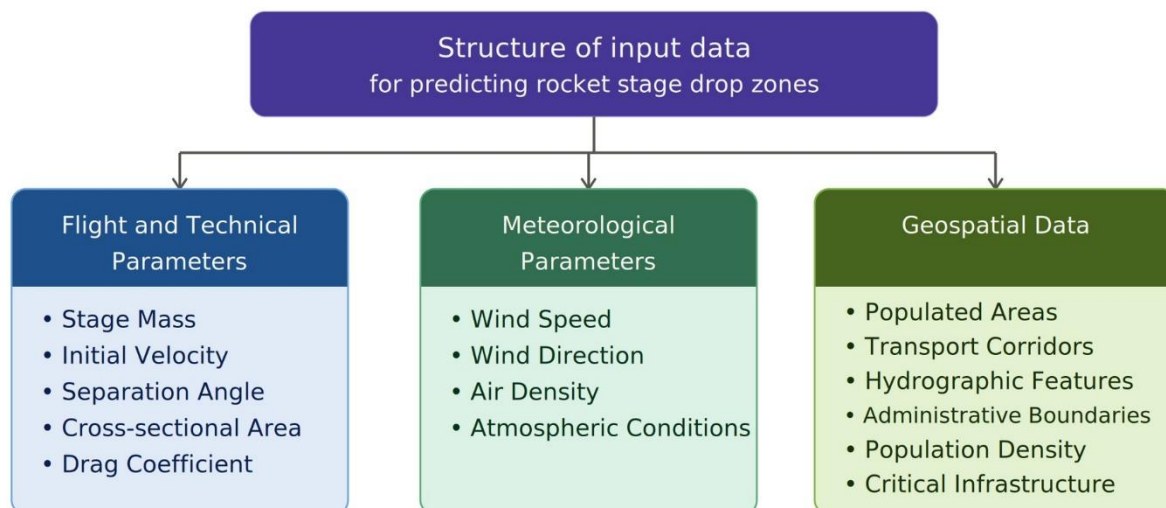


Рисунок 2 - Структура входных данных, используемых для прогнозирования зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя

На рисунке 2 представлена структура входных данных, используемых для прогнозирования зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя. Все исходные данные разделены на три основные группы: лётно-технические параметры, метеорологические параметры и геопространственные данные. Такая структура показывает, что точность прогнозирования определяется не одним набором параметров, а комплексной интеграцией физических характеристик ступени, атмосферных условий и пространственной информации о территории.

Детерминированная модель траектории.

Движение отделившейся ступени ракеты после отделения описывалось детерминированной динамической моделью, учитывающей силу тяжести и аэродинамическое сопротивление в условиях бокового ветра. Состояние объекта задавалось вектором положения $r(t)$ и вектором скорости $v(t)$. Траектория рассчитывалась от момента отделения до пересечения объектом поверхности Земли.

Определяющие уравнения могут быть записаны в виде:

$$dr/dt = v, \quad (1)$$

$$m \cdot dv/dt = m \cdot g + F_a, \quad (2)$$

где m - масса отделившейся ступени, g - вектор ускорения свободного падения, а F_a - сила аэродинамического сопротивления.

$$F_a = -0.5 \cdot C_D \cdot \rho(h) \cdot S \cdot |v - v_w| \cdot (v - v_w), \quad (3)$$

где C_D — коэффициент сопротивления, $\rho(h)$ — плотность воздуха как функция высоты h , S — характерная площадь, а v_w — вектор скорости ветра. Таким образом, относительная скорость тела по отношению к атмосфере

учитывалась явно, что принципиально важно для прогнозирования бокового сноса и конечных координат падения.

Детерминированное решение данной системы позволяло получить номинальную траекторию и ожидаемую точку падения для заданного набора начальных и атмосферных условий.

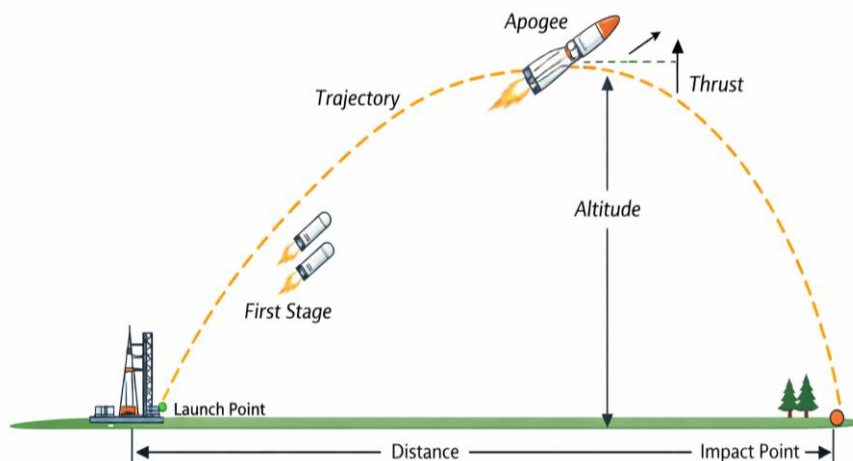


Рисунок 3 - Детерминированная модель траектории полёта отделяющейся ступени ракеты-носителя

На рисунке 3 представлена детерминированная модель траектории полёта отделяющейся ступени ракеты-носителя. Схема иллюстрирует расчёт движения объекта от точки старта до предполагаемой точки падения с учётом основных параметров траектории, включая дальность, высоту и характерную баллистическую дугу полёта. Такой подход позволяет определить номинальную траекторию движения ступени при заданных начальных условиях и использовать её как базу для дальнейшего анализа зон падения и оценки риска.

Стохастическое моделирование неопределённости.

Поскольку реальное снижение отделяющихся ступеней зависит от неопределённости аэродинамических, метеорологических параметров и начальных условий, детерминированная модель была расширена с использованием стохастического моделирования. В предлагаемой схеме неопределённые параметры, такие как скорость ветра, коэффициент сопротивления, угол отделения и начальная скорость, рассматривались как случайные величины в пределах физически допустимых диапазонов.

Для каждого прогона моделирования j формировался вектор параметров

$$X_j = [m_j, C_{D,j}, \theta_j, v_{\theta,j}, v_{w,j}(h)], \quad (4)$$

а соответствующая точка падения (x_j, y_j) определялась с помощью решателя траектории. После N повторных моделирований средние координаты падения оценивались как

$$x_{\text{mean}} = (1/N) \cdot \sum x_i \quad (5)$$

$$y_{\text{mean}} = (1/N) \cdot \sum x_i \quad (6)$$

а дисперсии координат рассчитывались по формулам:

$$\sigma_x = \sqrt{[(1/N) \cdot \sum (x_j - y_{\text{mean}})^2]} \quad (7)$$

$$\sigma_y = \sqrt{[(1/N) \cdot \sum (x_j - y_{\text{mean}})^2]} \quad (8)$$

Такая процедура позволяла формировать вероятностную зону падения вместо одной детерминированной точки. Кроме того, вероятность выхода ступени за пределы заданной безопасной зоны оценивалась как

$$P_{\text{out}} = N_{\text{out}} / N, \quad (9)$$

где N_{out} — число смоделированных траекторий, для которых точки падения оказались вне допустимой области. Такое вероятностное представление является более подходящим для оперативного планирования безопасности, поскольку оно явно отражает неопределённость.

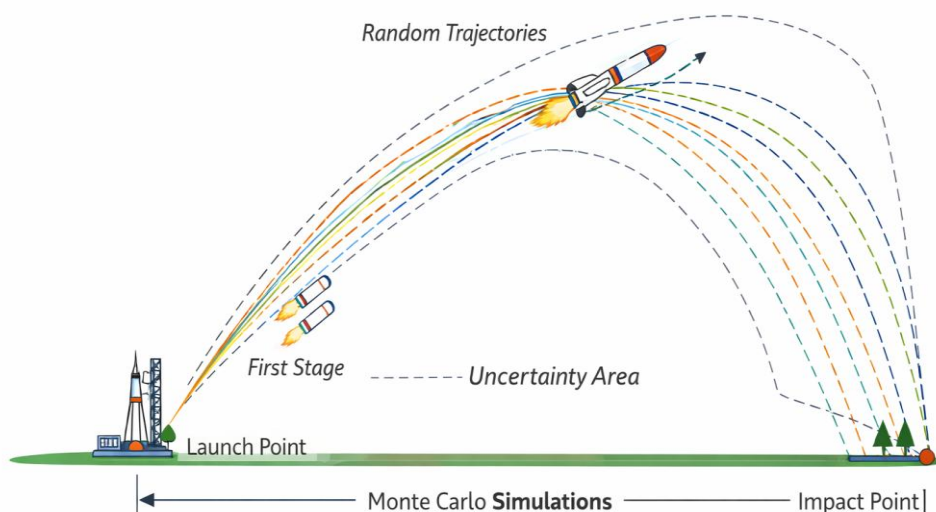


Рисунок 4 - Схема стохастического моделирования неопределённости траектории отделяющейся ступени ракеты-носителя

На рисунке 4 представлена схема стохастического моделирования неопределённости траектории отделяющейся ступени ракеты-носителя. В отличие от детерминированного подхода, здесь показан набор возможных траекторий, формируемых при многократных расчётах с варьированием исходных параметров, что позволяет отразить влияние случайных факторов и внешних возмущений. Такая модель даёт возможность определить область неопределённости возможного падения ступени и использовать её для более реалистичной оценки риска и последующего пространственного анализа в GIS-среде.



Пространственная оценка риска на основе GIS.

После численного моделирования рассчитанные точки падения и вероятностные зоны рассеивания переносились в GIS-среду. Затем выполнялся пространственный оверлейный анализ для оценки взаимодействия прогнозируемых зон падения с уязвимыми территориальными объектами. В частности, полученные зоны падения пересекались со слоями плотности населения, землепользования, транспортной инфраструктуры, населённых пунктов и критически важных объектов.

Для ранжирования опасных территорий использовался интегральный пространственный показатель риска в следующем обобщённом виде:

$$R_i = P_i \cdot (w_1 \cdot D_i + w_2 \cdot C_i + w_3 \cdot L_i), \quad (10)$$

где R_i — показатель риска для зоны i , P_i — прогнозируемая вероятность падения в этой зоне, D_i — плотность населения, C_i — индикатор наличия критической инфраструктуры, L_i — фактор землепользования или экологической чувствительности, а w_1, w_2, w_3 — весовые коэффициенты, отражающие относительный вклад каждого компонента. Такая запись позволяла перейти от простого прогноза координат к более практической интерпретации территориальной опасности.

Итогом данного этапа являлся набор цифровых тематических карт, отображающих ожидаемые точки падения, вероятностные контуры и классы территориального риска. Эти карты использовались как основа для визуального анализа, формирования предупреждений и поддержки профилактических мероприятий.

Программный рабочий процесс и модульная структура

С точки зрения реализации предложенная методика была организована как последовательность пяти функциональных модулей: ввод данных, предварительная обработка, моделирование траектории, пространственный анализ риска и визуализация/формирование отчётов. Модуль ввода собирал данные из файлов, сенсорных систем, внешних баз данных и облачных сервисов. Модуль предварительной обработки проверял согласованность и подготавливал данные для численных расчётов. Модуль моделирования реализовывал детерминированные и стохастические модели траектории. GIS-модуль анализа выполнял пространственное наложение, зонирование опасности и вычисление показателей риска. Заключительный модуль формировал карты, графики и аналитические отчёты для конечных пользователей.

Такая модульная структура обеспечивает расширяемость системы и позволяет интегрировать её с внешними метеорологическими сервисами, цифровыми двойниками территорий, системами оповещения и платформами мониторинга. Кроме того, она повышает воспроизводимость, поскольку

каждый этап рабочего процесса может быть независимо проверен и обновлён.

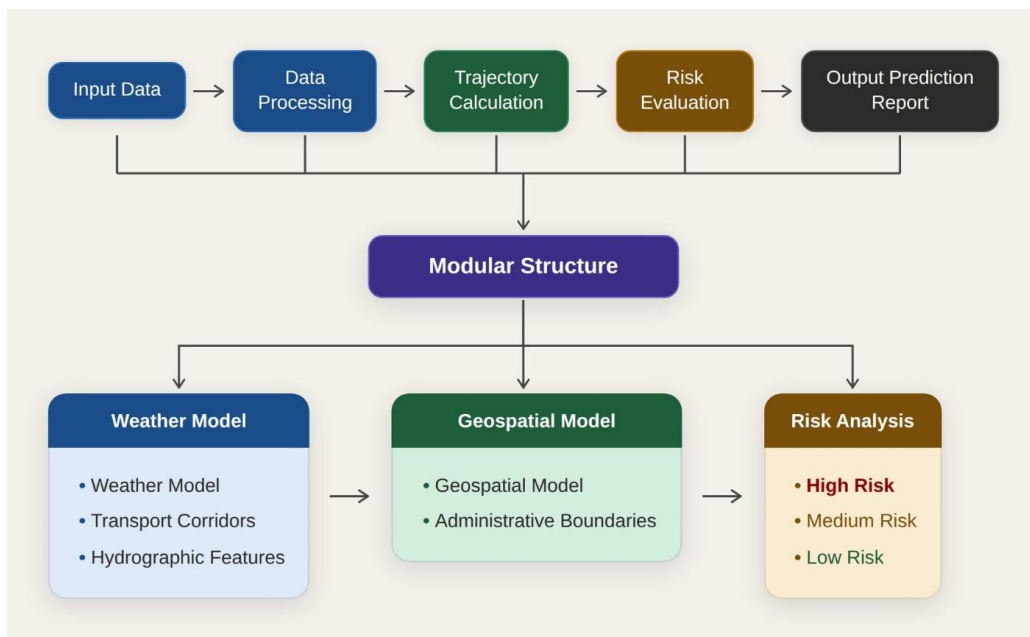


Рисунок 5 - Программная последовательность обработки данных и модульная структура системы прогнозирования зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя

На рисунке 5 представлена программная последовательность обработки данных и модульная структура системы прогнозирования зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя. Верхняя часть схемы отражает основной рабочий процесс, включающий ввод данных, их обработку, расчёт траектории, оценку риска и формирование итогового прогностического отчёта. Нижняя часть показывает модульную организацию системы, в которой выделены отдельные блоки метеорологического моделирования, геопространственного анализа и оценки риска, взаимодействующие между собой в рамках единой вычислительной среды.

Сравнительная оценка моделей прогнозирования.

Для оценки эффективности предложенной схемы были сопоставлены три подхода к моделированию: классическая баллистическая модель, стохастическая модель на основе метода Монте-Карло и модель с элементами искусственного интеллекта и машинного обучения, используемая для адаптивного уточнения результатов прогноза. Сравнение проводилось для нескольких репрезентативных сценариев с различными значениями массы, скорости ветра и угла отделения.

Основными критериями оценки были средняя ошибка прогноза, стандартное отклонение ошибки и процент случаев, в которых прогнозируемая точка падения выходила за пределы безопасной зоны. Точечная ошибка прогноза определялась как

$$\Delta = \sqrt{[(x_{\text{pred}} - x_{\text{ref}})^2 + (y_{\text{pred}} - y_{\text{ref}})^2]}, \quad (11)$$

где $(x_{\text{pred}}, y_{\text{pred}})$ — прогнозируемые координаты точки падения, а $(x_{\text{ref}}, y_{\text{ref}})$ — эталонные координаты, полученные из базового сценария или наблюдательных данных. Этот показатель позволял выполнить прямое количественное сравнение точности прогнозирования для различных подходов.

Таким образом, предложенная методика объединяет физическую реализуемость, распространение неопределённости и территориальную интерпретацию результатов в рамках единой GIS-ориентированной схемы. Такая интеграция повышает практическую ценность модели для анализа безопасности запусков, поскольку поддерживает как точное прогнозирование траектории, так и содержательную оценку территориальных последствий.

Evaluation Criteria	Deterministic Model	Stochastic Model (Monte Carlo)	Hybrid Model	GIS Model
Prediction Accuracy	Medium	High	Very High	High
Uncertainty Consideration	Does Not Account	Accounts (Probabilistic)	Partially Accounts	Account (Spatial)
Computational Complexity	Low	Medium	High	Medium
Required Data	Basic Data	Statistical Distribution	Meteorological + Basic	Full GIS Data

Рисунок 6 - Сравнительная оценка моделей прогнозирования, используемых для определения зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя

На рисунке 6 представлена сравнительная оценка моделей прогнозирования, используемых для определения зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя. В схеме сопоставлены детерминированная, стохастическая, гибридная и GIS-ориентированная модели по основным критериям, включая точность прогноза, учёт неопределённости, вычислительную сложность, требуемые данные и характер получаемого результата. Такое сравнение позволяет обосновать выбор наиболее эффективного подхода для практических задач прогнозирования и пространственной оценки риска.

На рисунке 7 представлена схема контроля качества данных, применяемая перед выполнением численного моделирования и пространственного анализа.

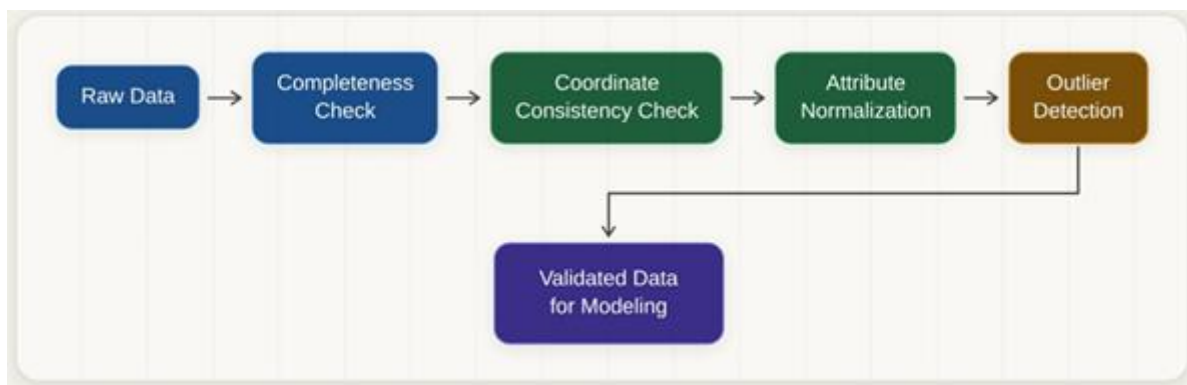


Рисунок 7 - Схема контроля качества данных, применяемая перед выполнением численного моделирования и пространственного анализа

Последовательность этапов включает проверку полноты данных, контроль согласованности координат, нормализацию атрибутов и выявление выбросов, после чего формируется верифицированный набор данных, пригодный для моделирования. Такая схема показывает, что достоверность прогноза зон падения в значительной степени зависит от качества и согласованности исходной информации.



Рисунок 8 - Схема формирования карты риска на основе последовательной обработки пространственных и аналитических данных

На рисунке 8 представлена схема формирования карты риска на основе последовательной обработки пространственных и аналитических данных. Вначале выполняются сбор и подготовка данных, затем проводится анализ угроз и оценка уязвимости территории, после чего осуществляется приоритизация и визуализация рисков. Итогом данного процесса является формирование карты риска, которая позволяет наглядно отобразить опасные зоны и использовать результаты для пространственного анализа и поддержки принятия решений.

На рисунке 10 представлена схема контура обновления прогноза в реальном времени. В ней показан циклический процесс, при котором новые данные поступают в систему, проходят этап анализа, используются для обновления модели, после чего формируется уточнённый прогноз. Такая структура отражает адаптивный принцип работы системы и позволяет

оперативно корректировать результаты прогнозирования при изменении внешних условий и поступлении новой информации.

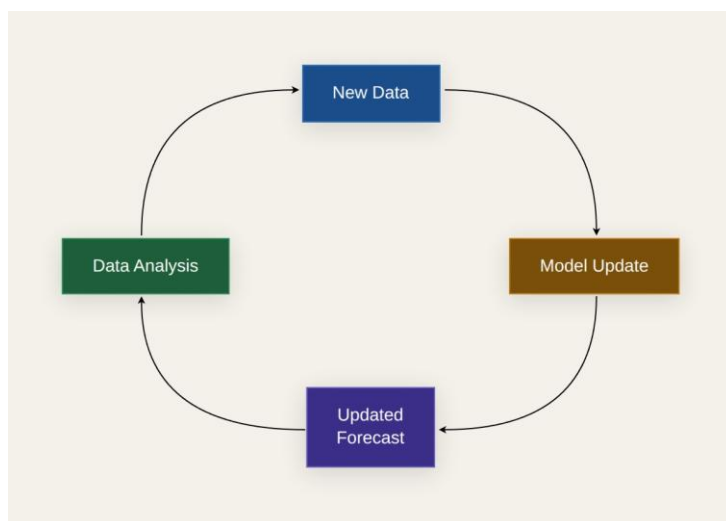


Рисунок 10 - Схема контура обновления прогноза в реальном времени

Результаты.

В работе приведены результаты математического моделирования зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя с применением интегрированной GIS-платформы. Проведённый анализ включал три варианта, отличающихся массой элемента, углом отделения и метеоусловиями. Для каждого случая определялись географические координаты точки падения, размер отклонения и характеристики потенциально опасной зоны. Полученные данные свидетельствуют, что при массе 850 кг, скорости ветра 5 м/с и угле 90° прогнозируемая точка падения — 52.471° с.ш. и 76.972° в.д., отклонение — 132 м. Во втором случае, при массе 820 кг, скорости ветра 8 м/с и угле 85° , точка падения оказалась на позиции 52.478° с.ш. и 76.964° в.д., отклонение составило минимальные 98 м. В третьем сценарии, при массе 870 кг, скорости ветра 4 м/с и угле 92° , координаты падения — 52.465° с.ш. и 76.977° в.д., отклонение — 142 м. Наиболее точным оказался второй вариант. Сравнение моделей показало, что современные подходы превосходят классическую баллистическую схему. Средняя ошибка классической модели — 220 м, стохастической модели Монте-Карло — 95 м, а модели с использованием искусственного интеллекта — 60 м. При этом вероятность выхода точки падения за пределы безопасной зоны упала с 12% до 1%, что подтверждает повышение достоверности и надёжности прогнозирования. Пространственный анализ риска выявил наибольшую уязвимость зоны С: плотность населения — 340 чел./км², вероятность падения — 3.7%, наличие критически важной инфраструктуры. Зона А характеризуется умеренным уровнем угрозы, зона В — наименее опасна из-за низкой плотности населения и отсутствия объектов жизнеобеспечения. Дополнительная оценка распределения затрат показала, что наибольший объём расходов приходится на этап обработки и анализа



данных — около 40%, визуализация — 25%, подготовка данных — 15%, ввод информации и оформление отчётов — по 10% каждый. В целом, совмещение детерминированного моделирования, стохастического анализа и оценки рисков через GIS позволяет повысить точность прогнозов, сузить радиус опасной зоны и обеспечить более обоснованный подход к защите населения и инфраструктуры.

Таблица 1 - Результаты сценарного моделирования зон падения

Сценарий	Масса ступени, кг	Скорость ветра, м/с	Угол отделения, °	Прогнозируемая широта, ° с.ш.	Прогнозируемая долгота, ° в.д.	Отклонение, м
1	850	5	90	52.471	76.972	132
2	820	8	85	52.478	76.964	98
3	870	4	92	52.465	76.977	142

Таблица 1 отражает результаты сценарного моделирования зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя при различных сочетаниях массы, скорости ветра и угла отделения. Установлено, что наименьшее отклонение прогнозируемой точки падения наблюдается во втором сценарии и составляет 98 м, тогда как в первом и третьем сценариях отклонение достигает 132 и 142 м соответственно. Это показывает, что изменение начальных параметров и метеорологических условий оказывает заметное влияние на точность прогноза и пространственное положение потенциально опасной зоны.

Таблица 2 - Сравнительная оценка моделей прогнозирования

Модель	Средняя ошибка, м	Стандартное отклонение, м	Выход за безопасную зону, %
Классическая баллистическая	220	65	12
Стохастическая (Монте-Карло)	95	40	4
AI/ML-модель	60	25	1

Таблица 2 демонстрирует сравнительную эффективность различных моделей прогнозирования зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя. Классическая баллистическая модель характеризуется наибольшей средней ошибкой 220 м, стандартным отклонением 65 м и выходом за



безопасную зону в 12% случаев, что указывает на её сравнительно низкую точность. Стохастическая модель Монте-Карло обеспечивает заметное улучшение результатов, снижая среднюю ошибку до 95 м, а наиболее высокую точность показывает AI/ML-модель, для которой средняя ошибка составляет 60 м, стандартное отклонение — 25 м, а доля выхода за безопасную зону уменьшается до 1%.

Таблица 3 - Пространственная оценка риска по зонам

Зона	Плотность населения, чел./км ²	Вероятность падения, %	Критическая инфраструктура	Уровень риска
А	150	1.2	Да	Средний
В	30	0.2	Нет	Низкий
С	340	3.7	Да	Высокий

Таблица 3 отражает результаты пространственной оценки риска для различных территориальных зон с учётом плотности населения, вероятности падения и наличия критической инфраструктуры. Наиболее уязвимой является зона С, где при плотности населения 340 чел./км² и вероятности падения 3.7% уровень риска определяется как высокий. Зона А характеризуется средним уровнем риска, тогда как зона В, имеющая наименьшую плотность населения и минимальную вероятность падения, относится к зоне низкого риска.

Таблица 4 - Распределение вычислительных и организационных затрат

Этап	Доля затрат, %
Ввод данных	10
Предварительная обработка	15
Анализ данных и моделирование	40
Визуализация	25
Формирование итоговых отчётов	10

Таблица 4 показывает распределение вычислительных и организационных затрат между основными этапами работы системы прогнозирования. Наибольшая доля ресурсов приходится на этап анализа данных и моделирования, который составляет 40%, что подчёркивает его ключевую роль в формировании точного прогноза. Существенная часть затрат также связана с визуализацией результатов — 25%, тогда как ввод



данных и формирование итоговых отчётов требуют по 10%, а предварительная обработка занимает 15% общего объёма работ.

Таблица 5 - Обобщённая интерпретация полученных результатов

Показатель	Результат
Наименьшее отклонение	Сценарий 2, 98 м
Наибольшее отклонение	Сценарий 3, 142 м
Наиболее точная модель	AI/ML-модель
Наиболее уязвимая территория	Зона С
Основной ресурсоёмкий этап	Анализ данных и моделирование
Практический эффект	Снижение ошибки прогноза до 60 м и сокращение радиуса опасной зоны примерно на 25%

Таблица обобщает 5 ключевые результаты исследования и позволяет выделить наиболее значимые выводы по предложенной методике прогнозирования. Установлено, что наименьшее отклонение получено во втором сценарии и составляет 98 м, тогда как наибольшее отклонение наблюдается в третьем сценарии и достигает 142 м. Наиболее точной оказалась AI/ML-модель, а наиболее уязвимой территорией по совокупности факторов определена зона С. Кроме того, показано, что наиболее ресурсоёмким этапом является анализ данных и моделирование, а практический эффект применения методики выражается в снижении ошибки прогноза до 60 м и сокращении радиуса потенциально опасной зоны примерно на 25%.

На рисунке 11 показано изменение величины отклонения прогнозируемой точки падения по трём рассматриваемым сценариям. Минимальное значение отклонения наблюдается во втором сценарии и составляет около 98 м, тогда как в первом и третьем сценариях этот показатель возрастает до 132 и 142 м соответственно. Такая зависимость указывает на то, что второй сценарий обеспечивает наиболее благоприятные условия с точки зрения точности прогноза, тогда как первый и особенно третий сценарий сопровождаются большим пространственным разбросом результатов.

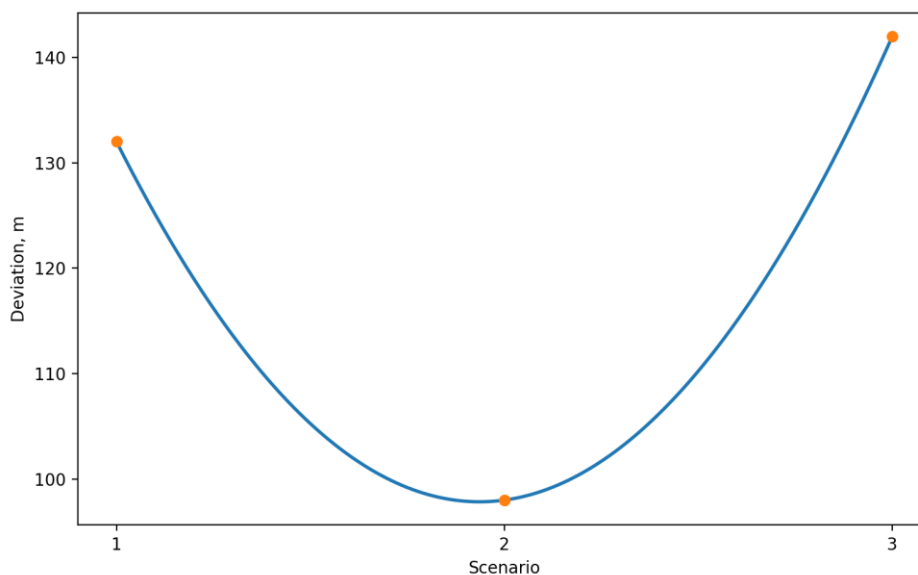


Рисунок 11 - Изменение величины отклонения прогнозируемой точки падения по трём рассматриваемым сценариям

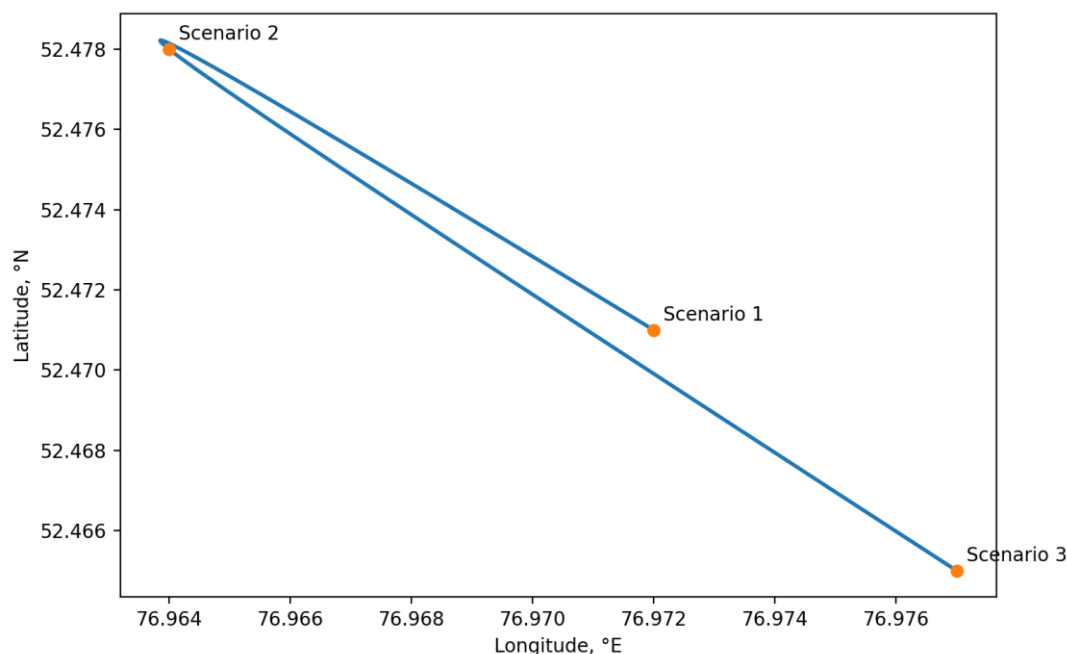


Рисунок 12 - Прогнозируемые координаты точек падения для трёх сценариев моделирования

На рисунке 12 представлены прогнозируемые координаты точек падения для трёх сценариев моделирования. Видно, что сценарий 2 соответствует наиболее северному положению точки падения, тогда как сценарий 3 расположен южнее остальных, а сценарий 1 занимает промежуточное положение. Такое распределение подтверждает, что изменение исходных параметров моделирования приводит к смещению точки падения в пространстве, что необходимо учитывать при построении карт риска и определении границ потенциально опасных зон.

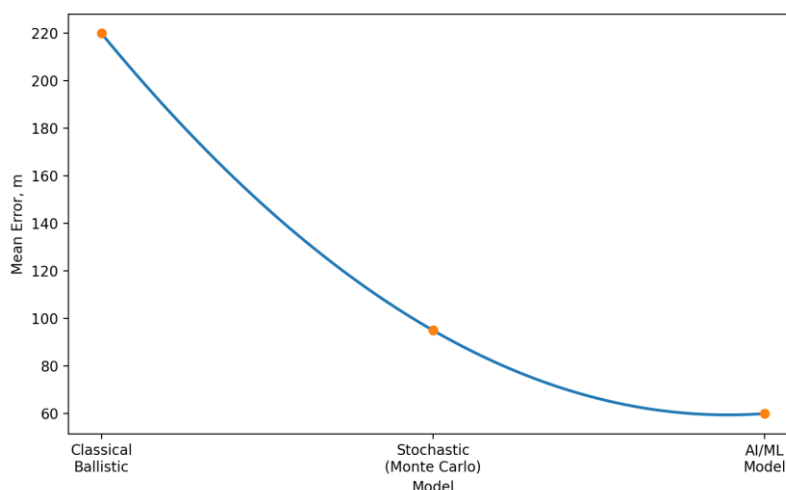


Рисунок 13 - Изменение средней ошибки прогнозирования для различных моделей

На рисунке 13 показано изменение средней ошибки прогнозирования для различных моделей. Наибольшее значение ошибки наблюдается у классической баллистической модели и составляет 220 м, тогда как стохастическая модель Монте-Карло снижает её до 95 м, а AI/ML-модель обеспечивает наилучший результат — около 60 м. Это свидетельствует о том, что применение современных вероятностных и интеллектуальных методов существенно повышает точность прогноза по сравнению с традиционным баллистическим подходом.

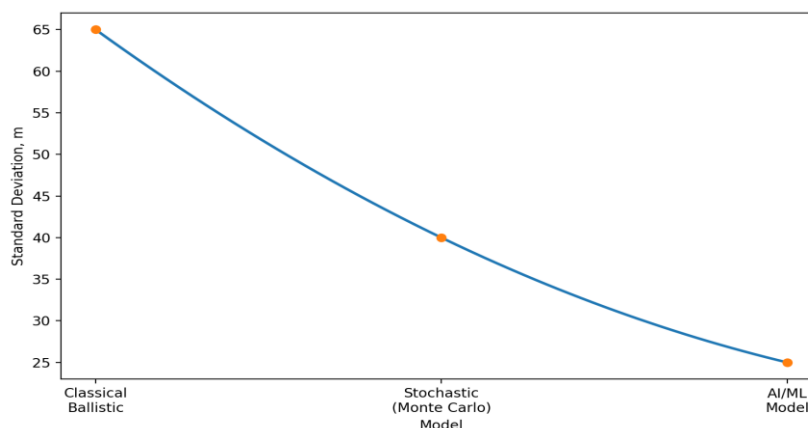


Рисунок 14 - Сравнение стандартного отклонения ошибки для трёх моделей прогнозирования

На рисунке 14 представлено сравнение стандартного отклонения ошибки для трёх моделей прогнозирования. Классическая баллистическая модель характеризуется наибольшим разбросом результатов — 65 м, тогда как для стохастической модели Монте-Карло этот показатель снижается до 40 м, а для AI/ML-модели достигает минимального значения 25 м. Это подтверждает, что современные методы не только повышают точность

прогноза, но и обеспечивают большую устойчивость и стабильность результатов моделирования.

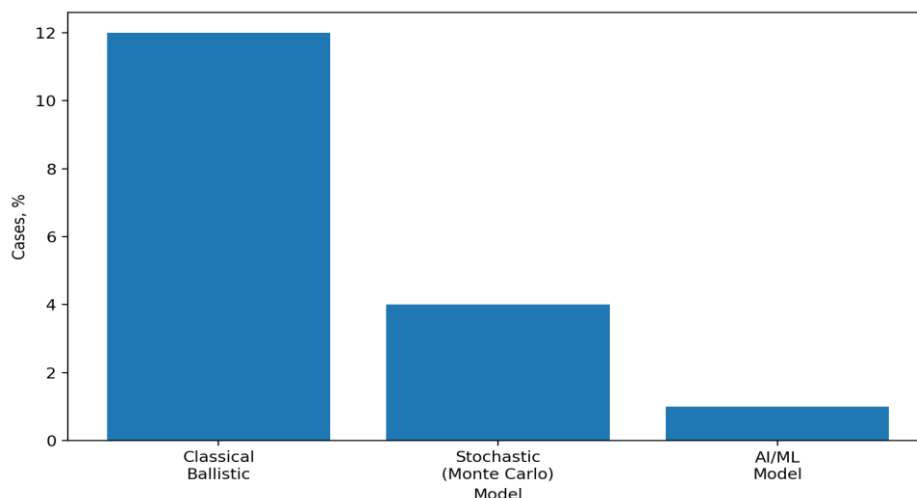


Рисунок 15 - Доля случаев, в которых прогнозируемая точка падения выходит за пределы безопасной зоны, для различных моделей

На рисунке 15 показана доля случаев, в которых прогнозируемая точка падения выходит за пределы безопасной зоны, для различных моделей. Максимальное значение наблюдается у классической баллистической модели и составляет 12%, тогда как для стохастической модели Монте-Карло этот показатель снижается до 4%, а для AI/ML-модели — до 1%. Полученные результаты подтверждают, что использование более совершенных методов моделирования значительно повышает надёжность прогноза и снижает вероятность ошибочного определения опасной зоны.

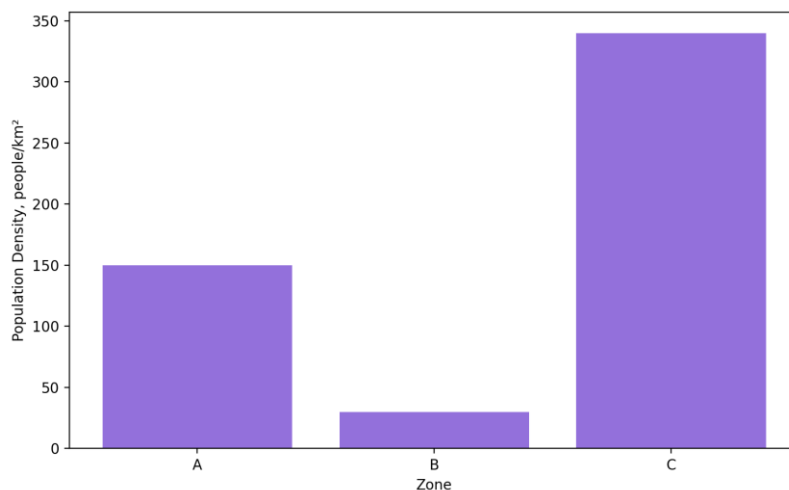


Рисунок 16 - Распределение плотности населения по рассматриваемым зонам риска

На рисунке 16 представлено распределение плотности населения по рассматриваемым зонам риска. Наибольшее значение наблюдается в зоне С и составляет около 340 чел./км², тогда как зона А характеризуется средней

плотностью населения 150 чел./км², а зона В — минимальной, около 30 чел./км². Это показывает, что зона С является наиболее чувствительной с точки зрения возможных последствий падения, поскольку высокая плотность населения усиливает потенциальный территориальный риск.

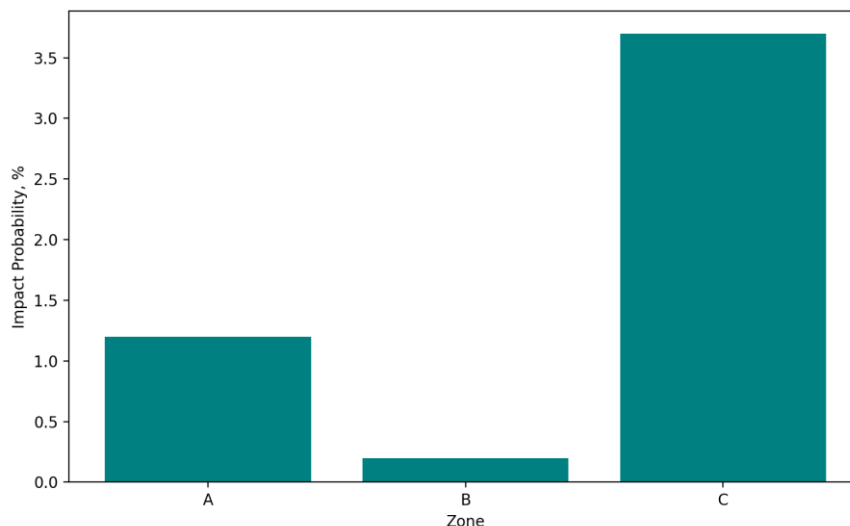


Рисунок 17 - Вероятность падения отделяющихся элементов в пределах рассматриваемых зон

На рисунке 17 представлена вероятность падения отделяющихся элементов в пределах рассматриваемых зон. Наибольшее значение зафиксировано для зоны С и составляет 3.7%, тогда как для зоны А вероятность падения равна 1.2%, а для зоны В — лишь 0.2%. Это подтверждает, что зона С является наиболее опасной не только по плотности населения, но и по вероятности возникновения самого события падения, что дополнительно усиливает её общий уровень риска.

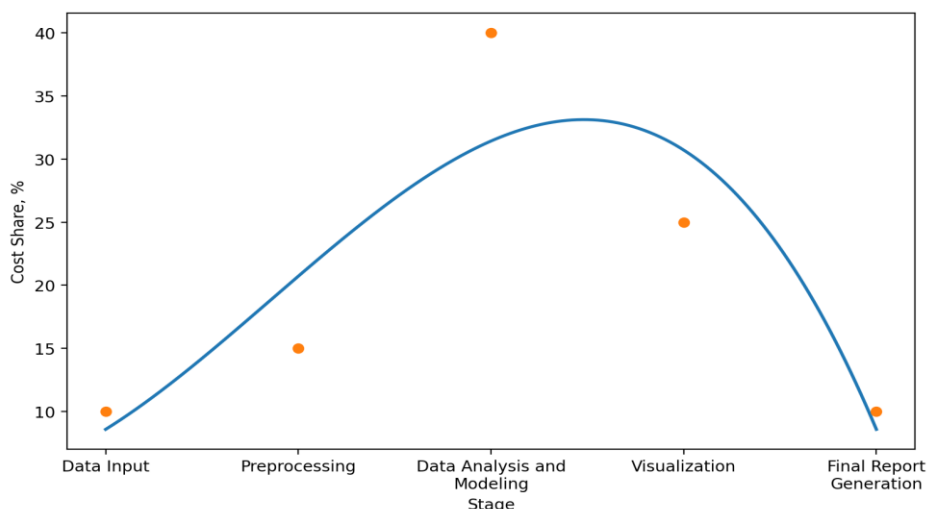


Рисунок 18 - Распределение доли затрат между основными этапами работы системы прогнозирования



На рисунке 18 показано распределение доли затрат между основными этапами работы системы прогнозирования. Наибольшая нагрузка приходится на этап анализа данных и моделирования, где затраты достигают 40%, тогда как визуализация занимает 25%, предварительная обработка — 15%, а ввод данных и формирование итогового отчёта составляют по 10%. Это указывает на то, что центральным и наиболее ресурсоёмким элементом всей системы является именно вычислительно-аналитический этап, определяющий качество итогового прогноза.

Заключение.

Разработана GIS-ориентированная методика прогнозирования зон падения отделяющихся ступеней ракеты-носителя, объединяющая детерминированное моделирование траектории, стохастический анализ неопределённости и пространственную оценку риска. Показано, что изменение массы ступени, скорости ветра и угла отделения существенно влияет на координаты точки падения и величину отклонения, а наилучшие результаты демонстрирует AI/ML-модель, снизившая среднюю ошибку до 60 м и долю выхода за пределы безопасной зоны до 1%. Установлено, что наиболее уязвимыми являются территории с высокой плотностью населения и критической инфраструктурой. Таким образом, полученные результаты подтверждают, что интеграция траекторного моделирования, стохастического анализа и GIS-оценки риска повышает точность прогнозирования и практическую ценность системы для задач обеспечения безопасности космических запусков. Перспективы дальнейших исследований связаны с использованием данных в реальном времени, адаптивным обновлением параметров модели, расширением набора учитываемых факторов и интеграцией методики с цифровыми двойниками территорий, платформами мониторинга и системами раннего оповещения. Исследования проводились в рамках проекта ГФ ИРН AP23488291 ИИВТ КН МНВО РК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Juho Lee, Jae-Hung Han. (2025). Separation and Release Devices for Aeronautical and Astronautical Systems: A Review. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*. Vol. 26, pp. 131–161.
2. Y. Xu, Z. Xie, F. Wang. (2021). Trajectory Analysis and Impact Prediction for Rocket Boosters. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. Vol. 44, No. 7, pp. 1278–1287.
3. F. Gan, C. Wu, J. Wang Yu. (2022). Liquid Launch Vehicle Safety Assessment Model Based on Semi-Quantitative Risk Analysis. *Mathematics*. Vol. 10, No. 24, 4772.
4. J. Acquatella, R. Reiner. (2014). Stage Separation Dynamics Modeling for End-to-End Launch Vehicle Trajectory Simulations. *Proceedings of the 10th International Modelica Conference*, pp. 693–701.



5. J. Roshanian, M. Talebi. (2008). Monte Carlo simulation of stage separation dynamics of a multistage launch vehicle. *Applied Mathematics and Mechanics (English Edition)*. Vol. 29, no. 11, pp. 1411–1426,. doi: 10.1007/s10483-008-1103-z/
6. B.SR. G. Keanini, N. Srivastava, P. T. Tkacik. (2011). Stochastic Rocket Dynamics under Random Nozzle Side Loads. *Ann. Phys. (Berlin)* 523, N°. 6, pp. 459 – 487.
7. D. Luchinsky, V. Hafiychuk. I. Kulikov, V. Smelyanskiy, A. Patterson-Hine, J. Hanson, A. Hill. (2010). Stage Separation Failure: Model-Based Diagnostics and Prognostics. *Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, pp. 1–12.
8. S. Wang, Y. Li, T. Ma.(2022). GIS-Based Risk Assessment for Rocket Debris Impact Zones. *Sensors*. Vol. 22, No. 3,820.
9. Z. Zhou, Q. Wang, H. Xu. (2023). Dynamic Modeling and Simulation of Multistage Rocket Separation. *Aerospace Science and Technology*, , Vol. 136, 107556
10. R. Wang, J. Zhou. (2021). Integrated GIS Modeling of Rocket Debris Dispersion. *Remote Sensing*, , Vol. 13, No. 8, Article 1555.
11. G. D. Katona, A. Kis. (2019). Adaptive Control and Trajectory Optimization for Multistage Rockets. *IFAC PapersOnLine*, , Vol. 52, No. 12, pp. 375–380.
12. T. Ishikawa, Y. Suzuki. (2020). Safety Analysis of Falling Rocket Debris using GIS and Monte Carlo Methods. *Safety Science*, , Vol. 130, Article 104880.
13. P. Zhang, X. Liu. (2022). Simulation of Separation Process and Falling Area Prediction for Rocket Boosters. *Aerospace Systems*. Vol. 5, No. 2, pp. 97–106.
14. R. Wang, J. Zhou. (2021). Integrated GIS Modeling of Rocket Debris Dispersion. *Remote Sensing*, , Vol. 13, No. 8, Article 1555.
15. Z. Wang, H. Xu. (2021). GIS-Based Dynamic Risk Modeling for Rocket Stage Debris Impact. *Geospatial Health*. Vol. 16, No. 2, pp. 119–128.
16. Negri E., Fumagalli L., Macchi M. (2017). A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manufacturing*, 11, pp. 939–948.
17. A. Graser. (2016). *Learning QGIS. Third Edition: Explore and create interactive maps using the leading open-source GIS*. Packt Publishing, pp. 210.
18. Byers M., Wright E., Boley A. et al. (2022). Unnecessary Risks Created by Uncontrolled Rocket Reentries. *Nature Astronomy*, 6, 1093–1097.
19. J. Lee, H. Kim, E.J. Choi, J. Choi, J. Yu., J. Jo, J. Ahn. (2024). Review of Space Debris Modeling Methods and Development of Korean Space Debris Model. *Journal of Astronautical Space Sciences*, 41 (4), pp. 209–230.
20. A. Rao, G. Rondina. (2022). Open Access to Orbit and Runaway Space Debris Growth. Pp.84. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.07442>.
21. Slíz -Balogh J., Horváth D., Szabó R., Horváth G. (2020) . Dynamics of Spherical Space Debris of Different Sizes Falling to Earth. *Astrophysics*. Pp.1-16



22. Xu Y., Liu X., He R., Zhu Y., Zuo Y., He L. (2023). Active Debris Removal Mission Planning Method Based on Machine Learning. *Mathematics*, 11 (6):1419.
23. B. N. Pamadi, T. A. Neirynck, N. J. Hotchko, W. I. Scallion, K. J. Murphy, P. F. Covell. Simulation and Analyses of Stage Separation of Two-Stage Reusable Launch Vehicles. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2007, Vol. 44, No. 1, pp. 66–80. DOI: 10.2514/1.17896.
24. P. V. Tartabini, C. M. Roithmayr, M. D. Toniolo, B. N. Pamadi. (2011). Modeling Multibody Stage Separation Dynamics Using Constraint Force Equation Methodology. *Journal of Spacecraft and Rockets*. Vol. 48, No. 4, pp. 573–583. DOI: 10.2514/1.51943.
25. B. N. Pamadi, J. Pei, J. T. Pinier, S. D. Holland, G. H. Klopfer, P. F. Covell. (2012). Aerodynamic Analyses and Database Development for Ares I Vehicle First-Stage Separation. *Journal of Spacecraft and Rockets*, , Vol. 49, No. 5, pp. 864–874. DOI: 10.2514/1.59966.
26. B. N. Pamadi, P. V. Tartabini, M. D. Toniolo, C. M. Roithmayr, C. D. Karlgaard, J. A. Samareh. (2013). Application of Constraint Force Equation Methodology for Launch Vehicle Stage Separation. *Journal of Spacecraft and Rockets*. Vol. 50, No. 1, pp. 191–205. DOI: 10.2514/1.A32048.
27. J. M. Hanson, B. B. Beard. (2012). Applying Monte Carlo Simulation to Launch Vehicle Design and Requirements Verification. *Journal of Spacecraft and Rockets*. Vol. 49, No. 1, pp. 136–144. DOI: 10.2514/1.52910.
28. C. Pardini, L. Anselmo. (2018). Assessing the Risk and the Uncertainty Affecting the Uncontrolled Re-entry of Manmade Space Objects. *Journal of Space Safety Engineering*, , Vol. 5, No. 1, pp. 46–62. DOI: 10.1016/j.jsse.2018.01.003.
29. C. Pardini, L. Anselmo. (2019). Uncontrolled Re-entries of Spacecraft and Rocket Bodies: A Statistical Overview over the Last Decade. *Journal of Space Safety Engineering*. Vol. 6, No. 1, pp. 30–47. DOI: 10.1016/j.jsse.2019.02.001.
30. W. H. Ailor. (2019). Hazards of Reentry Disposal of Satellites from Large Constellations. *Journal of Space Safety Engineering*. Vol. 6, No. 2, pp. 113–121. DOI: 10.1016/j.jsse.2019.06.005.
31. C. Pardini, L. Anselmo. (2024). On the Need to Assess and Mitigate the Risk from Uncontrolled Re-entries of Artificial Space Objects in View of the Current and Future Developments in Space Activities. *Acta Astronautica*. Vol. 219, pp. 662–669. DOI: 10.1016/j.actaastro.2024.03.057.
32. E. Wright, A. Boley, M. Byers. (2025). Airspace Closures Due to Reentering Space Objects. *Scientific Reports*. Vol. 15, Article 2966. DOI: 10.1038/s41598-024-84001-2.



Алия Калижанова, ф.-м.ғ.к., профессор, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Energo University, Алматы, Қазақстан, kalizhanova.aliya@gmail.com

Мурат Кунелбаев, PhD, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Farabi University, Алматы, Қазақстан, murat7508@yandex.kz

Серік Дәруіш, бағдарламашы, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Алматы, Қазақстан

ЗЫМЫРАН ТАСЫҒЫШТЫҢ БӨЛІНЕТІН САТЫЛАРЫНЫҢ ҚҰЛАУ АЙМАҚТАРЫН БОЛЖАУДЫҢ GIS-БАҒДАРЛАНҒАН ӘДІСТЕМЕСІН ӨЗІРЛЕУ

Аңдатпа. Мақалада зымыран тасығыштың бөлінетін сатыларының құлау аймақтарын болжаудың траекторияны детерминирленген модельдеу, белгісіздікті стохастикалық талдау және тәуекелді кеңістіктік бағалау интеграциясына негізделген GIS-бағдарланған әдістемесі қарастырылады. Ұсынылған тәсіл сатылардың ұшу-техникалық параметрлерін, метеорологиялық деректерді және геокеңістіктік ақпаратты бірыңғай есептеу сызбасы аясында біріктіреді, бұл номиналды траекторияны есептеуді, құлау ықтимал аймағын қалыптастыруды және тәуекелдің цифрлық карталарын құруды қамтамасыз етеді.

Әдісті тексеру үшін сатылар массасы, жел жылдамдығы және бөліну бұрышы бойынша ерекшеленетін үш сценарий қарастырылды. Классикалық баллистикалық модель, Монте-Карло стохастикалық моделі және жасанды интеллект пен машиналық оқыту элементтері бар модель салыстырылды. Заманауи әдістерді қолдану болжамның орташа қатесін 60 м-ге дейін азайтуға, стандартты ауытқуды 25 м-ге дейін төмендетуге және қауіпсіз аймақтан тыс шығу үлесін 1%-ға дейін қысқартуға мүмкіндік беретіні көрсетілді.

Кеңістіктік тәуекел талдауы халық тығыздығы жоғары және маңызды инфрақұрылымы бар аумақтар ең осал екенін көрсетті. Алынған нәтижелер траекториялық модельдеуді, белгісіздікті талдауды және GIS-құралдарын біріктіру болжау дәлдігін және ғарыштық ұшырылымдардың қауіпсіздігін қамтамасыз ету кезінде шешім қабылдауды қолдау жүйесінің практикалық маңызын арттыратынын дәлелдейді.

Түйінді сөздер: зымыран тасығыш, бөлінетін саты, құлау аймақтарын болжау, GIS, стохастикалық модельдеу, тәуекелді кеңістіктік бағалау, Монте-Карло әдісі, AI/ML.



Aliya Kalizhanova, candidate of physico-mathematical sciences, professor, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Energo University, Almaty, Kazakhstan, kalizhanova.aliya@gmail.com

Murat Kunelbayev, PhD, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Farabi University, Almaty, Kazakhstan, murat7508@yandex.kz

Serik Daruish, programmer, Institute of Information and Computational Technologies CS MSHE RK, Almaty, Kazakhstan

DEVELOPMENT OF A GIS-BASED METHODOLOGY FOR PREDICTING THE IMPACT ZONES OF SEPARATING STAGES OF A LAUNCH VEHICLE

Abstract. This article discusses a GIS-based method for predicting the impact zones of launch vehicle separating stages based on the integration of deterministic trajectory modeling, stochastic uncertainty analysis, and spatial risk assessment. The proposed approach combines stage performance parameters, meteorological data, and geospatial information within a single computational framework that enables the calculation of a nominal trajectory, the generation of a probabilistic impact zone, and the construction of digital risk maps. To verify the approach, three scenarios were considered, differing in stage mass, wind speed, and separation angle. A comparison was made between a classical ballistic model, a stochastic Monte Carlo model, and a model with elements of artificial intelligence and machine learning. It is demonstrated that the use of modern methods allows for a reduction in the average prediction error to 60 m, a decrease in the standard deviation to 25 m, and a reduction in the percentage of overshoots to 1%. Spatial risk analysis revealed that the most vulnerable areas are those with high population density and critical infrastructure. The results confirm that the integration of trajectory modeling, uncertainty analysis, and GIS tools improves forecast accuracy and the practical value of the system for supporting decision-making in ensuring space launch safety.

Keywords: launch vehicle, separating stage, impact zone prediction, GIS, stochastic modeling, spatial risk assessment, Monte Carlo method, AI/ML.

Поступила: 09 апреля 2026 года

Рецензирована: 15 июня 2026 года

Принята: 18 июня 2026 года



G.S. Beketova, N.A. Mukhametbay, K.F. Kharlinsky

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

E-mail: nartaimuhametbai@gmail.com

PROBLEMS OF IMPLEMENTING INFORMATION SECURITY REQUIREMENTS IN INDUSTRIAL CONTROL SYSTEMS

Abstract. This article examines the key challenges associated with implementing information security requirements in industrial control systems. Based on the analysis of scientific publications, international standards, and industry analytical reports, as well as on the author's own analysis and practical experience, the limitations of directly transferring information security requirements developed for corporate information systems to the industrial environment are identified. It is shown that the architectural and operational characteristics of ICS, the priority of availability and continuity of technological processes, and the long life cycle of industrial equipment necessitate the adaptation of information security requirements. The role of an information security management system is substantiated as a tool for risk-oriented adaptation of security requirements and for the implementation of compensating security measures in industrial systems.

Keywords: industrial control systems (ICS), information security, OT cybersecurity, risk-based approach, information security management system, critical infrastructure protection, defense-related infrastructure, national security.

Introduction.

Industrial control systems (ICS) are designed to monitor and control industrial processes in real time with the involvement of an operator. An ICS comprises hardware and software components that provide data acquisition, processing, and transmission, as well as control of actuators at all stages of the technological process. Industrial control systems form the basis for the operation of industrial enterprises and critical infrastructure facilities. Unlike corporate information systems, ICS manage physical processes in real time and are characterized by strict requirements for availability and operational resilience. The relevance of this issue is especially important for critical and defense-related infrastructure. Industrial control systems are used not only in traditional industrial enterprises, but also in facilities that support energy supply, water treatment, fuel storage and distribution, transport infrastructure, and communication systems. Disruption of such technological processes may affect the continuity of essential services, the operational readiness of defense facilities, and the resilience of national security infrastructure. Therefore, the protection of ICS should be



considered not only as a technical information security task, but also as an important element of critical infrastructure protection and national security.

Disruption of ICS operation as a result of information security incidents can lead not only to economic losses, but also to equipment damage, production downtime, and the occurrence of industrial accidents. According to an analytical report by the Expert and Analytical Center InfoWatch, a steady increase in the number of cyber incidents in the ICS segment was recorded in 2022-2024, with a significant proportion of incidents involving violations of the availability of technological processes [1]. International analytical reports also confirm changes in the threat landscape in industrial environments. In particular, reports by Verizon and IBM indicate an increase in attacks related to credential compromise, remote access abuse, and exploitation of network vulnerabilities, which poses a serious threat to industrial control systems [2], [3].

Despite the development of regulatory and methodological documents in the field of information security, the implementation of relevant security requirements in ICS remains a challenging task. A substantial portion of these requirements was developed with the specifics of corporate IT systems in mind and does not fully take into account the architectural and operational characteristics of industrial control systems, as confirmed by both scientific publications and the provisions of international standards [4].

The purpose of this article is to analyze the key challenges associated with implementing information security requirements in industrial control systems and to substantiate the need for their adaptation within the framework of an information security management system.

The scientific novelty of this study is as follows. The paper proposes and validates a risk-oriented approach to adapting information security requirements in ICS, taking into account the operational and technological constraints of industrial control systems. Unlike traditional approaches that assume a formal transfer of information security requirements from corporate IT systems to industrial environments, the proposed model focuses on assessing the acceptability of security measures based on their impact on the availability and resilience of technological processes. The novelty of the approach lies in the formalization of a procedure for the justified deviation from certain information security requirements, followed by the implementation of compensating security measures within the information security management system.

Materials and Methods.

Specific Features of Industrial Control Systems as an Object of Information Security.

Industrial control systems represent hierarchical distributed systems that include programmable logic controllers, SCADA systems, control servers, and industrial data communication networks. Their key characteristic is the control of physical processes in real time and continuous 24/7 operation, which precludes the



possibility of prolonged downtime and experimental changes to security configurations [5].

In accordance with the recommendations of the NIST SP 800-82 standard, the primary security objectives for industrial systems are the availability and integrity of technological process control, whereas information confidentiality, unlike in corporate IT systems, plays a secondary role. A similar approach is reflected in the IEC 62443 series of standards, which define security requirements for industrial communication networks and systems [6].

Another important feature of industrial control systems is the long life cycle of hardware and software components. In practice, this leads to the operation of legacy operating systems and application software, the updating of which is often impossible without the risk of disrupting the technological process. This issue has been repeatedly highlighted in scientific studies and industry analytical reports [7].

As a result, known vulnerabilities persist in industrial control systems, and their mitigation requires the use of compensating security measures and a risk-oriented approach to the implementation of information security requirements.

Key Problems of Implementing Information Security Requirements in Industrial Control Systems.

Limitations of Software Updates and Vulnerability Management.

In corporate information systems, regular software updates are considered a fundamental requirement of information security. However, in industrial control systems, the installation of updates without prior testing may lead to component incompatibility, failures in controller operation, and loss of control over the technological process. According to industry reports by Dragos and Kaspersky ICS CERT, a significant proportion of incidents in industrial environments are associated with the exploitation of known but unremediated vulnerabilities, the patching of which was postponed for technological reasons [8]. Under conditions where timely vulnerability remediation is not feasible, organizations are forced to compensate for emerging risks through architectural and organizational security measures, including network segmentation, isolation of the technological perimeter, and control of remote access.

Challenges of Deploying Antivirus Protection.

Formal information security requirements typically mandate the use of antivirus solutions. However, the deployment of generic antivirus software in industrial control systems is associated with a high risk of disrupting technological processes.

Automatic file deletion, process blocking, or forced system reboots may result in the interruption of control over technological objects, which is unacceptable in continuous production environments. These risks are examined in detail in analytical materials published by Kaspersky ICS CERT and Positive Technologies [9]. Therefore, both scientific and practical studies emphasize the need to apply specialized security solutions designed for industrial environments, as well as to abandon automatic response modes in favor of controlled and well-documented procedures [10].



Insufficient Segmentation and IT/OT Convergence.

One of the most common causes of incidents in industrial control systems is insufficient segmentation between corporate and technological networks. According to analytical reports by InfoWatch and IBM, a significant number of attacks propagate from the corporate segment into the industrial environment through improperly configured network connections and remote access channels.

The convergence of IT and OT networks without adherence to industrial cybersecurity principles significantly expands the attack surface and increases the likelihood of compromising critical elements of technological control, a concern repeatedly highlighted in CISA recommendations [11].

The implementation of security requirements in industrial control systems requires not only the selection of individual technical controls, but also the correct organization of the interaction between corporate and technological network segments. In modern ICS environments, complete isolation of the technological perimeter is difficult to maintain due to the need for remote maintenance, data exchange with corporate systems, centralized monitoring, and integration with historians and engineering workstations. Therefore, one of the key compensating measures is the creation of a segmented IT/OT architecture with an industrial demilitarized zone.

Figure 1 presents a generalized architecture in which the corporate IT network, industrial DMZ, OT/ICS network, and field level are separated by firewalls and controlled communication channels. This architecture prevents direct access from the corporate network or the Internet to critical ICS components, while still allowing controlled data exchange, monitoring, and vendor maintenance through secure intermediate systems.

As shown in Figure 1, the industrial DMZ acts as an intermediate security layer between the corporate IT network and the OT/ICS network. Systems such as historians, monitoring collectors, patch servers, VPN/PAM solutions, and jump servers are placed in this zone in order to prevent direct interaction between external users and critical control components. Remote vendor access is routed through controlled access mechanisms and should be accompanied by authentication, authorization, session logging, and periodic review of active accounts.

The OT/ICS network contains the main technological control components, including SCADA servers, HMI/operator workstations, engineering workstations, control servers, industrial switches, and PLC/RTU controllers. These components interact with sensors, actuators, motors, pumps, valves, and the physical process at the field level. Direct access from the corporate network to PLCs or field devices must be blocked, while monitoring sensors should collect logs and security events for further analysis. Such segmentation reduces the attack surface and supports the risk-oriented adaptation of information security requirements without disrupting the continuity of technological processes.

Growth of Vulnerabilities and Changes in Attack Vectors.

An analysis of recent industry reports indicates a shift in attack vectors targeting industrial control systems. Whereas infected removable media previously represented the primary source of threats, recent years have seen a predominance of attacks conducted via remote access, credential compromise, and the exploitation of network vulnerabilities. Particular concern is associated with unmanaged and agentless devices, including programmable logic controllers and field devices, for which the deployment of traditional incident detection mechanisms is limited or impractical.

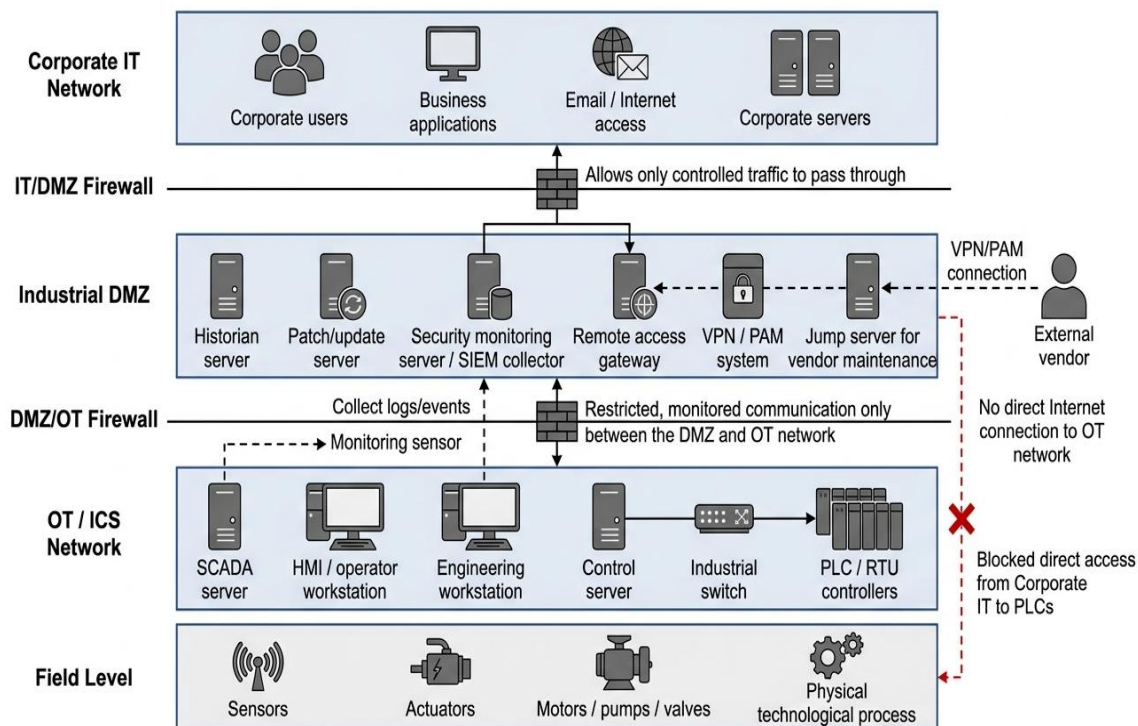


Figure 1 – IT/OT architecture with industrial DMZ and controlled remote access

Human Factor and Organizational Constraints.

The human factor has a significant impact on the level of information security in industrial control systems. According to analytical studies by Verizon and JetInfo, up to 25–30% of incidents in industrial environments are associated with personnel errors, insufficient staff qualification, and violations of established operational procedures [12].

Under these conditions, systematic personnel training, regular knowledge assessment, and the development of an information security culture within a unified management framework become critically important.

Systemic and Organizational Causes of Ineffective Implementation of Information Security Requirements.

An analysis of contemporary practice-oriented sources shows that the key problems in implementing information security requirements in industrial control systems are associated with the mechanical transfer of IT-centric approaches into industrial environments without consideration of operational constraints. The use



of generic security solutions, including antivirus software, active network scanning, and strict authentication mechanisms, may lead to control delays, SCADA system failures, and disruptions to the continuity of technological processes.

The underlying causes of vulnerabilities in industrial control systems are systemic in nature and stem from the multi-level architecture of industrial systems, the long life cycle of equipment, and integration with corporate networks. Formal models of an “isolated technological perimeter” do not reflect actual operating conditions and result in underestimated risk assessments.

Organizational factors also play a significant role in the occurrence of incidents, particularly insufficient interaction between information security teams and operational personnel. Decision-making without due consideration of technological requirements reduces the effectiveness of security measures and increases the likelihood of procedural violations. Under these conditions, effective information security for industrial control systems can only be achieved within a risk-oriented information security management system that enables the adaptation of security requirements, the justification of deviations from formal norms, and the implementation of compensating measures without compromising the stability of technological processes.

Adaptation of Information Security Requirements within an Information Security Management System.

The analysis conducted demonstrates that the identified problems are systemic in nature and cannot be resolved solely through the deployment of individual technical security controls. Effective information security for industrial control systems is achieved within the framework of an information security management system adapted to the conditions of industrial operation.

An information security management system enables the implementation of a risk-oriented approach, in which the acceptability of specific security measures is determined by their potential impact on the technological process. When the implementation of certain formal security requirements is not feasible, a documented risk assessment is performed and compensating security measures are introduced, including network segmentation, isolation of demilitarized zones, control of remote access, and monitoring of security events.

At the same time, the practical implementation of information security requirements in industrial control systems requires consideration of technological constraints, as well as the prioritization of availability and continuity of production processes. In this regard, the present study proposes and validates a model for adapting information security requirements in industrial control systems based on a risk-oriented approach and the principles of an information security management system.

The proposed risk-oriented model for adapting information security requirements in industrial control systems is presented in Figure 2.

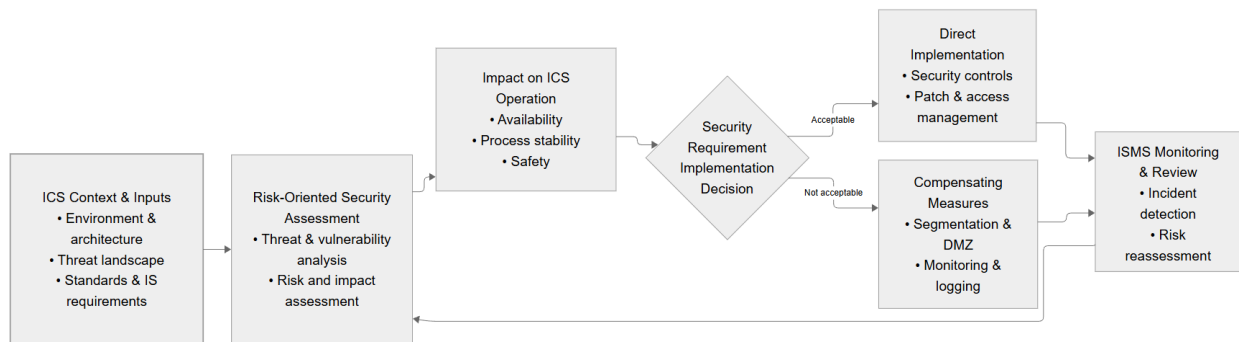


Figure 2 - Risk-oriented model for adapting information security requirements in industrial control systems

Validation of the Model for Adapting Information Security Requirements in Industrial Control Systems.

The validation of the proposed model for adapting information security requirements was conducted based on the results of an information security audit and a pilot project involving the deployment of monitoring and protection tools in the ICS networks of an industrial energy facility. The study examined technological segments of the industrial control system, including servers, operator workstations, engineering stations, network equipment, and data communication channels.

During the information security audit, relevant threats and vulnerabilities characteristic of industrial control systems were identified. It was determined that the most significant risks to ICS are associated with outdated software, the absence of centralized backup mechanisms, the use of unsupported antivirus solutions, the presence of unauthorized network interactions, and the potential for man-in-the-middle attacks (ARP spoofing). The application of the proposed model made it possible to assess the acceptability of implementing security measures with regard to their impact on the availability and resilience of the technological process. In cases where the direct implementation of information security requirements (for example, the deployment of traditional antivirus solutions or software updates) could have disrupted ICS operation, decisions were made to implement compensating measures, including network segmentation, enhanced monitoring, control of network interactions, and security event logging.

As part of the pilot project, a significant number of security events were recorded within the technological network, including events with a high level of criticality. The analysis of network traffic and system logs made it possible to identify previously non-obvious threats, including interactions with external networks under a formally isolated ICS architecture, as well as misconfigurations of individual nodes.

The results obtained confirm the practical applicability of the proposed model for adapting information security requirements and demonstrate the feasibility of using a risk-oriented approach to protect industrial control systems.



Results and Discussion.

As a result of the conducted study and the validation of the proposed approach, the following key results were obtained.

First, it was established that the direct implementation of formal information security requirements developed for corporate IT systems into the industrial ICS environment, without taking technological constraints into account, may lead to reduced control resilience and an increased risk of disrupting the continuity of technological processes.

Second, a model for adapting information security requirements in industrial control systems was developed and validated. The model is based on a risk-oriented assessment of the acceptability of security measures and the application of compensating measures in cases where the implementation of specific requirements is not feasible.

Third, within the pilot project, it was demonstrated that even under a formally isolated technological network architecture, information security events are recorded in industrial control systems, indicating the presence of hidden network interactions and underestimated attack vectors. This result confirms the inadequacy of assumptions regarding the complete isolation of the technological perimeter in the absence of continuous monitoring.

Fourth, the practical applicability of using an information security management system as a tool for aligning information security requirements with the operational characteristics of industrial control systems was confirmed. This approach enables the justification of deviations from formal security requirements and the reduction of overall risk without compromising the technological process.

Conclusion.

Within the framework of this study, the main problems of implementing information security requirements in industrial control systems were analyzed, taking into account the architectural, technological, and operational characteristics of ICS. It was established that the direct transfer of information security requirements used in corporate information systems to the industrial environment is not always acceptable, since such measures may create additional risks for the availability, resilience, and continuity of technological processes.

The main result of the work is the development and practical validation of a risk-oriented model for adapting information security requirements in ICS. The proposed model makes it possible to assess security measures not only from the standpoint of formal compliance with requirements, but also with regard to their possible impact on the technological process. In cases where the direct implementation of certain requirements may disrupt the operation of an industrial system, the model provides for justified deviation from formal norms and the application of compensating security measures, including network segmentation, the use of an industrial DMZ, remote access control, security event monitoring, and logging of critical actions.



The practical validation of the model based on audit materials and a pilot project confirmed its applicability in real industrial conditions. The obtained results revealed hidden network interactions, configuration errors, outdated software, and other underestimated attack vectors, which confirms the need for continuous monitoring and regular risk assessment.

Thus, the proposed approach makes it possible to adapt information security requirements to the conditions of ICS without compromising the reliability and continuity of technological processes. The results of the study can be used to protect industrial enterprises, critical infrastructure facilities, and defense-related systems.

REFERENCES

1. InfoWatch Expert and Analytical Center. (2024). Trends in the development of cyber incidents in industrial control systems. <https://www.infowatch.ru/sites/default/files/analytics/files/tendentsii-razvitiya-kiberintsidentov-asu-tp-za-dve-tysyachi-dvadtsat-chetyvertiy-god.pdf>
2. Verizon. (2024). The report on the investigation of data leaks for 2024. <https://www.verizon.com/business/resources/reports/2024-dbir-data-breach-investigations-report.pdf>
3. IBM. (2024). The X-Force Threat Analysis Index 2024. <https://newsletter.radensa.ru/wp-content/uploads/2024/03/IBM-XForce-Threat-Intelligence-Index-2024.pdf>
4. Kravchuk A. Yu., Kotova N. A., Anichkin I. I. (2022). Modern approaches to information security in industrial control systems. *Innovation and Investments*, № 3.
5. NIST SP 800-82. Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.800-82r2.pdf>
6. IEC 62443. Industrial communication networks – Network and system security. <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-iec-62443-series-of-standards>
7. ARinteg. (n.d.). Information security in industrial control systems. <https://arinteg.ru/solutions/zashchita-asu-tp/>
8. Dragos. (n.d.). OT Cybersecurity Year in Review. <https://www.dragos.com/blog/dragos-8th-annual-ot-cybersecurity-year-in-review-is-now-available>
9. Kaspersky ICS CERT. (n.d.). Analytical reports on threats to industrial control systems. <https://ics-cert.kaspersky.com/publications/reports/2025/09/11/threat-landscape-for-industrial-automation-systems-q2-2025/>
10. Positive Technologies. (n.d.). Industrial Cybersecurity reports. <https://ptsecurity.com/research/analytics/kiberugrozy-dlya-promyshlennosti-industrial-iot/#id6>



11. CISA. Recommended Cybersecurity Practices for Industrial Control Systems. https://www.cisa.gov/sites/default/files/publications/Cybersecurity_Best_Practices_for_Industrial_Control_Systems_508.pdf

12. JetInfo. (n.d.). Security problems of industrial networks. <https://www.jetinfo.ru/pochemu-bezopasnost-promyshlennyh-setej-na-10-let-otstaet-ot-korporativnyh-standartov/>

Гүлжанат Бекетова, PhD, қауымдастырылған профессор, Satbayev University, Алматы, Қазақстан, g.beketova@satbayev.university

Нартай Мухаметбай, магистрант, Satbayev University, Алматы, Қазақстан, nartaimuhametbai@gmail.com

Владислав Харлинский, магистрант, Satbayev University, Алматы, Қазақстан, Kharlinskiy.V@stud.satbayev.university

АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ПРОЦЕСТЕРДІ БАСҚАРУ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕ АҚПАРАТТЫҚ ҚАУІПСІЗДІК ТАЛАПТАРЫН ЕНГІЗУ МӘСЕЛЕЛЕРІ

Аңдатпа. Бұл мақалада автоматтандырылған технологиялық процестерді басқару жүйелерінде ақпараттық қауіпсіздік талаптарын енгізуге байланысты негізгі мәселелер қарастырылады. Ғылыми жарияланымдарды, халықаралық стандарттарды және салалық аналитикалық есептерді талдау, сондай-ақ автордың жеке талдауы мен практикалық тәжірибесі негізінде корпоративтік ақпараттық жүйелер үшін әзірленген ақпараттық қауіпсіздік талаптарын өнеркәсіптік ортаға тікелей көшірудің шектеулері айқындалды. Автоматтандырылған технологиялық процестерді басқару жүйелерінде архитектуралық және пайдалану ерекшеліктері, технологиялық процестердің қолжетімділігі мен үздіксіз жұмыс істеу басымдығы, сондай-ақ өнеркәсіптік жабдықтың ұзақ өмірлік циклі ақпараттық қауіпсіздік талаптарын бейімдеуді қажет ететіні көрсетілді. Ақпараттық қауіпсіздікті басқару жүйесінің қауіптерге негізделген тәсіл арқылы қауіпсіздік талаптарын бейімдеу және өнеркәсіптік жүйелерде өтемдік қорғаныс шараларын енгізу құралы ретіндегі рөлі айқындалды.

Түйінді сөздер: өнеркәсіптік басқару жүйелері (ӨБЖ), ақпараттық қауіпсіздік, операциялық технологиялардың (ОТ) киберқауіпсіздігі, тәуекелге бағдарланған тәсіл, ақпараттық қауіпсіздікті басқару жүйесі, маңызды инфрақұрылымды қорғау, қорғаныс инфрақұрылымы, ұлттық қауіпсіздік.

Гүлжанат Бекетова, PhD, ассоциированный профессор, Satbayev University, Алматы, Казахстан, g.beketova@satbayev.university



Нартай Мухаметбай, магистрант, Satbayev University, Алматы, Казахстан, nartaimuhametbai@gmail.com

Владислав Харлинский, магистрант, Satbayev University, Алматы, Қазақстан, Kharlinskiy.V@stud.satbayev.university

ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Аннотация. В статье рассматриваются ключевые проблемы внедрения требований информационной безопасности в автоматизированных системах управления технологическими процессами. На основе анализа научных публикаций, международных стандартов и отраслевых аналитических отчетов, а также авторского анализа и практического опыта выявлены ограничения прямого переноса требований информационной безопасности, разработанных для корпоративных информационных систем, в промышленную среду. Показано, что архитектурные и эксплуатационные особенности автоматизированных систем управления технологическими процессами, приоритет доступности и непрерывности технологических процессов, а также длительный жизненный цикл промышленного оборудования обуславливают необходимость адаптации требований информационной безопасности. Обоснована роль системы управления информационной безопасностью как инструмента риск-ориентированной адаптации требований безопасности и внедрения компенсирующих мер защиты в промышленных системах.

Ключевые слова: промышленные системы управления (ПСУ), информационная безопасность, кибербезопасность операционных технологий (ОТ), риск-ориентированный подход, система менеджмента информационной безопасности, защита критической инфраструктуры, оборонная инфраструктура, национальная безопасность.

Received: June 01, 2026

Peer-reviewed: June 22, 2026

Accepted: June 22, 2026



Ш.К. Кадиркулов¹, Ж.С. Оспанов¹, А.А. Анетбаев²

¹Military Institute of Land Forces named after S. Nurmagambetov,
Алматы, Казахстан

²Almaty Institute of Technology, Алматы, Казахстан

E-mail: ksh777@mail.ru

РАЗРАБОТКА Ψ -ДЕСКРИПТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ПРИВЯЗНОГО МУЛЬТИКОПТЕРА НА ОСНОВЕ МЕТОДА КЛЮЧЕВЫХ ТОЧЕК

Аннотация. В статье дается общая характеристика привязных мультикоптеров, приводятся их основные функциональные возможности, ставится задача разработки системы автономной навигации для использования в одном из сложных процессов функционирования привязных БПЛА – его посадки на землю. Для разработки системы автономной навигации предлагается использование технологии ключевых точек.

Проведен краткий обзор детекторов и дескрипторов ключевых точек. Показано, что в качестве детектора ключевых точек можно использовать детектор FAST. Однако для построения дескриптора была использована математическая модель метода Ψ -преобразований в задачах оптимизации нелинейных функций, которая легла в основу построения собственного дескриптора ключевых точек - Ψ -дескриптора.

Приведены результаты практического использования разработанного Ψ -дескриптора для решения задачи автономной навигации БПЛА. Разработанный новый метод определения ключевых точек может быть использован в системах технического зрения привязных беспилотных летательных аппаратов для решения задач посадки в качестве альтернативы штатным системам GPS.

Ключевые слова: привязной БПЛА, дескриптор, автономная навигация, ключевая точка, техническое зрение, искусственный интеллект.

Введение.

Общая характеристика привязных мультикоптеров.

В последние годы набирают популярность для гражданского и военного применения привязные мультикоптеры, или в англоязычной литературе «Tethered Drones». Привязные мультикоптеры (ПМ) — это беспилотные летательные аппараты, которые соединены с наземной станцией управления гибким кабелем (привязью).

Хотя привязные дроны ограничены кабелем питания, именно эта особенность в сочетании с искусственным интеллектом и системой

технического зрения (СТЗ) открывает для них уникальные ниши, недоступные обычным беспилотникам. Кабель обеспечивает ПМ квазипостоянное питание (время полета ограничивается лишь ресурсом двигателей и может измеряться сутками) и высокоскоростную, защищенную от помех систему управления и передачи данных. СТЗ превращает такой квадрокоптер из простого «высотного штатива для камеры» в интеллектуальный автономный центр мониторинга и аналитики. На рисунке 1 приведен общий вид привязного мультикоптера [1].

ПМ имеет следующие технические особенности:

- почти неограниченное время нахождения в воздухе: одной из больших проблем автономного квадрокоптера является система питания, в основе которой находится литий-ионный или литий-полимерный аккумулятор, запаса энергии которого хватает на 30-40 минут. ПМ получает электроэнергию от наземного источника энергии и может находиться в воздухе, пока не исчерпается механический ресурс двигателей;
- защищенный канал управления и передачи данных: управление ПМ и передача целевой информации осуществляется по медному или оптоволоконному кабелю внутри привязного кабеля.
- низкий уровень безопасности: привязной кабель ограничивает радиус полета (обычно от 50 до 150 метров), и если будет выведена из строя система питания, встроенная батарея ПМ позволит ему плавно сесть.



Рисунок 1 – Общий вид привязного мультикоптера

Одним из ключевых процессов функционирования ПМ является процесс посадки. Подавляющее большинство ПМ используют при посадке данные штатных систем GPS, однако в условиях подавления навигационных сигналов глобальных навигационных спутниковых систем надо искать альтернативные системы навигации, независимые от сигналов GPS – это является одной из главных задач этой работы.

ПМ имеет широкие функциональные возможности, основные из которых приведены в таблице 1.



Таблица 1 – Основные функциональные возможности привязных мультикоптеров

Сфера применения	Техническая спецификация	Функции
Военное дело	Непрерывный подъем ретрансляторов связи и камер над полем боя (на 50–150 метров).	Обнаружение замаскированной техники, фиксация вспышек/выстрелов, отслеживание перемещений противника, корректировка артиллерии.
Промышленный мониторинг	Длительный осмотр высоких объектов (факельные установки, градирни, ЛЭП, плотины).	Автоматическое выявление дефектов, трещин, утечек газа (в ИК-диапазоне) методами определения аномалий.
Управление агропредприятиями	Стационарный пост над полем во время посевной или сбора урожая.	Оценка плотности всходов, определение сорняков или очагов заболеваний растений на обширной территории в реальном времени.
Ликвидация ЧС и пожаротушение	Наблюдение за зоной бедствия, координация спасателей.	Сквозь дым (с помощью тепловизионной СТЗ) обнаружение очагов возгорания, прогнозирование направления распространения огня, поиск людей.

Таким образом, сочетание “неограниченной” энергии (от кабеля) и “умных глаз” системы технического зрения превращает привязной дрон из летающей камеры в полноценную роботизированную интеллектуальную систему мониторинга, способную работать автономно в режиме 24/7.

Ключевые точки в системе технического зрения привязного мультикоптера.

Одной из основных подсистем привязных мультикоптеров является система технического зрения, которая позволяет получать и распознавать цифровые изображения, полученные с цифровой камеры.

Наиболее распространенным подходом при обработке полученных камерой ПМ цифровых изображений является применение нейронных сетей, глубокого обучения и других алгоритмов искусственного интеллекта [2-6].

Из алгоритмов искусственного интеллекта наиболее часто используются сверточные нейронные сети (convolutional neuron networks - CNN) [7-11].



В последние годы начали получать большое распространение при обработке цифровых изображений методы ключевых точек (Keypoint Detection Methods) [12, 13, 14]. При обработке цифровых изображений, полученных с БПЛА, методы ключевых точек играют фундаментальную роль. Они используются для сшивания панорам (ортофотопланов), трехмерной реконструкции местности (SfM - Structure from motion), навигации в зонах без GPS/ГЛОНАСС (визуальная одометрия) и отслеживания объектов. В контексте БПЛА под методами ключевых точек понимаются алгоритмы компьютерного зрения, которые находят на изображении стабильные, уникальные и легко опознаваемые локальные особенности (углы, границы, перепады яркости) и описывают их так, чтобы их можно было сопоставить на других кадрах (даже при изменении масштаба, угла съемки или освещения).

Процесс распознавания ключевых точек обычно делится на три этапа, каждый из которых имеет свое определение:

- детектирование ключевых точек (Keypoint Detection): Алгоритмический поиск особых пикселей или областей на изображении. Ключевая точка — это точка, которая отличается от других (например, край берега, угол бордюра, одинокое дерево);

- описание ключевых точек/извлечение дескрипторов (Descriptor Extraction): Создание математического вектора (дескриптора) для каждой найденной точки. Дескриптор кодирует информацию о градиентах яркости в окрестности точки. Он должен быть инвариантен к поворотам, изменению масштаба и освещенности, что критично для БПЛА из-за постоянного крена, тангажа и изменения высоты полета;

- сопоставление точек (Keypoint Matching): Процесс поиска пар взаимно соответствующих ключевых точек на двух и более разных изображениях на основе близости их дескрипторов (например, по расстоянию Хэмминга или Евклидову расстоянию).

Приведем сравнительный анализ и отметим плюсы и минусы обработки цифровых изображений сверточными нейронными сетями и ключевыми точками.

Как уже было отмечено, обработка цифровых изображений с помощью сверточных нейронных сетей (CNN/Deep Learning) и классических методов на основе ключевых точек (Keypoints/Hand-crafted features) — это два принципиально разных подхода. Если сверточные сети «учатся» извлекать признаки сами на основе огромного количества данных, то методы ключевых точек (такие как SIFT, SURF, ORB, FAST и др.) используют строгие математические алгоритмы, заложенные разработчиками.

Приведем сравнительный анализ преимуществ и недостатков этих подходов.



1. Сверточные нейронные сети (CNN):

Плюсы:

- высокая точность в сложных задачах: CNN доминируют в семантической сегментации, классификации и детекции объектов; они способны улавливать высокоуровневые абстрактные признаки (например, контекст, текстуру, форму объекта в целом);

- автоматическое извлечение признаков (End-to-End): сеть в процессе обучения понимает, какие паттерны важны для решения конкретной задачи;

- устойчивость к вариативности данных: хорошо обученная сеть устойчива к изменению освещения, ракурса, шумам и частичному перекрытию (окклюзии) объектов;

- универсальность: одна и та же архитектура сети (например, ResNet или YOLO) может быть переобучена как на поиск дефектов на металле, так и на распознавание лиц.

Минусы:

- требовательность к ресурсам (вычислительная сложность): для обучения и работы глубоких сетей требуются мощные GPU или NPU; на «слабом железе» или микроконтроллерах запустить тяжелую сеть в реальном времени практически невозможно;

- потребность в огромных датасетах: чтобы сеть работала хорошо, нужны тысячи (или миллионы) размеченных изображений; если данных мало, сеть просто «зазубрит» их (эффект переобучения/overfitting);

- проблема «черного ящика» (отсутствие интерпретируемости): сложно математически доказать, почему сеть приняла то или иное решение - в критически важных сферах (медицина, военные системы, авиация) это огромный минус;

- длительное время обучения: процесс обучения моделей может занимать дни и недели.

2. Методы ключевых точек (Key points):

Плюсы:

- высокая скорость работы и легковесность: алгоритмы работают чрезвычайно быстро и могут выполнять вычисления в реальном времени даже на слабых процессорах (CPU) мобильных устройств, умных камер или микроконтроллеров;

- не требуют обучения и датасетов: алгоритм может работать «из коробки», ему не нужны гигабайты размеченных картинок — он просто берет два изображения и ищет на них математические соответствия;

- математическая строгость и интерпретируемость: каждый шаг (вычисление градиентов, построение гистограмм дескрипторов) прозрачен, легко понять, почему алгоритм ошибся, и скорректировать формулу или коэффициенты;

- инвариантность к геометрии: классические дескрипторы (например, SIFT) математически инвариантны к масштабированию и повороту (даже на



180°С или любой другой угол), они идеально подходят для сшивания панорам или фотограмметрии.

Минусы:

- плохо работают со сложной семантикой: ключевые точки ищут углы, перепады яркости и контрастные границы, они не понимают, что перед ними — «аэроснимок», «собака» или «человек»; если объект не имеет четких углов метод не сможет отработать;

- чувствительность к изменению света при изменении перспективы съемки (трехмерном повороте объекта) или при резком изменении теней дескрипторы точек сильно меняются, и алгоритм может потерять связь между кадрами;

- зависимость от ручной настройки: инженеру приходится вручную подбирать пороги чувствительности, фильтры шумов и параметры детектора под конкретные условия.

Можно сказать, что CNN настроены на выделение объектов, тогда как ключевые точки настроены на выделение признаков объектов.

В таблице 2 приведены основные сравнительные характеристики сверточных нейронных сетей и ключевых точек при анализе цифровых изображений.

Таблица 2 – Таблица сравнительного анализа характеристик сверточных нейронных сетей и ключевых точек

№	Критерий	Сверточные нейронные сети	Ключевые точки
1	Выявляемые ключевые признаки	Глубокие семантические признаки, контекст.	Локальные геометрические аномалии (углы, края).
2	Необходимость данных для обучения	Необходим большой размеченный датасет.	Работают на чистой математике здесь и сейчас.
3	Требования к аппаратуре	Высокие (требуется GPU/специализированные NPU).	Низкие (достаточно стандартного CPU).
4	Применение в БПЛА	Навигация, распознавание и классификация препятствий.	Одометрия, построение 3D карт в режиме реального времени, стабилизация положения БПЛА

Материалы и методы.

Обзор методов ключевых точек.

Основу распознавания особых точек на цифровом изображении составляют алгоритмы вычисления ключевых точек. Ключевые точки — это точки, которые выделяются на изображении и могут быть использованы для распознавания объектов. Методы ключевых точек играют важную роль в задачах построения 3D моделей местности, автономной навигации, обеспечивая распознавание, отслеживание и/или сопоставление объектов на сравниваемых цифровых изображениях. Эти алгоритмы могут также использоваться в различных приложениях, таких как позиционирование



робототехнических устройств, системы автоматизированного вождения автомобилей, поиск похожих изображений в Интернете, распознавание лиц, построение 3D-моделей и др.

Требования к определению ключевых точек. Для извлечения информативных признаков из цифрового изображения необходимо опираться на его локальные особенности. В качестве таких особенностей выступают ключевые (особые) точки. Под ключевой точкой понимают элемент изображения, окрестность которого существенно отличается от окрестностей других точек и может быть однозначно идентифицирована.

Обнаружение ключевых точек осуществляется с помощью специальных алгоритмов — детекторов. После обнаружения каждая точка описывается набором характеристик, называемых дескриптором.

Согласно работам [15, 16], ключевые точки должны удовлетворять следующим требованиям:

- *отличимость* — точка должна хорошо выделяться на фоне окружающих элементов и быть уникальной в пределах своей локальной области;

- *инвариантность* — обнаружение точки должно сохраняться при различных аффинных преобразованиях изображения;

- *устойчивость* — процесс выделения должен быть малочувствительным к шумам и искажениям;

- *уникальность* — помимо локальной различимости, точка должна обладать глобальной уникальностью, что позволяет корректно распознавать повторяющиеся структуры;

- *интерпретируемость* — ключевые точки должны быть пригодны для анализа соответствий между изображениями и облегчать их интерпретацию.

Процесс сопоставления изображений обычно включает три основных этапа.

На первом этапе выполняется поиск множества ключевых точек с использованием детекторов. Такие методы обеспечивают обнаружение одних и тех же характерных точек на различных изображениях объекта. Однако только детектирования недостаточно, поскольку количество найденных точек может различаться для каждого изображения. Поэтому на втором этапе для каждой найденной точки формируется дескриптор. Дескриптор представляет собой численное описание локальной области изображения, позволяющее однозначно идентифицировать точку среди множества других. Хороший дескриптор должен сохранять свою информативность при изменении масштаба, повороте и других преобразованиях изображения. Некоторые современные методы объединяют этапы детектирования и построения дескрипторов. Третий этап заключается в сравнении дескрипторов и установлении соответствий между ключевыми точками различных изображений.

Детекторы ключевых точек. Одним из основных типов особых точек являются углы. Угол представляет собой область пересечения двух или более



границ объектов. Иначе говоря, это точка, в окрестности которой интенсивность изображения изменяется сразу по нескольким направлениям.

Ключевой особенностью углов является наличие двух доминирующих направлений градиента в их окрестности, благодаря чему такие точки хорошо различимы и могут использоваться для последующего сопоставления изображений [17].

Существующие методы обнаружения ключевых точек можно разделить на три группы:

- методы, основанные на анализе интенсивности изображения;
- методы, использующие контуры объектов;
- методы, основанные на модельном представлении изображения.

Первая группа определяет особые точки непосредственно по значениям яркости пикселей. Методы второй группы выполняют поиск характерных участков на контурах объектов, например точек максимальной кривизны или пересечений контуров. Методы третьей группы используют заранее заданные модели, параметры которых подстраиваются под исследуемое изображение.

На практике наибольшее распространение получили методы, основанные на анализе интенсивности изображения, поскольку они обеспечивают хорошее соотношение между точностью и вычислительной эффективностью.

Детектор Моравеца. Детектор Моравеца является одним из первых методов обнаружения угловых точек. Его работа основана на анализе изменения яркости внутри небольшого окна при его смещении в восьми направлениях. Обычно используются окна размером 3×3 , 5×5 или 9×9 пикселей [18].

Результатом работы алгоритма является карта вероятностей, на которой точки с ненулевым откликом рассматриваются как потенциальные углы.

К недостаткам метода относятся высокая чувствительность к шумам, ограниченное количество направлений анализа и отсутствие инвариантности к повороту изображения.

Детектор Харриса. Детектор Харриса представляет собой усовершенствование метода Моравеца. В отличие от предшественника он учитывает изменения яркости по всем направлениям, что делает обнаружение углов более точным и устойчивым.

Основным преимуществом алгоритма является инвариантность к повороту изображения. Однако его эффективность снижается при значительном изменении масштаба и наличии сильного шума.

Детектор Ши–Томаси. Метод Ши–Томаси основан на детекторе Харриса и отличается способом вычисления меры отклика. Благодаря этому он обеспечивает более точное выделение угловых точек, сохраняя основные достоинства исходного подхода.

Детектор Фёрстнера. Метод Фёрстнера использует те же принципы анализа углов, что и детектор Харриса, однако предполагает явное вычисление собственных значений матрицы. Это позволяет более точно



локализовать особые точки и дополнительно обнаруживать круговые структуры.

Детектор SUSAN. Алгоритм SUSAN определяет углы на основе анализа сходства интенсивностей пикселей внутри круговой области фиксированного радиуса [19].

Для каждого пикселя формируется область сравнения, где соседние точки разделяются на похожие и непохожие относительно центрального пикселя. Углы соответствуют областям, в которых доля похожих пикселей достигает локального минимума. Для повышения устойчивости алгоритма пикселям, расположенным ближе к центру области, назначаются большие весовые коэффициенты.

Детектор FAST. Принцип функционирования детектора FAST отличается от ранее рассмотренных методов обнаружения особых точек. Его работа основана на анализе яркостей пикселей, расположенных на окружности вокруг исследуемой точки-кандидата P . Для этого используется окружность, состоящая из 16 пикселей, построенная по алгоритму Брезенхема [20].

Точка P признаётся угловой, если на данной окружности существует не менее N последовательных соседних пикселей, яркость которых либо превышает значение $(I + t)$, либо оказывается меньше значения $(I - t)$, где (I) — интенсивность центральной точки P , а (t) — заданный порог яркости.

Для повышения скорости вычислений сначала выполняется предварительная проверка четырёх пикселей окружности с номерами 1, 5, 9 и 13, расположенных по вертикали и горизонтали относительно точки P . Если как минимум три из них удовлетворяют условию $(I_i > I + t)$ или $(I_i < I - t)$, проводится полный анализ всех 16 пикселей окружности. В противном случае точка сразу отбрасывается как не являющаяся угловой. Экспериментально установлено, что минимальное значение параметра N , обеспечивающее устойчивое обнаружение особых точек, равно 9.

Алгоритм работы детектора FAST включает следующие этапы:

- 1) Выбирается пиксель изображения (p) , для которого определяется принадлежность к особым точкам. Его яркость обозначается как (I_p) .
- 2) Задаётся пороговое значение (t) .
- 3) Рассматривается окружность из 16 пикселей вокруг точки (p) .
- 4) Точка считается угловой, если на окружности присутствует не менее (n) последовательных пикселей, яркость каждого из которых больше $(I_p + t)$ либо меньше $(I_p - t)$. На практике параметр (n) обычно принимается равным 12.

Исследования показали, что устойчивое обнаружение угловых точек начинается уже при $(n = 9)$. Высокая производительность алгоритма достигается благодаря предварительной проверке только четырёх пикселей окружности. Полный анализ оставшихся двенадцати пикселей выполняется лишь для тех кандидатов, которые успешно проходят начальный тест. В противном случае алгоритм переходит к следующей точке изображения.

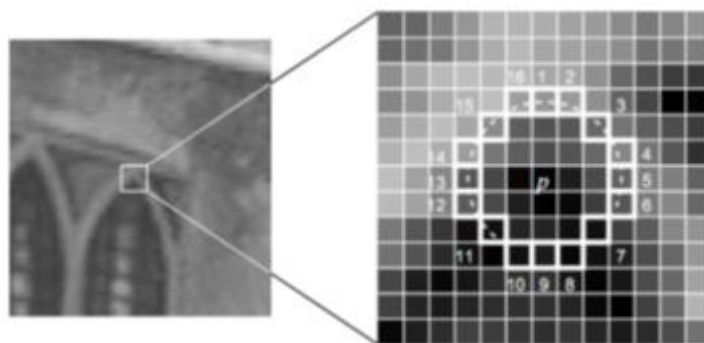


Рисунок 2 – Графическое отображение алгоритма FAST

Несмотря на высокую скорость работы, детектор FAST имеет ряд ограничений. В частности, его эффективность зависит от порядка обработки изображения и характера распределения яркостей пикселей. Кроме того, в пределах небольшой области изображения может быть обнаружено несколько близко расположенных особых точек, что приводит к появлению избыточных срабатываний.

Детектор SIFT. Метод SIFT был разработан для обеспечения устойчивости к изменению масштаба изображения. В его основе лежит построение пирамид Гаусса и разностей гауссианов, позволяющих выявлять характерные точки на различных уровнях масштабирования [21].

Преимуществами SIFT являются инвариантность к повороту, смещению и частичная устойчивость к изменениям масштаба, освещения и положения камеры. Основным недостатком считается высокая вычислительная сложность.

Детектор SURF. SURF является развитием идей SIFT и ориентирован на повышение производительности. Метод использует прямоугольные фильтры для приближения гауссового сглаживания и интегральные изображения, что существенно ускоряет вычисления.

Для поиска ключевых точек применяется детектор на основе матрицы Гессе. Точки выбираются по максимальному значению её определителя, который характеризует локальные изменения изображения.

Детектор BRISK. Метод BRISK был разработан как быстрый алгоритм, устойчивый к изменению масштаба. Он базируется на детекторе AGAST, являющемся развитием FAST.

В отличие от FAST, поиск особых точек выполняется не только на исходном изображении, но и в масштабном пространстве, представленном набором октав. После обнаружения кандидатов осуществляется поиск локальных максимумов во всём пространстве масштабов.

Дескрипторы ключевых точек. После обнаружения ключевых точек необходимо сформировать их описания — дескрипторы. Дескриптор представляет собой набор числовых характеристик, позволяющих отличать

одну особую точку от другой и устанавливать соответствия между изображениями [23, 24, 25].

Типовой процесс сопоставления включает следующие этапы:

- обнаружение ключевых точек;
- определение локальных областей вокруг них;
- нормализацию выделенных областей;
- вычисление дескрипторов;
- сопоставление полученных дескрипторов.

Эффективность алгоритмов сопоставления зависит как от качества обнаруженных точек, так и от выбранного способа их описания.

Дескриптор BRIEF. BRIEF представляет собой компактный бинарный дескриптор, основанный на сравнении интенсивностей пар пикселей внутри локальной области изображения.

Каждая ключевая точка кодируется бинарным вектором длиной от 128 до 512 бит. Благодаря простоте вычислений BRIEF обеспечивает высокую скорость работы, однако отличается чувствительностью к шумам и поворотам изображения [26, 27].

Дескриптор ORB. ORB является усовершенствованной версией BRIEF. Для поиска ключевых точек используется FAST, дополненный механизмом определения ориентации.

Основными преимуществами ORB являются высокая скорость работы, устойчивость к повороту изображения и низкие вычислительные затраты [28, 29].

Дескриптор SIFT. Дескриптор SIFT строится на основе локальных градиентов изображения и обладает высокой устойчивостью к изменениям масштаба, поворотам и частичным перекрытиям объектов.

Метод использует многомасштабное представление изображения, сформированное с помощью пирамиды Гаусса, что позволяет эффективно работать с объектами различного размера.

Дескриптор SURF. Работа SURF включает два этапа: обнаружение ключевых точек и их описание. Для ускорения вычислений используются интегральные изображения и приближённая матрица Гессе.

Интегральное представление позволяет быстро вычислять суммы яркостей внутри прямоугольных областей, что значительно повышает производительность алгоритма по сравнению с SIFT [30].

Выводы. Сравнение детекторов ключевых точек обычно проводится по двум основным критериям: качеству обнаружения и скорости работы.

Детектор Харриса обеспечивает хорошую устойчивость к поворотам и шумам при достаточно высокой скорости обработки. Он особенно эффективен для изображений с выраженными угловыми структурами, однако плохо справляется с масштабными изменениями.

Метод Ши–Томаси обеспечивает более высокую точность обнаружения по сравнению с Харрисом, но требует больших вычислительных затрат. Поэтому он предпочтителен в задачах, где точность важнее скорости.



Детектор FAST отличается чрезвычайно высокой производительностью и подходит для обработки видеопотока в режиме реального времени. Несмотря на меньшую точность и чувствительность к шуму, он широко применяется в системах слежения за объектами и задачах компьютерного зрения, требующих высокой скорости обработки.

С точки зрения качества детектирования, т.е. количество выявляемых ключевых точек, наилучшими детекторами являются SIFT и SURF. Однако следует отметить, что эти два детектора обладая хорошим качеством детектирования, имеют относительно невысокую скорость работы, что критично для систем реального времени, к которым относится система автономной навигации. Кроме того, эти два метода запатентованы, и для их использования требуется разрешение и необходимость финансовых отчислений при их использовании.

Наиболее скоростными детекторами являются FAST и BRISK. BRISK обладает неплохим качеством и хорошей скоростью детектирования. Обладая почти всеми недостатками детектора FAST, для качественной работы детектора BRISK требуются цифровые изображения большого разрешения, что в реалиях подготовки цифровых изображений в военной обстановке достаточно затруднительно.

Поэтому для использования детекторов в системе технического зрения остановимся на детекторе FAST, который обладает наиболее оптимальными характеристиками для решения задачи нахождения ключевых точек в режиме реального времени на цифровых изображениях разного качества: самая высокая скорость среди современных детекторов и достаточно неплохое качество. Предварительные исследования детектора FAST показали, что количество выявляемых ключевых точек даже при низком качестве детектирования очень большое, и зачастую приходится прибегать к процедуре децимации, т.е. удаление из выявленного количества излишних ключевых точек. Поэтому в качестве детектора далее будем использовать детектор FAST.

Проведем анализ рассмотренных алгоритмов дескрипторов. Дескриптор BRIEF является быстрым дескриптором, который может хорошо дополнять детектор FAST. Однако необходимо отметить, что дескриптор BRIEF неэффективно осуществляет выбор точек для расчёта дескриптора и имеет плохую устойчивость к вращению при распознавании изображений.

Дескриптор ORB является улучшенной версией дескриптора BRIEF и имеет большую устойчивость к вращению при распознавании изображений, однако имеет низкую скорость.

Алгоритм SIFT обладает рядом преимуществ, таких как инвариантность к поворотам, смещению, а также частичная инвариантность к изменению масштаба, яркости и положения камеры, однако также имеет невысокую скорость работы алгоритма.



Дескриптор SURF является одним из лучших дескрипторов ключевых точек, однако ввиду сложности реализации алгоритма, имеет низкую скорость выполнения.

При этом алгоритмы SIFT и SURF запатентованы, и для их использования требуется разрешение и необходимость финансовых отчислений при их использовании.

Исходя из этого можно сделать следующие выводы.

Для детектирования ключевых точек в режиме реального времени с частотой выдачи информации не менее 1Гц может быть использован детектор FAST с некоторой его модификацией, в частности с возможностью децимации излишнего количества ключевых точек, при этом можно ставить задачу оптимальной в некотором смысле децимации.

Что касается дескрипторов, то ситуация здесь более сложная. Проведенный анализ дескрипторов показал, что относительно быстрые дескрипторы BRIEF и ORB имеют некоторые проблемы с инвариантностью к вращениям [31]. С точки зрения системы компьютерного зрения это означает следующее. Как правило, берется базовое цифровое изображение при каком-то фиксированном угловом положении, и для этого положения вычисляются детекторы и дескрипторы. Повернем наше изображение на некоторый угол. Если для детекторов вращение не сильно изменяет его характеристики, то дескриптор для первоначального углового положения может сильно отличаться от повернутого на некоторый угол. Проблема определения ключевых точек при вращении означает, что одна и та же ключевая точка не всегда однозначно обнаруживается в разных версиях одной и той же сцены, т.е. различные ракурсы и перспективы цифрового изображения могут затруднить поддержание неизменности обнаруженных ключевых точек. Поэтому рассмотренные дескрипторы ключевых точек либо не подходят по ограничениям на вращение (БПЛА может подлететь к заданной точке с любой стороны), либо по скорости вычислений.

Поэтому стоит задача - для успешного функционирования системы автономной навигации с использованием ключевых точек необходима разработка дескриптора, инвариантного относительно освещения, масштаба и вращения, и кроме того, обладающего высокой скоростью вычислений.

1. Основные формулы и используемые методы.

Метод Ψ -преобразований в задачах оптимизации нелинейных функций.

Пусть задана целевая нелинейная функция $F(x)$ в N -мерном пространстве. Рассмотрим случай, когда целевая функция многоэкстремальная и терпит разрывы первого рода [32].

Пусть E - некоторое измеримое множество из пространства R^N , и $F(x)$ - некоторая функция класса $L_p(E)$. Обозначим:

$$E_{\zeta}^* = \{x : x \in E, F(x) \geq \zeta\}. \quad (1)$$

При $\zeta=0$ будем иметь:

$$E_0^* = \{x : x \in E, F(x) \geq 0\}. \quad (2)$$



Пусть функция $F(x)$ принимает только положительные значения, тогда

$$E = E_0^* \text{ и } E \setminus E_0^* = \bar{E}_0 = \emptyset. \text{ Для } \zeta > 0: \\ E \setminus E_\zeta^* = \bar{E}_\zeta, \quad (3)$$

где

$$E_\zeta^* = \{x : x \in E, F(x) < \zeta\}.$$

Обозначим теперь через $m(E)$ меру множества E , а мерами множеств E_ζ^* и $\bar{E}_\zeta$ соответственно $m(E_\zeta^*)$ и $m(\bar{E}_\zeta)$.

Определим функцию:

$$\Psi(\zeta) = m(E_\zeta^*). \quad (4)$$

Нетрудно видеть, что:

$$\Psi(\zeta) = m(E_\zeta^*) = (L) \int \dots \int_E \theta_\zeta(x_1, \dots, x_N) dx_1 \dots dx_N, \quad (5)$$

где $\int \theta_\zeta(x_1, \dots, x_N)$ является характеристической функцией:

$$\theta_\zeta(x_1, \dots, x_N) = \begin{cases} 1 \text{ на } E_\zeta^*, \\ 0 \text{ на } E \setminus E_\zeta^*. \end{cases} \quad (6)$$

Произведем теперь Лебегово разбиение функции $F(x)$. Для этого интервал изменения функции $F(x)$ разделим на ряд подинтервалов:

$$0 = \zeta_0 < \zeta_1 < \dots < \zeta_\nu < \dots < \zeta^* = \max F(x). \quad (7)$$

Далее будем считать, что задачей является нахождение максимума $F(x)$. Для каждого значения ζ_ν можно записать:

$$\Psi(\zeta_\nu) = (L) \int \dots \int_E \theta_\nu(x_1, \dots, x_N) dx_1 \dots dx_N. \quad (8)$$

Рассмотрим теперь некоторые свойства множеств, образуемых в результате подобного Лебегова разбиения. Как уже отмечалось, рассматриваются функции класса $L_p(E)$, определенные на множестве E .

Пусть функция $F(x)$ такова, что множество E можно разбить на ряд связанных подмножеств e_{0i} ($i=1, \dots, \nu$), так что на каждом из подмножеств e_{0i} функция $F(x)$ была бы выпуклой. Обозначим $e_{\nu i}^* \subset e_i$ множество, на котором $F(x) \geq \zeta_\nu$.

Для случая $N=2$ вышесказанное можно проиллюстрировать следующим рисунком:

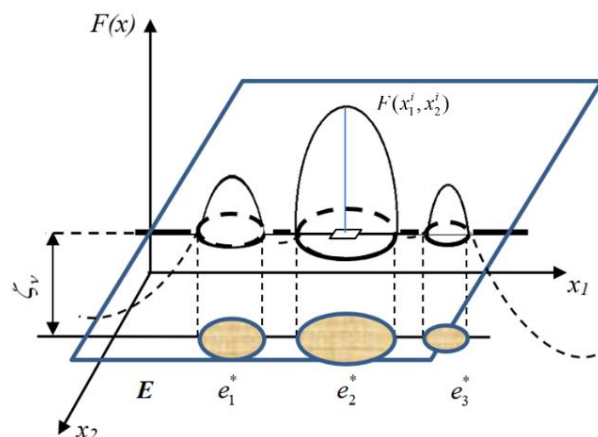


Рисунок 3 – Графическая 3D интерпретация разбиения функции $F(x)$ на подинтервалы

На рисунке 4 представим принцип формирования функции $\Psi(\zeta_\nu)$.

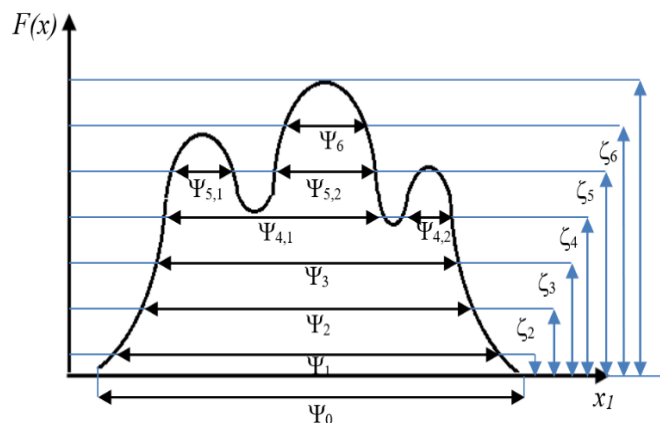


Рисунок 4 – Проекция функции $F(x)$ на плоскость $F0x_1$

После того, как согласно рисунку 4 вычислены значения $\Psi(\zeta_\nu)$, построим зависимость функции $\Psi(\zeta_\nu)$ от переменной ζ_ν , которая показана на рисунке 5.

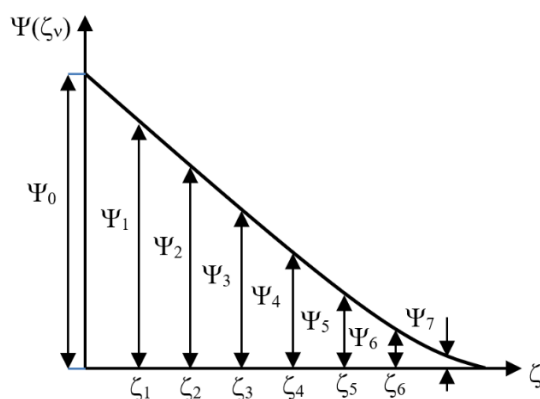


Рисунок 5 - Зависимость функции $\Psi(\zeta_\nu)$ от переменной ζ_ν



По сути, рисунок 5 показывает основную идею метода Ψ -преобразований в задачах оптимизации нелинейных функций заключающуюся в том, что поиск глобального экстремума сводится к разбиению исследуемой функции $F(x)$ на уровни, для каждого уровня вычисляется функция $\Psi(\zeta_v)$ и строится зависимость этой функции от ζ_v , позволяющая в конечном итоге выйти в область глобального экстремума исследуемой функции.

Математическая модель Ψ -дескриптора для описания найденных ключевых точек.

Рассмотрим рисунок 2, на котором показан алгоритм выявления ключевых точек на основе детектора FAST. Детектор FAST выявляет такие пиксели, яркость которых превышает заданную величину порога яркости (или яркость которых находится ниже на величину порога яркости), т.е. рассматривает пиксели, находящиеся на окружности радиуса 3, яркость которых ниже яркости центрального пикселя на величину порога яркости. Если построить 3D модель функции $F(x_1^i, x_2^i)$, где i – это i -й пиксель цифрового изображения, имеющий координаты (x_1^i, x_2^i) , то получим картину, практически совпадающую с рисунком 3, где в качестве ключевой определена точка (x_1^i, x_2^i) яркость которой:

$$F_i = F(x_1^i, x_2^i). \quad (9)$$

Учитывая, что вокруг выявленной ключевой точки была построена окружность радиуса 3, определим максимальный радиус R_N , и вокруг выявленной ключевой точки построим последовательность окружностей с радиусами R такими, что:

$$R \in [1, R_N] \quad (10)$$

т.е. R принимает значения: 1, 2, ..., R_N . Для каждого значения радиуса R_i введем функцию меры Ψ_i следующим образом:

$$\Psi_i = \frac{\int_0^{2\pi} I(\varphi) R_i d\varphi}{\int_0^{2\pi} R_i d\varphi}, \quad (11)$$

где $I(\varphi)$ - интенсивность (яркость) точки на окружности. Учитывая, что $\int_0^{2\pi} R_i d\varphi = 2\pi R_i$, получим меру интенсивности окружности радиуса R_i цифрового изображения с центром в ключевой точке:

$$\Psi_i = \frac{1}{2\pi R_i} \int_0^{2\pi} I(\varphi) R_i d\varphi. \quad (12)$$



Отметим, что данная мера не зависит от угла поворота изображения, положения камеры. Учитывая, что изображение предварительно переводится в серые цвета, то яркость не будет влиять на данную меру.

Касательно масштаба можно отметить следующее: как было указано выше, мы определили, что целевая функция многоэкстремальная и терпит разрывы первого рода. Это говорит о том, что, изменяя масштаб изображения, обобщенная интенсивность окружности радиуса R_i , определяемая формулой (12), естественно изменится. Однако можно построить изменения меры интенсивности в зависимости от масштаба – тогда проблема масштаба может быть также решена. Однако это задача другого исследования и в этой статье это решение не будет исследовано.

Таким образом, мера интенсивности на расстоянии R_i от ключевой точки может быть использована для описания ключевой точки и положена в основу формирования вектора дескриптора.

Определим максимальное расстояние от ключевой точки, т.е. для определенности R пробегает значения от 1 до N . Для каждого $i=1, \dots, N$ вычислим меру интенсивности по формуле (12). Добавим к данному вектору еще один элемент, который может быть вычислен по следующей формуле:

$$\psi = \frac{1}{N} \int_{R_N} \psi_i(R) dR. \quad (13)$$

Неотъемлемой частью дескриптора должны быть также координаты ключевой точки (X, Y, Z) . Таким образом, предлагаемый дескриптор для ключевой точки будет описываться формулами (12), (13) и координатами (X, Y, Z) . Учитывая, что цифровое изображение дискретно, определим дискретный аналог формул (12) и (13). Для определенности положим $N=7$, длину окружности, нарисованную по алгоритму Брезенхама, заменим на количество пикселей, ее составляющих. Тогда формула (12) будет иметь следующий вид:

$$\psi_i = \frac{\sum_{j=1}^{K_i} I_j}{K_i}. \quad (14)$$

Формула (13) будет иметь вид:

$$\psi = \frac{\sum_{i=1}^N \psi_i}{N}. \quad (15)$$

Тогда при $N=7$ дескриптор ключевой точки будет описан следующим вектором из 8 компонентов:

$$D = (\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4, \psi_5, \psi_6, \psi_7, \psi, X, Y, Z). \quad (16)$$

Таким образом, для описания ключевых точек цифрового изображения, полученных методом FAST, можно использовать Ψ -дескриптор (16), который устойчив к поворотам и освещению.

Результаты и обсуждение.

Технические характеристики БПЛА с автономной системой навигации, построенной на основе ключевых точек с детектором FAST и Ψ -дескриптором

По разработанному техническому проекту был изготовлен беспилотный летательный аппарат на базе квадрокоптера с автономной системой навигации (рисунок 6).



Рисунок 6 – Общий вид экспериментального образца БПЛА с высокой детализацией: рама, шасси, полетный контроллер, штатная система навигации БПЛА, система связи и управления, полезная нагрузка (автономная система навигации)

На рисунке 7 показан момент проведения летных испытаний экспериментального образца БПЛА с автономной системой навигации (АСН) в качестве полезной нагрузки.

Основой АСН является одноплатное вычислительное устройство Mini PC Stick by AWOW, имеющий основные технические характеристики, представленные в таблице 1.

Таблица 1-Основные технические характеристики Mini PC Stick by AWOW

№	Характеристики	Параметры характеристики
1	Процессор	Intel Atom 1.44 GHz
2	Графика, графический интерфейс	Intel HD Graphics 400, HDMI 2.0
3	Интерфейс	2×USB
4	ОЗУ	4 GB
5	Операционная система	Windows 10
6	Габариты, см	12,1×3,6×1,19
7	Вес, грамм	63,5



Рисунок 7 - Летные испытания экспериментального образца БПЛА с автономной системой навигации на сборочном полигоне

Общий вид экспериментального образца автономной системы навигации с открытой крышкой корпуса показан на рисунке 8.



Рисунок 8 - Общий вид экспериментального образца автономной системы навигации с открытой крышкой корпуса



Рисунок 9 - Mini PC Stick by AWOW

На рисунке 9 показан используемый в АСН Mini PC Stick by AWOW.

В качестве фотокамеры была использована веб-камера Logitech C270 HD, характеристики которой приведены в таблице 2, и показанная на рисунке 10.



Рисунок 10 - Веб-камера Logitech C270 HD

Таблица 2 – Основные технические характеристики веб-камеры Logitech C270 HD

№	Характеристики	Параметры характеристики
1	Тип	Веб-камера
2	Общее количество пикселей	3 Мпикс
3	Стандартное разрешение	1280×780
4	Максимальное разрешение	2048×1536
5	Интерфейс	USB

В качестве источника питания используется внешний аккумулятор (Power Bank) Xiaomi Integrated Cable, показанный на рисунке 11.



Рисунок 11 - Внешний аккумулятор (Power Bank) Xiaomi Integrated Cable

Внешний аккумулятор (Power Bank) Xiaomi Integrated Cable имеет следующие основные технические характеристики: емкость, мА*час – 10000; выходные интерфейсы USB, USB Type C; максимальный выходной ток 3А; литий-полимерный тип аккумулятора; размеры 147,8 x 73,9 x 15,3 мм.

Результаты проведения испытаний экспериментального образца БПЛА с автономной системой навигации, построенной на основе ключевых точек с детектором FAST и Ψ -дескриптором

На базе математической модели Ψ -дескриптора (9)-(16) был разработан комплекс UML-диаграмм [33], разработано программное обеспечение, составляющее основу автономной системы навигации. Были разработаны программа и методика испытаний, проведены испытаний автономной системы навигации, построенной на основе ключевых точек с детектором FAST и Ψ -дескриптором в рамках этой ПМИ.

В соответствии с ПМИ проведения испытаний экспериментального образца БПЛА с автономной системой навигации были выполнены следующие работы:

- предварительно с БПЛА было сделано 320 цифровых кадров района действий БПЛА – района испытаний, которые были объединены в единый ортофотоплан на программе Agisoft Metashape Professional, координаты углов которого имеют следующие координаты $\lambda_{\min}=76.7020$; $\lambda_{\max}=76.7316$; $\varphi_{\min}=43.1812$; $\varphi_{\max}=43.2027$.

- полученное базовое цифровое изображение было обработано на программном исполняемом модуле «Подготовка цифрового изображения к моделированию»;

- в результате обработки базового цифрового изображения в модуле «preparationMapOfEarth.exe» получены ключевые точки и вычислены их дескрипторы;

- определен маршрут движения экспериментального образца БПЛА с автономной системой навигации;

- была осуществлена предполетная подготовка экспериментального образца БПЛА с автономной системой навигации: в систему управления

БПЛА введены контрольные точки маршрута движения, в автономную систему навигации время начала съемок и частоту выполнения съемок;

– запущен экспериментальный образец БПЛА, который пролетел по заданному маршруту через контрольные точки, и запущена на выполнение автономная система навигации на базе технологии Key Point с детектором FAST и Ψ -дескриптором, которая независимо от штатных систем БПЛА выполнила цифровую съемку в нади́р и осуществила обработку полученных цифровых изображений;

– пролетев по заданному маршруту, БПЛА вернулся к месту запуска.

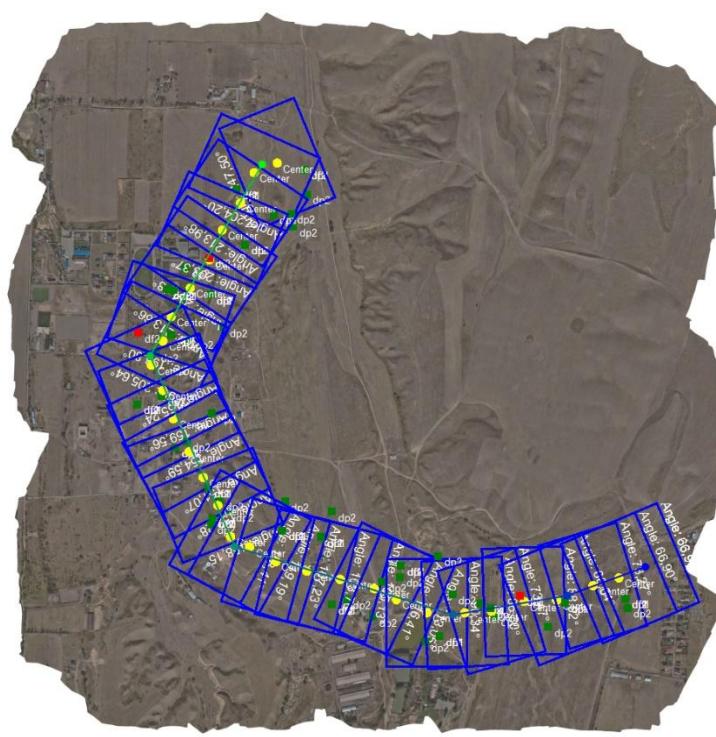


Рисунок 12 – Базовое цифровое изображения района действий БПЛА в нанесенным на него изображениями кадров с нанесенными двумя ключевыми точками

На рисунке 12 показана карта полета с нанесенными на нее изображениями кадров, которые был сняты автономной системой навигации. На каждом снятом кадре АСН определила две ключевые точки, которые позволили определить координаты текущего положения БПЛА.

Сравнительный анализ точности определения координат текущего положения БПЛА штатными средствами GPS и АСН показал, что точность определения координат текущего положения БПЛА АСН сравнима с точностными характеристиками штатного GPS приемника, при этом ошибка АСН не выходит за рамки стандартных ошибок GNSS-приемников 6-7 метров.



Выводы.

1. Анализ методов и алгоритмов решения задач автономной навигации с использованием методов искусственного интеллекта показал, что наиболее подходящими с точки зрения точности, алгоритмической сложности, подготовки данных и требований к техническому обеспечению являются методы и алгоритмы с использованием ключевых точек.

2. На основе метода Ψ -преобразований разработана математическая модель описания найденных ключевых точек Ψ -дескриптор.

3. Разработанный метод описания ключевых точек Ψ -дескриптор является новым и позволяет находить ключевые точки не зависимо от ориентации цифрового изображения и по этому свойству сопоставим с традиционными методами описания ключевых точек.

4. Проведенные испытания автономной системы навигации показали высокую точность определения координат с использованием метода ключевых точек с FAST-детектором и Ψ -дескриптором.

5. Разработанный новый метод определения ключевых точек может быть использован в системах технического зрения привязных беспилотных летательных аппаратов для решения задач посадки в качестве альтернативы штатным систем GPS.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках грантового финансирования Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по проекту ИРН AP23489996 «Разработка опытного образца привязной высотной мультиротаторной системы для обеспечения ведения боевых действий»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Leading Global Suppliers. Tethered Drones. [Электронный ресурс]: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/expo/tethered-drones-uavs/> (дата обращения: 01.06.2026).

2. Kai Zhang, Wangmeng Zuo, Yunjin Chen, Deyu Meng, Lei Zhang. Beyond a Gaussian Denoiser: Residual Learning of Deep CNN for Image Denoising. IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 26, No. 7, pp. 3142-3155. 2017. 10.1109/TIP.2017.2662206

3. Chao Dong, Chen Change Loy, Kaiming He, Xiaoou Tang. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 38, No. 2, pp. 295-307. 2016. 10.1109/TPAMI.2015.2439281.

4. Olaf Ronneberger, Philipp Fischer, Thomas Brox. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 9351, pp. 234-241. Springer, Cham. 10.1007/978-3-319-24574-4_28



5. Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 770-778. 2016. 10.1109/CVPR.2016.90
6. R. Archana, P. S. Eliahim Jeevaraj. Deep learning models for digital image processing: a review. Artificial Intelligence Review, Vol. 57, Article number 11. 2024. 10.1007/s10462-023-10631-z
7. Milos Radovic, Offir Adato, Natan S. Kopeika, Roman Bligh. Object Recognition in Aerial Images Using Convolutional Neural Networks. Journal of Imaging, Vol. 3, No. 2, Article 21. 2017. 10.3390/jimaging3020021
8. Andy Couturier, Moulay A. Akhloufi. Convolutional neural networks and particle filter for UAV localization. Proceedings of SPIE 11758, Real-Time Image Processing and Deep Learning 2021, 117580G. 2021. 10.1117/12.2585986
9. Gengyu Wang, Xianping Fu. A Convolutional Neural Network Image Compression Algorithm for UAVs. Journal of Circuits, Systems and Computers, Vol. 33, No. 12, Article 2450211. 2024. 10.1142/S0218126624502116.
10. Radoki S. M. M., Akhloufi M. A., Couturier A. Drone Model Classification Using Convolutional Neural Network Trained on Synthetic Data. Journal of Imaging, Vol. 8, No. 8, Article 218. 2022. 10.3390/jimaging8080218.
11. (5) Gabriel Silva de Oliveira, José Marcato Junior, Caio Polidoro, Wesley Gonçalves, Mateus Santos, Edson Matsubara, et al. Convolutional Neural Networks to Estimate Dry Matter Yield in a Guinea Grass Breeding Program Using UAV Remote Sensing. Sensors, Vol. 21, No. 12, Article 3971. 2021. 10.3390/s21123971.
12. Chunyuan Cui, Juntong Fan, Xuanyao Zhao, Jianing Song, Leyuan Sun. An Improved ORB-SLAM3 System for UAV Localization and Mapping in GPS-Denied Environments. Drones, Vol. 8, No. 4, Article 132. 2024. 10.3390/drones8040132.
13. Muhammad Aamir, Zhao Jianqiang, Muhammad Ali, Saeed Ahmed, Muhammad Irfan. An Automated UAV Image Stitching Approach Based on Improved SIFT Features. IEEE Access, Vol. 9, pp. 62451-62461. 2021. 10.1109/ACCESS.2021.3073981.
14. Runwei Guan, Jinrong Hu, Yifei Huang, Liting Sun, Paolo Santi, Carlo Ratti. Deep Learning-Based Keypoint Detection and Matching for UAV Thermal Images. Remote Sensing, Vol. 15, No. 18, Article 4429. 2023. 10.3390/rs15184429
15. Rodehorst V., Koschan A. Comparison and evaluation of feature point detectors, 2006
16. Tinne Tuytelaars, Krystian Mikolajczyk. Local Invariant Feature Detectors: A Survey, 2008
17. Детектор Kitchen-Rosenfeld. L. Kitchen and A. Rosenfeld. Gray Level Corner Detection. Pattern Recognition Letters, pp. 95-102, 1982
18. Moravec, H. Rover visual obstacle avoidance // In International Joint Conference on Artificial Intelligence, Vancouver, Canada, 1981, pp. 785-790.



19. Детектор COP (Crosses as Oriented Pair). S.C. Bae, I.S. Kweon and C.D. Yoo. COP: a new corner detector. Pattern Recogn. Lett. 2002
20. E. R. a. T. Drummond. Fusing Points and Lines for High Performance Tracking, 2005
21. David G. Lowe. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, 2004
22. Шакенов А.К. Сравнение детекторов особых точек изображений и оценка их статистических характеристик. Журнал “Автометрия”, 2021. Т.57, №1
23. Клейнберг Дж., Тардос Е. Алгоритмы: разработка и применение. Классика Computers Science / Пер. с англ. Е. Матвеева. – СПб.: Питер, 2016. – 800 с
24. Системы компьютерного зрения: современные задачи и методы [Электронный ресурс]/Режим доступа: <http://controleng.ru/innovatsii/sistemy-komp-yuternogo-zreniya-sovremenny-e-zadachi-metody/>(дата обращения: 01.06.2025)
25. Паттерн посредник [Электронный ресурс]/Режим доступа: <https://refactoring.guru/ru/design-patterns/mediator>; A tutorial on binary descriptors [Электронный ресурс]/Режим доступа: <https://gilscvblog.com/2013/10/04/a-tutorial-on-binary-descriptors-part-3-the-orb-descriptor/> (дата обращения: 01.06.2025)
26. Just look at the image: viewpoint-specific surface normal prediction for improved multi-view reconstruction [Электронный ресурс]/Режим доступа: https://www.cv-foundation.org/openaccess/content_cvpr_2016/papers/Galliani_Just_Look_at_CVP_R_2016_paper.pdf (дата обращения: 16.04.2025)
27. James L. Pro JavaFX 2/ L. James, G. Weiqi, C. Stephen, I. Dean, V. Johan. – Apress, 2012. – 641 p.
28. Feature detection and description [Электронный ресурс]/Режим доступа: https://docs.opencv.org/3.0-beta/doc/py_tutorials/py_feature2d/py_table_of_contents_feature2d/py_table_of_contents_feature2d.html (дата обращения: 16.04.2025)
29. ORB: Oriented FAST and Rotated BRIEF [Электронный ресурс]/Режим доступа: http://www.willowgarage.com/sites/default/files/orb_final.pdf (дата обращения: 16.04.2025)
30. Introduction to SURF [Электронный ресурс]/Режим доступа: https://docs.opencv.org/3.0-beta/doc/py_tutorials/py_feature2d/py_surf_intro/py_surf_intro.html (дата обращения: 16.04.2025)
31. What is KeyPoint Detection? [Электронный ресурс]/Режим доступа: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.ead253e4-67ff9724-ab1a850e-74722d776562/https/www.geeksforgeeks.org/what-is-keypoint-detection/ (дата обращения: 16.04.2025)



32. Чичинадзе В.К. Решение невыпуклых нелинейных задач оптимизации. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1983. – 256 с.

33. Кадиркулов Ш.К., Оспанов Ж.Ш., Бекмурзаев Б.Ж., Бекмухамедов Б.Э., Анетбаев А.А. Объектно-ориентированное моделирование с использованием диаграмм UML для разработки имитационной модели автономной системы навигации БПЛА. Научные труды военно-инженерного института радиоэлектроники и связи. Военный научно-технический журнал. №3 (65), 2026 г.

REFERENCES

1. Leading Global Suppliers. Tethered Drones. [Электронный ресурс]: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/expo/tethered-drones-uavs/> (accessed: 01.06.2026).

2. Kai Zhang, Wangmeng Zuo, Yunjin Chen, Deyu Meng, Lei Zhang. Beyond a Gaussian Denoiser: Residual Learning of Deep CNN for Image Denoising. IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 26, No. 7, pp. 3142-3155. 2017. 10.1109/TIP.2017.2662206

3. Chao Dong, Chen Change Loy, Kaiming He, Xiaoou Tang. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 38, No. 2, pp. 295-307. 2016. 10.1109/TPAMI.2015.2439281.

4. Olaf Ronneberger, Philipp Fischer, Thomas Brox. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 9351, pp. 234-241. Springer, Cham. 10.1007/978-3-319-24574-4_28

5. Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 770-778. 2016. 10.1109/CVPR.2016.90

6. R. Archana, P. S. Eliahim Jeevaraj. Deep learning models for digital image processing: a review. Artificial Intelligence Review, Vol. 57, Article number 11. 2024. 10.1007/s10462-023-10631-z.

7. Milos Radovic, Offir Adato, Natan S. Kopeika, Roman Bligh. Object Recognition in Aerial Images Using Convolutional Neural Networks. Journal of Imaging, Vol. 3, No. 2, Article 21. 2017. 10.3390/jimaging3020021

8. Andy Couturier, Moulay A. Akhloufi. Convolutional neural networks and particle filter for UAV localization. Proceedings of SPIE 11758, Real-Time Image Processing and Deep Learning 2021, 117580G. 2021. 10.1117/12.2585986

9. Gengyu Wang, Xianping Fu. A Convolutional Neural Network Image Compression Algorithm for UAVs. Journal of Circuits, Systems and Computers, Vol. 33, No. 12, Article 2450211. 2024. 10.1142/S0218126624502116.

10. Radoki S. M. M., Akhloufi M. A., Couturier A. Drone Model Classification Using Convolutional Neural Network Trained on Synthetic Data. Journal of Imaging, Vol. 8, No. 8, Article 218. 2022. 10.3390/jimaging8080218.



11. (5) Gabriel Silva de Oliveira, José Marcato Junior, Caio Polidoro, Wesley Gonçalves, Mateus Santos, Edson Matsubara, et al. Convolutional Neural Networks to Estimate Dry Matter Yield in a Guineagrass Breeding Program Using UAV Remote Sensing. *Sensors*, Vol. 21, No. 12, Article 3971. 2021. 10.3390/s21123971.
12. Chunyuan Cui, Juntong Fan, Xuanyao Zhao, Jianing Song, Leyuan Sun. An Improved ORB-SLAM3 System for UAV Localization and Mapping in GPS-Denied Environments. *Drones*, Vol. 8, No. 4, Article 132. 2024. 10.3390/drones8040132.
13. Muhammad Aamir, Zhao Jianqiang, Muhammad Ali, Saeed Ahmed, Muhammad Irfan. An Automated UAV Image Stitching Approach Based on Improved SIFT Features. *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 62451-62461. 2021. 10.1109/ACCESS.2021.3073981.
14. Runwei Guan, Jinrong Hu, Yifei Huang, Liting Sun, Paolo Santi, Carlo Ratti. Deep Learning-Based Keypoint Detection and Matching for UAV Thermal Images. *Remote Sensing*, Vol. 15, No. 18, Article 4429. 2023. 10.3390/rs15184429
15. Rodehorst V., Koschan A. Comparison and evaluation of feature point detectors, 2006
16. Tinne Tuytelaars, Krystian Mikolajczyk. Local Invariant Feature Detectors: A Survey, 2008
17. Detector Kitchen-Rosenfeld. L. Kitchen and A. Rosenfeld. Gray Level Corner Detection. *Pattern Recognition Letters*, pp. 95-102, 1982
18. Moravec, H. Rover visual obstacle avoidance // In International Joint Conference on Artificial Intelligence, Vancouver, Canada, 1981, pp. 785-790.
19. COP (Crosses as Oriented Pair) Detector. S.C. Bae, I.S. Kweon, and C.D. Yoo. COP: A New Corner Detector. *Pattern Recognition Letters*, 2002.
20. E. R. a. T. Drummond. Fusing Points and Lines for High Performance Tracking, 2005
21. David G. Lowe. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, 2004
22. Shakenov, A.K. Comparison of Image Keypoint Detectors and Evaluation of Their Statistical Characteristics. *Avtometriya (Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing)*, 2021, Vol. 57, No. 1.
23. Kleinberg, J., and Tardos, É. Algorithm Design. Computers Science Classics Series. Translated from English by E. Matveev. St. Petersburg: Piter, 2016. 800 p.
24. Computer Vision Systems: Modern Challenges and Methods [Electronic Resource]. Available at: <http://controleng.ru/innovatsii/sistemy-komp-yuternogo-zreniya-sovremenny-e-zadachi-metody/> (accessed: June 1, 2025).
25. Mediator Design Pattern [Electronic Resource]. Available at: <https://refactoring.guru/ru/design-patterns/mediator>; A Tutorial on Binary Descriptors [Electronic Resource]. Available at:



<https://gilscvblog.com/2013/10/04/a-tutorial-on-binary-descriptors-part-3-the-orb-descriptor/> (accessed: June 1, 2025).

26. Galliani, S., et al. Just Look at the Image: Viewpoint-Specific Surface Normal Prediction for Improved Multi-View Reconstruction [Electronic Resource]. Available at: https://www.cv-foundation.org/openaccess/content_cvpr_2016/papers/Galliani_Just_Look_at_CVPR_2016_paper.pdf (accessed: April 16, 2025).

27. James L. Pro JavaFX 2/ L. James, G. Weiqi, C. Stephen, I. Dean, V. Johan. – Apress, 2012. – 641 p.

28. Feature detection and description [Electronic Resource]/Режим доступа: https://docs.opencv.org/3.0-beta/doc/py_tutorials/py_feature2d/py_table_of_contents_feature2d/py_table_of_contents_feature2d.html (accessed: April 16, 2025)

29. ORB: Oriented FAST and Rotated BRIEF [Electronic Resource]. Available at: http://www.willowgarage.com/sites/default/files/orb_final.pdf (accessed: April 16, 2025).

30. Introduction to SURF [Electronic Resource]. Available at: https://docs.opencv.org/3.0-beta/doc/py_tutorials/py_feature2d/py_surf_intro/py_surf_intro.html (accessed: April 16, 2025).

31. What Is KeyPoint Detection? [Electronic Resource]. Available at: <https://www.geeksforgeeks.org/what-is-keypoint-detection/> (accessed: April 16, 2025).

32. Chichinadze, V.K. Solving Non-Convex Nonlinear Optimization Problems. Moscow: Nauka, Main Editorial Board of Physical and Mathematical Literature, 1983. 256 p.

33. Kadirkulov, Sh.K., Ospanov, Zh.Sh., Bekmurzaev, B.Zh., Bekmukhamedov, B.E., and Anetbaev, A.A. Object-Oriented Modeling Using UML Diagrams for the Development of a Simulation Model of an Autonomous UAV Navigation System. Scientific Proceedings of the Military Engineering Institute of Radioelectronics and Communications. Military Scientific and Technical Journal, No. 3 (65), 2026.

Шингис Кадиркулов, э.ғ.к., PhD, қауымдастырылған профессор, профессор-оқу-әдістемелік басқарманың ғылыми-зерттеу бөлімінің бастығы, Military Institute of Land Forces named after S. Nurmagambetov, Алматы, Қазақстан, ksh777@mail.ru

Жанболат Оспанов, жауапты орындаушы, докторант, Military Institute of Land Forces named after S. Nurmagambetov, Алматы, Қазақстан, ospanov.zh.s.7@gmail.com

Аслан Анетбаев, ғылыми қызметкер, Almaty Institute of Technology, Алматы, Қазақстан, aslan.assylkhanovich@gmail.com



ТҮЙІНДІ НҮКТЕЛЕР ӘДІСІ НЕГІЗІНДЕ БАЙЛАНЫСТЫ МУЛЬТИКОПТЕРДІҢ ТЕХНИКАЛЫҚ КӨРУ ЖҮЙЕСІ ҮШІН Ψ - ДЕСКРИПТОРДЫ ӘЗІРЛЕУ

Аңдатпа. Мақалада байланыстырылған мультикоптерлердің жалпы сипаттамасы беріліп, олардың негізгі функционалдық мүмкіндіктері қарастырылады. Сонымен қатар, байланыстырылған ұшқышсыз ұшу аппараттарының (ҰҰА) жұмыс істеуіндегі күрделі процестердің бірі – жерге қону үдерісінде қолдануға арналған автономды навигация жүйесін әзірлеу міндеті қойылған. Автономды навигация жүйесін құру үшін түйінді нүктелер технологиясын пайдалану ұсынылады.

Түйінді нүктелердің детекторлары мен дескрипторларына қысқаша шолу жүргізілді. Түйінді нүктелердің детекторы ретінде FAST детекторын қолдануға болатыны көрсетілген. Алайда дескрипторды құру үшін сызықтық емес функцияларды оңтайландыру есептеріндегі Ψ -түрлендірулер әдісінің математикалық моделі пайдаланылды. Бұл модель авторлық түйінді нүктелер дескрипторы – Ψ -дескрипторды әзірлеудің негізі болды.

Әзірленген Ψ -дескрипторды ҰҰА-ның автономды навигациясы міндетін шешуде практикалық қолдану нәтижелері келтірілген. Ұсынылған жаңа түйінді нүктелерді анықтау әдісі байланыстырылған ұшқышсыз ұшу аппараттарының техникалық көру жүйелерінде қону міндеттерін шешу үшін GPS жүйелеріне балама ретінде пайдаланылуы мүмкін.

Түйінді сөздер: байланыстырылған пилотсыз ұшу аппараты, дескриптор, автономды навигация, негізгі түйін, машиналық көру, жасанды интеллект.

Shyngys Kadirkulov, candidate of military sciences, PhD, associate professor, Professor-Head of the Research Department of Educational and Methodological management, Military Institute of Land Forces named after S. Nurmagambetov, Almaty, Kazakhstan, ksh777@mail.ru

Zhanbolat Ospanov, responsible executor, doctoral student, Military Institute of Land Forces named after S. Nurmagambetov, Almaty, Kazakhstan, ospanov.zh.s.7@gmail.com

Aslan Anetbaev, researcher, Almaty Institute of Technology, Almaty, Kazakhstan, aslan.assylkhanovich@gmail.com

DEVELOPMENT OF A Ψ -DESCRIPTOR FOR THE COMPUTER VISION SYSTEM OF A TETHERED MULTICOPTER BASED ON THE KEYPOINT METHOD

Abstract. The article provides a general overview of tethered multicopters, describes their main functional capabilities, and formulates the task of developing an autonomous navigation system for use in one of the most challenging



operational processes of tethered unmanned aerial vehicles (UAVs) - their landing on the ground. The use of keypoint technology is proposed for the development of the autonomous navigation system.

A brief review of keypoint detectors and descriptors is presented. It is shown that the FAST detector can be used as a keypoint detector. However, for descriptor construction, a mathematical model based on the Ψ -transformation method used in nonlinear function optimization problems was employed, forming the basis for the development of a proprietary keypoint descriptor - the Ψ -descriptor.

The results of the practical application of the developed Ψ -descriptor for solving UAV autonomous navigation tasks are presented. The proposed new method for keypoint determination can be used in the computer vision systems of tethered unmanned aerial vehicles to solve landing tasks as an alternative to conventional GPS-based systems.

Keywords: tethered UAV, descriptor, autonomous navigation, keypoint, computer vision, artificial intelligence.

Поступила: 15 июня 2026 года

Рецензирована: 18 июня 2026 года

Принята: 22 июня 2026 года



М.У. Кизаев, Б.М. Керимбаев

National University of Defense of the Republic of Kazakhstan,

Астана, Казахстан

E-mail: maksat.kizayev@mail.ru

РОЛЬ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В СИСТЕМЕ ПРОТИВОВОЗДУШНОЙ ОБОРОНЫ

Аннотация. В статье рассматривается современное значение беспилотных летательных аппаратов в системе противовоздушной обороны. Проанализированы основные функции дронов: разведка, целеуказание, радиоэлектронная борьба и перехват воздушных целей. Освещены угрозы со стороны беспилотных летательных аппаратов противника и подходы к их уничтожению. Отдельное внимание уделено перспективам использования искусственного интеллекта и сетевых технологий в интеграции беспилотных летательных аппаратов в систему противовоздушной обороны.

Автор отмечает современные тенденции развития беспилотных летательных аппаратов и их интеграция в систему противовоздушной обороны. Приводятся примеры уничтожения беспилотных летательных аппаратов дронами-перехватчиками различными способами. Описываются технологические и организационные преимущества, а также риски, связанные с внедрением беспилотных летательных аппаратов в оборонные контуры. Представлены перспективные направления развития дронов в составе комплексной системы противовоздушной обороны.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, противовоздушная оборона, радиоэлектронная борьба, дрон-перехватчик, военные технологии.

Введение.

Анализ событий современных военных конфликтов свидетельствует о том, что широкое применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) стало неотъемлемым компонентом в вооруженном противоборстве. Их используют для разведки и целеуказания, дистанционного воздействия (ударные дроны), массового насыщения воздушной среды (отвлекающие цели-имитаторы), введения в заблуждение системы противовоздушной обороны (ПВО) противника. Рой дронов может создать ложную картину воздушной обстановки, перегрузить средства ПВО или обеспечить полосу (участок) прорыва для полета и атаки пилотируемой авиации.



Новой и актуальной проблемой для противовоздушной обороны является борьба с БПЛА. В современных военных конфликтах, при отражении воздушного нападения противника наряду с применением фронтовой авиации, ЗРК и средств РЭБ широко применяется беспилотная авиация. Применение БПЛА для перехвата воздушных целей, стало новым веянием эпохи вооруженной борьбы в воздушном пространстве, которое требует поиск новых тактических приемов, а также модернизации БПЛА. Таким образом, актуальная проблема заключается в трансформации боевого применения беспилотной авиации в современных условиях военных конфликтов.

Материалы и методы.

В ходе подготовки статьи использован материал военной и научной литературы, а также периодических изданий. Применен комплекс общенаучных и специальных методов военных исследований, обеспечивающих системный анализ тактики действий БПЛА в противовоздушной операции.

В качестве общенаучных методов применялись:

- анализ и синтез – для выделения сущностных характеристик применения БПЛА;

- индукция и дедукция – при формировании теоретических обобщений.

Из специальных методов военной науки использованы:

- структурно-функциональный анализ – при определении роли и места беспилотной авиации в противовоздушной операции;

- сравнительный анализ – при классификации видов БПЛА.

Результаты и обсуждение.

В процессе исследования автором статьи поставлена цель – на основе анализа боевого применения беспилотной авиации в современных военных конфликтах, рассмотреть тактику боевого применения БПЛА в противовоздушной обороне. Для достижения поставленной цели исследования определены следующие задачи:

- 1) Раскрыть основные задачи, выполняемые беспилотной авиацией в системе ПВО в современных военных конфликтах.

- 2) Проанализировать боевое применение БПЛА-перехватчиков в противовоздушной операции.

- 3) Сформулировать тезисы направления развития беспилотной авиации в обеспечении безопасности в воздушном пространстве.

Беспилотная авиация стала ключевым элементом современных вооруженных конфликтов, радикально изменив тактику ведения боевых действий. Ее применение влияет не только на наступательные, но и на оборонительные действия войск (сил), включая построение и функционирование системы ПВО. На фоне снижения стоимости и повышения доступности дронов, появляется необходимость пересмотра



традиционных подходов к ПВО. Современные системы ПВО сталкиваются как с угрозами от БПЛА противника, так и с задачей интеграции собственных дронов в оборонительный контур [1].

В зависимости от выполняемых задач БПЛА в системе ПВО условно классифицируются на следующие типы:

- разведывательные БПЛА, предназначенные для обнаружения и сопровождения за воздушными целями, в том числе малозаметными;
- БПЛА радиоэлектронной борьбы (РЭБ), которые подавляют радиолокационные станции (РЛС), навигацию и каналы связи противника;
- БПЛА-перехватчики, оснащенные средствами обнаружения и поражения дронов противника;
- дроны-мишени (ложные цели) применяются для перегрузки системы ПВО противника и выявления его позиций [2].

Интеграция БПЛА в ПВО позволяет создать гибкую, адаптивную и масштабируемую систему с высокой степенью автоматизации и оперативности. БПЛА способны вести разведку воздушного пространства, передавая данные в режиме реального времени. Это особенно важно для обнаружения низколетящих целей и не просматриваемых участков наземными радиолокационными станциями. Использование специализированных дронов для постановки помех и подавления ПВО противника позволяет обеспечить прикрытие своих войск (сил) в наступлении или обороне [3].

С ростом угроз со стороны БПЛА, особенно малогабаритных, маневренных и ройных систем, критически возрастает значение физического перехвата дронов при помощи других БПЛА. Такой способ предполагает активное воздействие на БПЛА противника с целью их нейтрализации путем захвата, столкновения или поражения оружием. Ниже представлены основные методы реализации физического перехвата:

1) Перехват с использованием сетей – БПЛА выпускает специальную сеть, которая захватывает дрон противника, выводя его из строя. Например, беспилотная система Drone Catcher (рисунок 1) оснащена пневматической установкой для запуска сетей.

Преимущество этого метода заключается в минимизации риска столкновения с целью в воздухе. Вместе с тем необходимо отметить потребность высокой точности сближения с целью и ограниченную эффективность при маневрировании дрона противника;

2) Таран – БПЛА-перехватчик умышленно сталкивается с целью, разрушая ее конструктивные элементы. Этот метод широко применяется в полевых условиях. Например, FPV-дроны активно используются в современных военных конфликтах для перехвата и уничтожения дронов противника. Преимущество этого метода заключается в простоте реализации и высокой вероятности поражения, а недостатком является потеря самого перехватчика и высокий риск фрагментации.



Рисунок 1 - Перехват дрона с использованием сетки

3) Применение стрелкового вооружения – некоторые перехватчики оснащаются легким стрелковым или дробовым оружием. Например, серийный БПЛА с автоматическим оружием и ИИ-наведением турецкого производства Songar (рисунок 2). Аналогично, в мировой практике применяются БПЛА с использованием мини-ракет и дробовых установок. При этом высокая масса вооружения представляет определенные ограничения и сложность стабилизации полета [4].



Рисунок 2 - БПЛА «Songar» с автоматическим оружием



Анализ событий современных военных конфликтов показывает, что для эффективного применения БПЛА-перехватчики должны обладать:

- высокой маневренностью;
- системами автономной навигации и ИИ-управления;
- сниженной массой и высокой энергоэффективностью;
- модульной конструкцией для смены вооружения и оборудования [5].

В обозримом будущем следует ожидать разработку ройных перехватчиков под единым управлением и интеграцию в автоматизированную систему управления силами и средствами ПВО. Возможно применение нейросетей для распознавания и динамического выбора метода перехвата [6].

Физический перехват с помощью БПЛА – это не просто эффективный способ борьбы с БПЛА-противника, но и ключевое звено ПВО «поля боя» в условиях асимметричных угроз. Массовое применение дронов-камикадзе требует быстродействующих, дешевых и мобильных систем защиты. Миниатюризация, автономность и низкая радиолокационная заметность дронов значительно усложняют их своевременное обнаружение. Рой БПЛА может перегрузить каналы наведения огневых средств ПВО, нарушить логистику и моральное состояние личного состава [7].

Заключение.

Резюмируя, хотим отметить, что БПЛА – это не только угроза, но и важный компонент обороны. Безусловно, их роль в ПВО будет неуклонно расти. Особенно актуальное значение имеет внедрение дронов-перехватчиков, способных физически уничтожать БПЛА противника. Наиболее перспективным направлением становится комбинация ИИ, тактики применения роя дронов и физического воздействия, обеспечивающая эффективную защиту в условиях насыщенного воздушного пространства.

Интеграция БПЛА в систему ПВО представляет собой одно из наиболее перспективных направлений развития современной военной оборонной архитектуры. При правильной организации дроны могут стать не только вспомогательным элементом, но и ключевым компонентом защиты воздушного пространства. Вместе с тем реализация этих возможностей требует значительных усилий в сфере координации, управления, стандартизации и нормативного регулирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мустабеков А.Д., Кизаев М.У. Современная воздушная среда как многовекторный фактор боевого применения авиации в противовоздушной операции // Военно-теоретический журнал «Бағдар-Ориентир», 2025 – №3. – С.89-94.



2. Нестеров С.А. Беспилотные летательные аппараты: тактика, применение, противодействие. – М.: Академия Генерального штаба ВС РФ, 2022. – 278 с.
3. Арбатов А.Г. Беспилотные технологии в обороне: Вызовы и перспективы // Военно-теоретический журнал «Военная мысль», 2023. – № 4. – С. 15–26.
4. Центр анализа стратегий и технологий (ЦАСТ). БПЛА и современные конфликты. - М., 2023.
5. Шмелев И.В. Противодействие дронам: проблемы и перспективы // Научно-исследовательский журнал «Армия и общество». – 2024. – № 2. – С. 14-19.
6. Власов Д. В. Беспилотные летательные аппараты и системы ПВО: новые реалии войны // Военно-теоретический журнал «Военная мысль». – 2022. – №10. – С. 45–57.
7. Исследование МО РФ: Перспективы развития ПВО РФ до 2035 года. – М.: Воениздат, 2023.

REFERENCES

1. Mustabekov A.D., Kizaev M.U. Modern air environment as a multi-vector factor in the combat application of aviation in anti-aircraft operations // Military and theoretical journal "Бағдар-Orientyr", 2025 - №. 3 - P.89-94.
2. Nestorov S.A. Drones: tactics, application, counteraction. - M.: Academy of the General Staff of the Armed Forces of the Russian Federation, 2022. - 278 pp.
3. Arbatov A.G. Drones in Defense: Challenges and Prospects // Military Theory Journal Military Thought, 2023. - №. 4 - P. 15-26.
4. Center for Strategy and Technology Analysis (CSTA). UAVs and modern conflicts. M., 2023.
5. Shmelev I.V. Countering Drones: Challenges and Prospects // Army and Society Research Journal. - 2024. - №. 2 - P. 14-19.
6. Vlasov D. V. Drones and air defense systems: new realities of war // Military theoretical journal Military Thought. - 2022. - №. 10 - P. 45-57.
7. Russian Defense Ministry Study: Russian Air Defense Outlook to 2035. - M.: Voenizdat, 2023.

Максат Кизаев, магистр, полковник, National Defense University of the Republic of Kazakhstan, Астана, Қазақстан, maksat.kizayev@mail.ru

Бахытжан Керимбаев, э.ғ.к, доцент, запастағы полковник, National Defense University of the Republic of Kazakhstan, Астана, Қазақстан.



ҰШҚЫШСЫЗ ҰШАТЫН АППАРАТТАРДЫҢ ЗЕРУҚКА ҚАРСЫ ҚОРҒАНЫС ЖҮЙЕСІНДЕГІ РӨЛІ

Андапта. Мақалада ұшқышсыз ұшақтардың әуе қорғанысындағы қазіргі маңыздылығы қарастырылады. Дронның негізгі функциялары: барлау, нысананы анықтау, радиоэлектрондық күрес және әуе нысаналарын ұстап алу талданған. Жау ұшқышсыз ұшақтарының қауіптері және оларды жою тәсілдері түсіндіріледі. Әуе қорғанысы жүйесіне ұшқышсыз ұшақтарды біріктіруде жасанды интеллект пен желілік технологияларды пайдалану перспективаларына ерекше назар аударылады.

Автор ұшқышсыз ұшақтарды дамытудың қазіргі тенденцияларын және оларды әуе қорғанысы жүйесіне біріктіруді атап өтеді. Ұшқышсыз ұшақтарды әртүрлі тәсілдермен ұстап алушы ұшқышсыз ұшақтардың жою мысалдары келтірілген. Технологиялық және ұйымдық артықшылықтар, сондай-ақ қорғаныс контурына ұшқышсыз ұшақтарды енгізуге байланысты тәуекелдер сипатталады. Әуе қорғанысының кешенді жүйесінің құрамында ұшқышсыз ұшақтарды дамытудың перспективалы бағыттары ұсынылады.

Түйінді сөздер: ұшқышсыз ұшақтар, әуе қорғанысы, радиоэлектрондық күрес, ұшқышсыз ұшақ-асқыншы, әскери технологиялар.

Maksat Kizayev, master, associate professor, National Defense University of the Republic of Kazakhstan, colonel, Astana, Kazakhstan, maksat.kizayev@mail.ru

Bakytzhan Kerimbayev, candidate of military sciences, associate professor, reserve colonel, National Defense University of the Republic of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan

ROLE OF UNPLOTED FLIGHTING APPARATES IN THE SYSTEM OF ANTI-VOLANCE ROAD

Abstract. The article discusses the modern significance of drones in the air defense system. The main functions of drones are analyzed: reconnaissance, aiming, electronic warfare and interception of air targets. The threats posed by enemy drones and approaches to their destruction are covered. Particular attention is paid to the prospects for using artificial intelligence and networking technologies in the integration of unmanned aerial vehicles into the air defense system.

The author notes the current trends in the development of unmanned aerial vehicles and their integration into the air defense system. Examples of the destruction of unmanned aerial vehicles by interceptor drones in various ways are given. The technological and organizational advantages, as well as the risks associated with the introduction of unmanned aerial vehicles into defense circuits



are described. The promising areas of development of drones as part of a comprehensive air defense system are presented.

Keywords: unmanned aerial vehicles, air defense, electronic warfare, drone interceptor, military technology.

Поступила: 02 июня 2026 года

Рецензирована: 23 июня 2026 года

Принята: 24 июня 2026 года



Y. Igembay¹, A.K. Ozhikenova¹, A.K. Ozhiken²

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

²Institute of Mechanics and Engineering, Almaty, Kazakhstan

E-mail: aiman84@mail.ru

DEVELOPMENT OF A HARDWARE ARCHITECTURE FOR AN UPPER-LIMB BIONIC PROSTHESIS CONTROL SYSTEM FOR MILITARY AND CIVILIAN REHABILITATION APPLICATIONS

Abstract. This paper presents the development of a hardware architecture for a control system of an upper-limb bionic prosthesis based on surface electromyography (EMG). The proposed system is intended for acquisition, amplification, filtering, and digitization of bioelectrical signals generated by skeletal muscles to provide reliable input data for prosthetic control algorithms. The designed hardware architecture includes an instrumentation amplifier for acquiring low-amplitude EMG signals, an active common-mode interference suppression circuit to reduce external noise, an active band-pass filter with a passband of 60–500 Hz to isolate the informative frequency range of the EMG signal, an adjustable gain stage, and a high-resolution sigma–delta analog-to-digital converter (ADC) for signal digitization.

The relevance of the proposed solution is driven by the increasing need for advanced prosthetic and rehabilitation technologies for civilian patients and military personnel with upper-limb amputations resulting from trauma and combat-related injuries. The developed hardware architecture provides a reliable platform for biosignal acquisition and processing in rehabilitation-oriented prosthetic systems, supporting restoration of motor functions and improvement of functional independence.

To evaluate the performance of the proposed architecture, circuit modeling was performed in the Multisim simulation environment. Real EMG recordings obtained from the PhysioNet biomedical signal database were used as input signals. In addition, synthetic disturbances, including 50 Hz power-line interference and low-frequency respiratory artifacts, were introduced to simulate realistic operating conditions. The simulation results demonstrated effective suppression of undesirable harmonics while preserving informative spectral components of the EMG signal.

A component-level analysis was conducted considering parameters such as input impedance, noise characteristics, power consumption, and physical dimensions. The developed architecture is characterized by modularity, adjustable amplification capability, energy efficiency, and scalability for multi-channel implementations.



The proposed solution can be applied in development of autonomous upper-limb bionic prostheses for medical rehabilitation of civilian patients and military personnel and can serve as a hardware platform for integration of intelligent control algorithms in advanced prosthetic systems.

Keywords: surface electromyography (EMG), bionic prosthesis, hardware architecture, medical rehabilitation, military medicine, rehabilitation technologies, upper-limb prosthetics, interference suppression, sigma–delta analog-to-digital converter.

Introduction.

The restoration of lost upper limb functions remains one of the major challenges in modern biomedical engineering and rehabilitation technology. Bionic prostheses controlled by bioelectrical muscle signals significantly improve the level of social adaptation and quality of life of patients after limb amputation [1-7], [10], [11].

Surface electromyography (EMG), which reflects the bioelectrical activity of muscle fibers, is considered one of the most informative sources of control signals for such systems [7]. The amplitude of EMG signals typically ranges from several to hundreds of microvolts [8], which imposes strict requirements on the hardware design of the signal acquisition system. The main technical challenges include a low signal-to-noise ratio, the presence of industrial power-line interference, baseline drift, and motion artifacts that may significantly distort the recorded signal [9-11].

The aim of this study is to design and experimentally validate the hardware architecture of a control system for an upper-limb bionic prosthesis capable of ensuring stable acquisition and preprocessing of EMG signals for subsequent control of the prosthetic actuator.

This research also contributes to the achievement of the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs):

1) SDG 3 — ensuring healthy lives and promoting well-being for people of all ages through the development of accessible and effective rehabilitation technologies.

2) SDG 10 — reducing inequality within and among countries by developing affordable bionic prosthetic solutions that can be implemented in resource-limited environments.

Materials and Methods.

The hardware architecture of the control system for an upper-limb bionic prosthesis was developed using a systems engineering approach. Biopotential acquisition was performed using silver–silver chloride electrodes. The recorded signal was applied to an instrumentation amplifier (AD623 or INA114), providing high input impedance and effective common-mode rejection. The amplified signal was then processed by a second-order active band-pass filter with a passband of



60–500 Hz, followed by an adjustable gain stage with a gain range of 2–202×. Signal digitization was carried out using a 24-bit medical-grade sigma–delta analog-to-digital converter (ADC).

Circuit-level modeling and verification were performed in the Multisim simulation environment. AC Sweep and Transient Analysis were used to evaluate the gain characteristics, filter bandwidth, and the effectiveness of interference suppression.

Real EMG signals obtained from the PhysioNet biomedical signal database, including recordings with myopathy characteristics, were used as reference input data. In addition, synthetic disturbances were introduced to simulate realistic operating conditions, including 50 Hz power-line harmonic and low-frequency artifacts in the range of 0.5–3 Hz.

The analysis included the evaluation of the amplitude–frequency response, signal-to-noise ratio, and verification of the stable operation of the LM317 voltage regulator used in the power supply stage. A comparative analysis of the selected electronic components was conducted considering parameters such as input impedance, noise characteristics, power consumption, cost, and physical dimensions.

An analysis of existing commercial prosthetic systems, including bebionic (Ottobock), revealed limitations associated with closed hardware architectures and highlighted the need for the development of a scalable modular platform. The applied methodological approach ensures compliance with international standards for EMG signal acquisition and enables further scaling of the system to multi-channel configurations.

Results.

Modern commercial prosthetic systems, such as bebionic, developed by Ottobock, employ highly integrated electronic modules with a closed hardware architecture. Despite their high functionality, such solutions are characterized by high cost and limited possibilities for modification and customization.

In this regard, an important task is the development of a proprietary hardware architecture for a control system of a bionic prosthesis aimed at:

- stable acquisition of low-amplitude EMG signals;
- effective suppression of common-mode and industrial interference;
- adjustable signal amplification;
- high-precision analog-to-digital conversion;
- energy efficiency and autonomous operation;
- the possibility of multi-channel scalability.

Within the framework of this study, a hardware architecture of a control system for an upper-limb bionic prosthesis based on surface electromyography was developed.

Development of the Functional Diagram.

During the development of the hardware part of the control system for a bionic hand prosthesis, a functional diagram of biosignal processing was designed.

The functional diagram reflects the main stages of signal conversion, filtering, and amplification of signals received from the sensors (Fig. 1).

The functional diagram of the system includes the following groups:

- preamplification stage;
- filtering stage;
- amplification stage;
- protection stage;
- control stage;
- actuation stage;
- power supply stage.

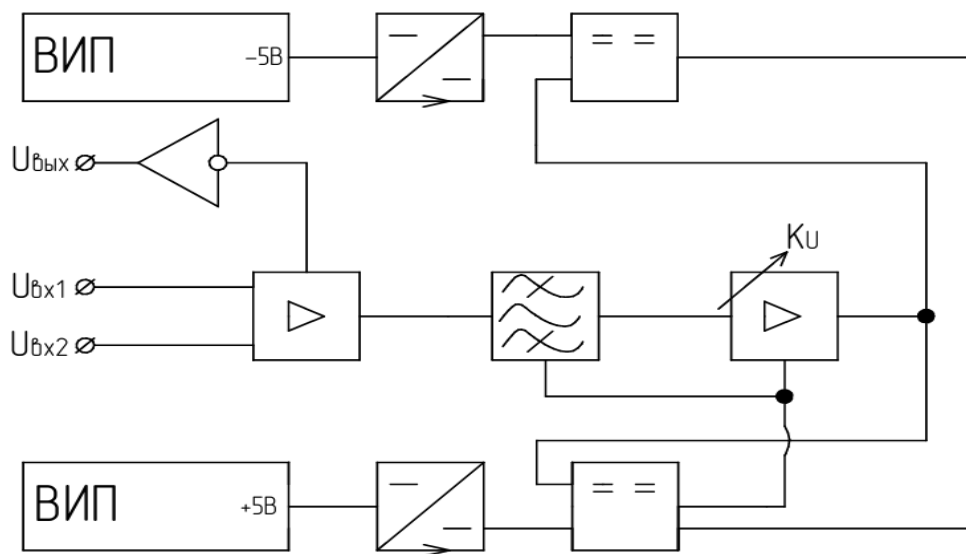


Figure 1 - Functional diagram of the bionic hand prosthesis

Biopotential acquisition is performed using silver–silver chloride electrodes. The signal is applied to an instrumentation amplifier that provides high input impedance and effective common-mode rejection [3-4].

The signal then passes through an active band-pass filter that limits the frequency range to 60–500 Hz [8]. After filtering, additional adjustable amplification is performed. Signal digitization is carried out by a dedicated analog-to-digital converter chip, after which the digital data are transmitted to a microcontroller for processing and for generating a control signal for the actuator (Figure 2) [2].

The system power supply is implemented using linear voltage regulators and an auxiliary inverting converter to generate the negative supply voltage.

Selection of Electronic Components.

The AD623 and INA114 models were considered. The key selection parameters included input impedance, bias current, power consumption, and cost (Table 1) [3], [4].



Table 1 - Characteristics of instrumentation amplifiers

Parameters	AD623ARZ-R7	AD623ARMZ-REEL7	INA114AU
Manufacturer	Analog Devices		Texas Instruments
Package	SOIC-8	MSOP-8	SOIC-16
Input impedance, GΩ	0.1	0.1	10
Input bias current, nA	17	17	2
Input offset voltage, μV	25	200	50
Output current, mA	5	1	30
Quiescent current, mA	0.375	0.375	3
Price, KZT	2610	3200	21300

During the experiments, both microcircuits were used. The instrumentation amplifier provides an initial gain of approximately 10, which prevents saturation of the subsequent stages.

For the implementation of the filter and the final amplification stage, an operational amplifier with a wide bandwidth and low noise level was used. The selection was based on the analysis of frequency response, output current, and operational stability under dual power supply conditions.

Two sigma–delta ADC options were considered: a single-channel and a multi-channel version. Both devices provide a 24-bit resolution [5].

The multi-channel solution ensures system scalability but has greater connection complexity. Both variants were experimentally tested to evaluate their suitability for use in scalable systems.

A stepper motor and a servo drive were considered as actuator mechanisms.

The servo drive was selected due to its compact size, ease of control, and the absence of a need for an external driver. This made it possible to reduce the dimensions of the control board.

Electrical Circuit Calculations.

The gain of the instrumentation amplifier is determined by the following expression:

$$G = 1 + \frac{100\text{k}\Omega}{R_G}. \quad (1)$$

To obtain a gain of 10, a resistor with the corresponding value was selected from the E96 series.

The band-pass filter defines the operating frequency range of 60–500 Hz. The lower cutoff frequency suppresses baseline drift and physiological low-frequency interference, while the upper cutoff frequency limits the influence of high-frequency noise [1], [2], [8], [9].

The cutoff frequencies are determined by the following expression:

$$f = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (2)$$

Simulation results showed that the actual passband ranges from 61 to 485 Hz, which corresponds to the calculated design requirements (Figure 2) [2].

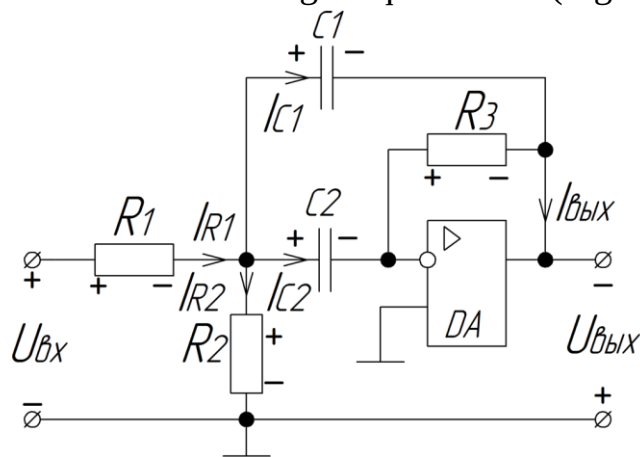


Figure 2 - Band-pass filter circuit diagram

The final amplifier is implemented as a scaling inverting amplifier with an adjustable gain factor (Figure 3).

$$K = 1 + \frac{R_2 + R_{var}}{R_1}. \quad (3)$$

The gain range is 2–202, which enables the system to be adapted to the individual characteristics of the user.

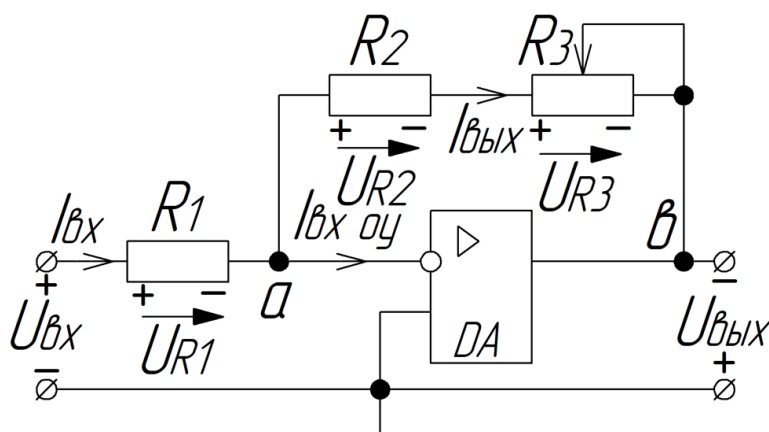


Figure 3 - Final amplifier circuit diagram

To improve noise immunity, an active common-mode interference suppression circuit was implemented (Figure 4). The operating principle is based on the inversion of the common component of the signal and its feedback through

the reference electrode, which corresponds to the principle of active common-mode interference suppression [9].

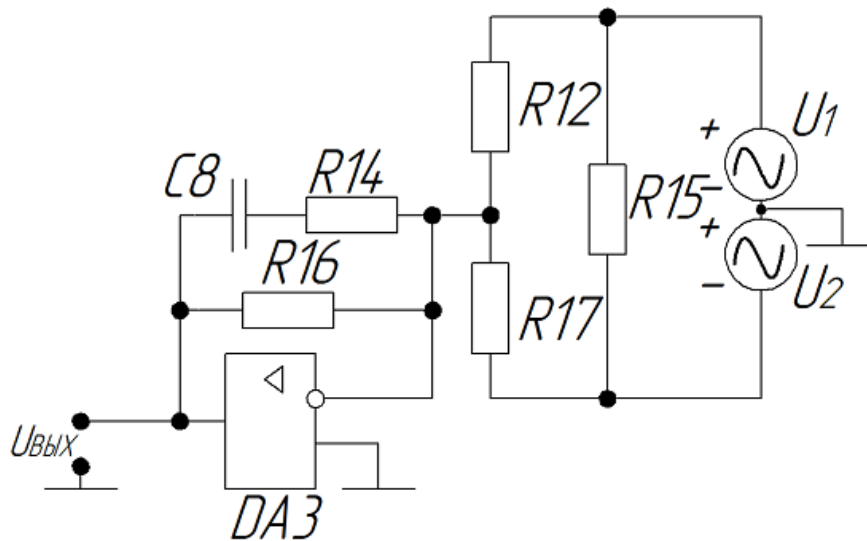


Figure 4 Common-mode interference suppression circuit

To generate a 3.3 V output from a 5 V supply, a linear voltage regulator was used (Figure 5). The resistor values were calculated using the standard formula:

$$V_{out} = 1,25 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) . \quad (4)$$

Simulation confirmed the correctness of the selected component values.

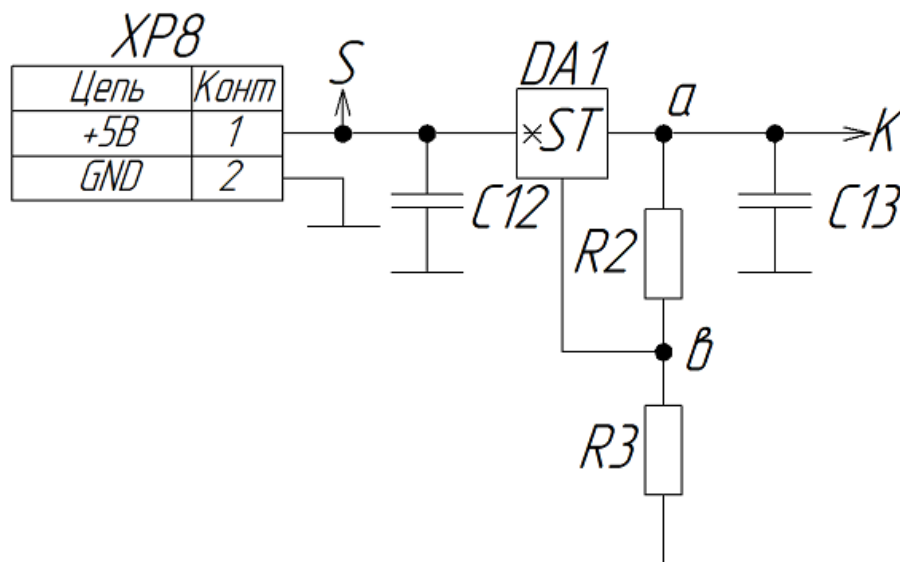


Figure 5 - LM317 voltage regulator circuit diagram

Simulation in the Multisim Environment.

For the experimental verification of the operability of the developed circuit, the Multisim circuit simulation environment was used. The software package has

an extensive component library, supports various types of analysis (AC Sweep and Transient Analysis), and allows the use of custom signal waveforms.

A digitized electromyogram from the PhysioNet database [6], containing signs of myopathy, was used as a reference biosignal. Myopathy is characterized by reduced muscle strength and changes in the structure of the electromyographic signal, which makes it possible to evaluate the robustness of the developed system when working with real clinical data [7].

One of the main problems in the registration of biopotentials is the influence of industrial power-line interference at a frequency of 50 Hz, the amplitude of which may significantly exceed the amplitude of the useful signal. To reduce the impact of this interference, frequency-selective circuits were integrated into the structure of the electromyographic sensor to suppress unwanted harmonics while allowing the useful signal frequency range to pass [2].

In the electrical circuit calculation section, an active band-pass filter with a designed passband of 60–500 Hz was synthesized. To verify the correctness of the calculations, the amplitude–frequency response (AFR) was simulated using the AC Sweep analysis tool.

The analysis of the ratio of the output signal to the input signal showed that the actual passband ranges from 61 to 485 Hz, which corresponds to the specified design requirements (Figure 6). The lower cutoff frequency suppresses low-frequency baseline drift, while the upper cutoff frequency limits high-frequency noise [1].

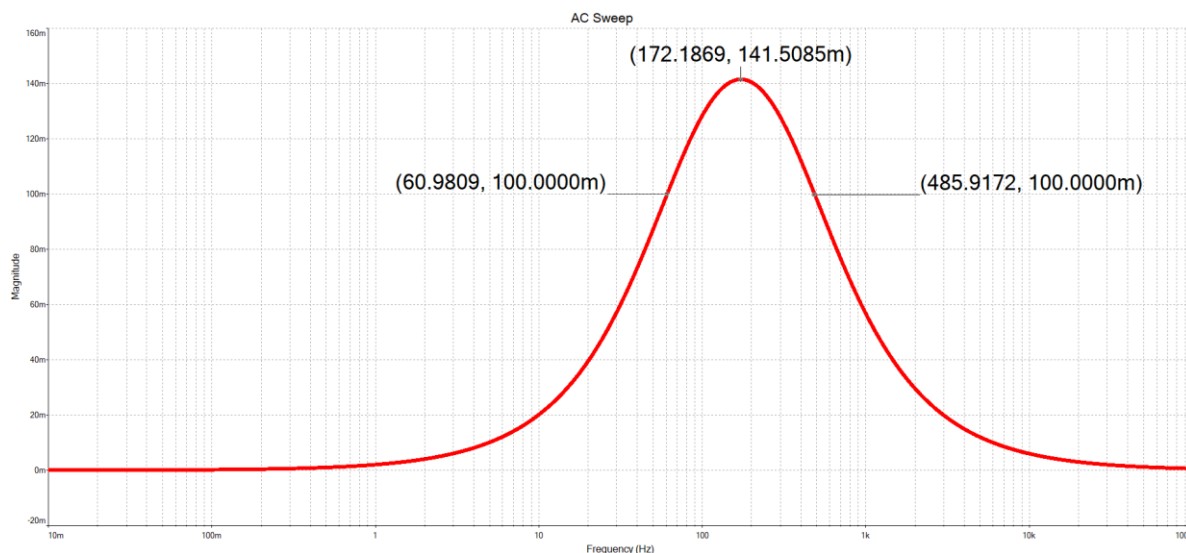
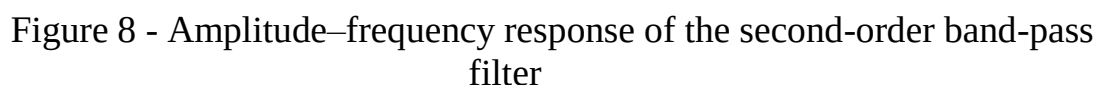


Figure 6 - Amplitude–frequency response of the band-pass filter

To increase the steepness of the amplitude response, a modified circuit with an additional reactive element was implemented, resulting in a second-order filter (Figure 7). Simulation showed that the slope increased to -40 dB per decade, which corresponds to the theoretical characteristics of a second-order filter and improves the suppression of power-line interference (Figure 8) [2].



The simulation results confirmed the formation of an output voltage of 3.3 V, indicating the correctness of the selected resistive divider and the accuracy of the calculated parameters.

The complete circuit of the electromyographic sensor was implemented in the Multisim environment to analyze the signal behavior after each functional stage.

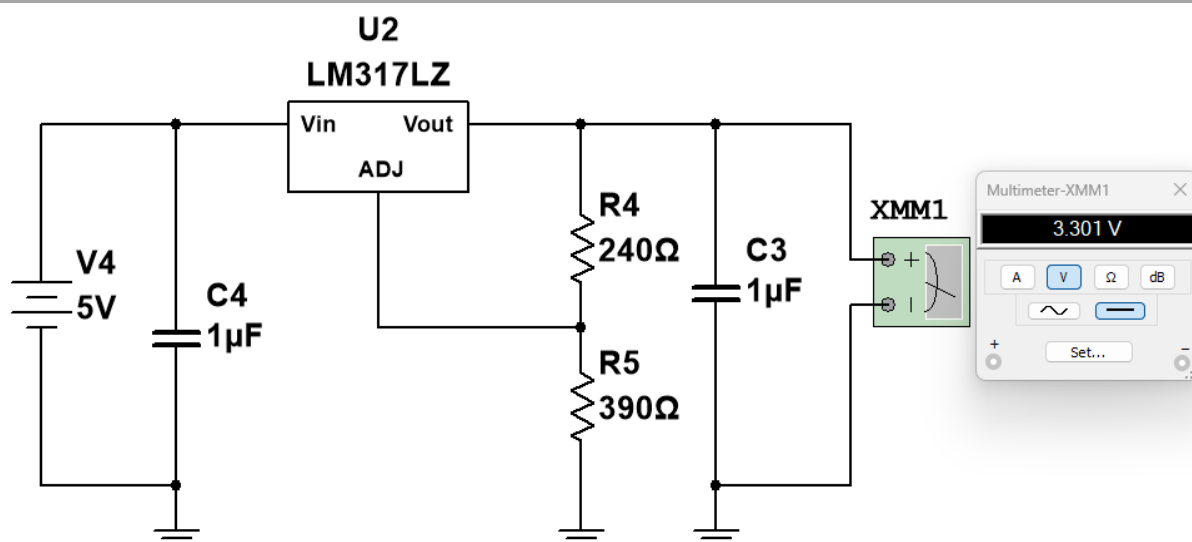


Figure 9 - Simulation of the voltage regulator in the Multisim environment.

A reference electromyographic signal loaded from the PhysioNet database was used as the input stimulus (Figure 10) [6].

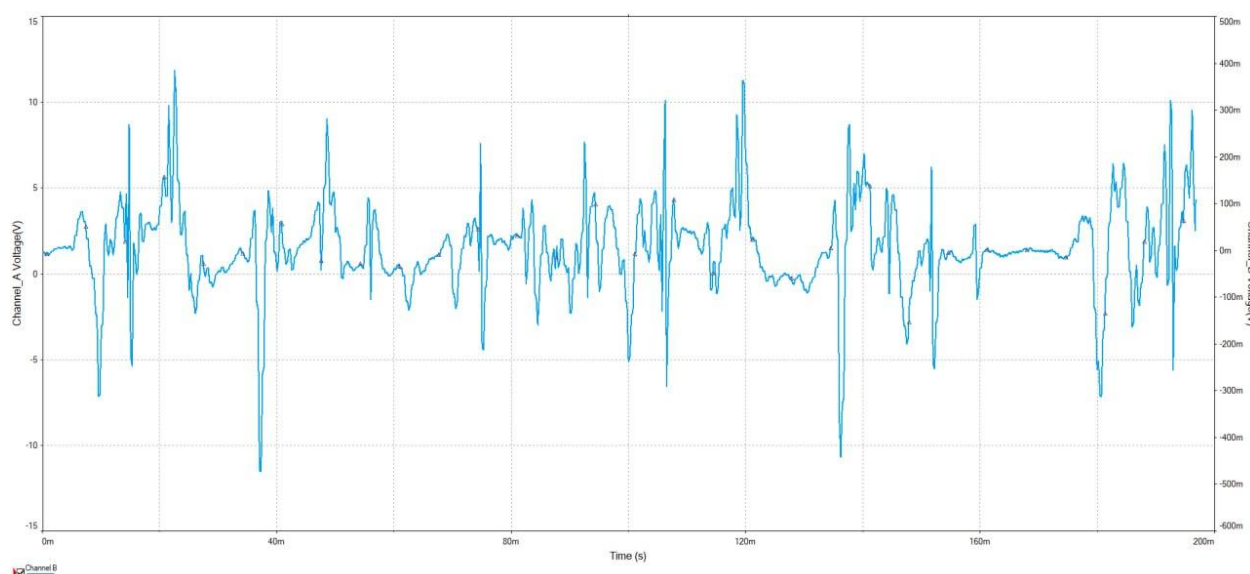


Figure 10 - Electromyographic signal from the PhysioNet database

To approximate the model to real signal acquisition conditions, two main interference components were added to the signal:

- a sinusoidal harmonic of the industrial power frequency of 50 Hz with an amplitude of 2 V, simulating power-line interference (Figure 11);
- a low-frequency signal in the range of 0.5–3 Hz, simulating respiratory and physiological interference that causes baseline drift (Figure 12).

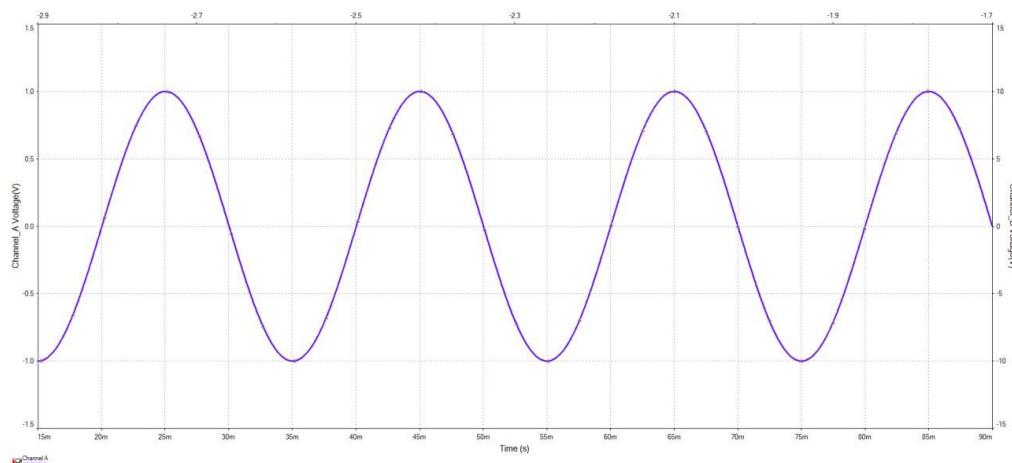


Figure 11 - Sinusoidal signal simulating power-line interference

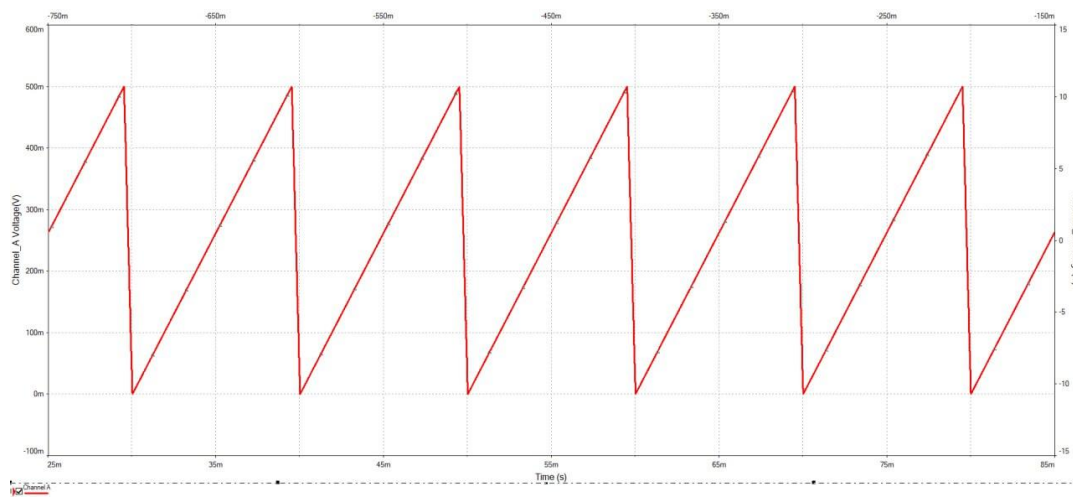


Figure 12 - Sawtooth signal simulating respiratory interference

The signals were summed using an operational amplifier-based summing circuit, which made it possible to obtain a noisy electromyographic signal approximating real acquisition conditions (Figure 13).

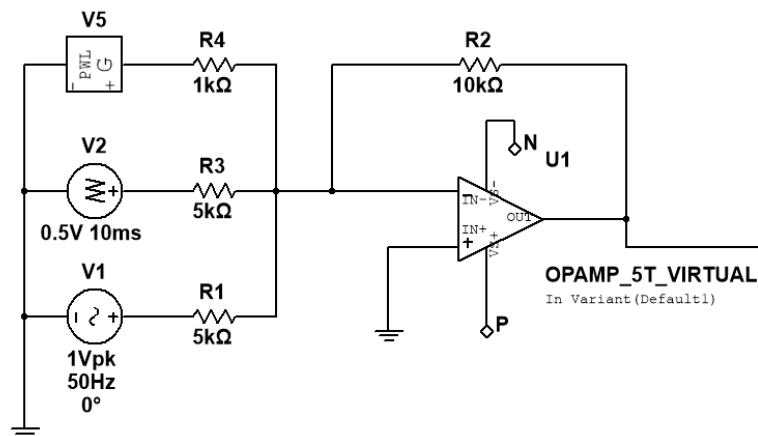


Figure 13 - Operational amplifier summing circuit

At the next stage, the operation of the second-order band-pass filter was simulated. The analysis revealed two suppression bands: below 60 Hz and above 485 Hz. Thus, effective suppression of respiratory and power-line interference is achieved while preserving the useful signal spectrum [8].

A comparison of the noisy signal waveform (Fig. 14) and the signal after filtering (Fig. 15) demonstrated a significant reduction in the amplitude of unwanted harmonics and stabilization of the baseline.

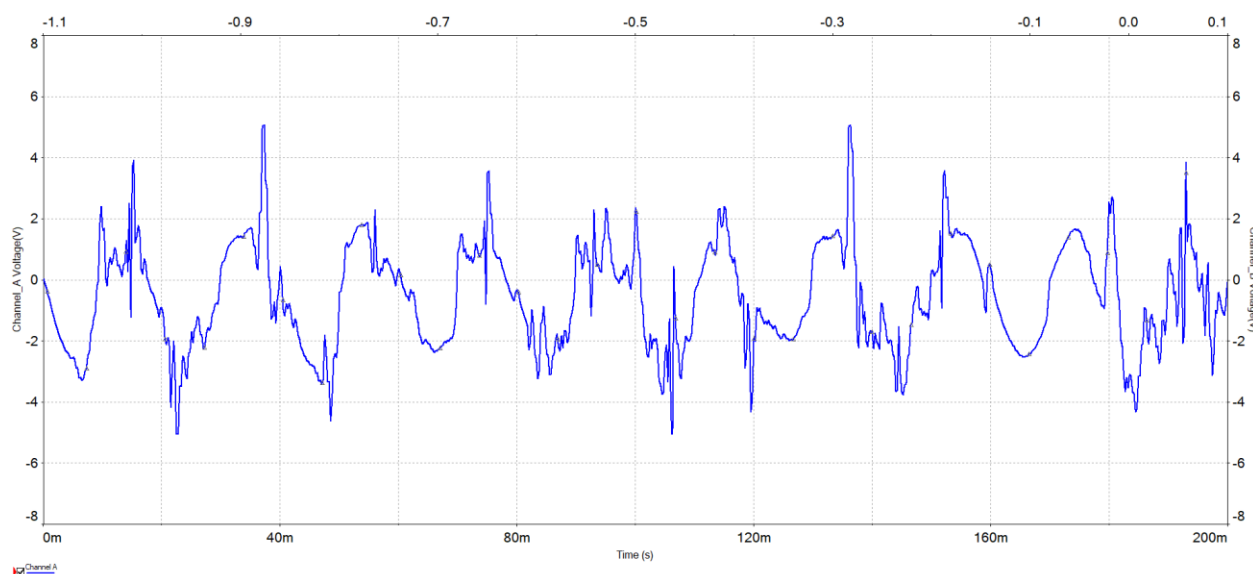


Figure 14 - Noisy electromyographic signal

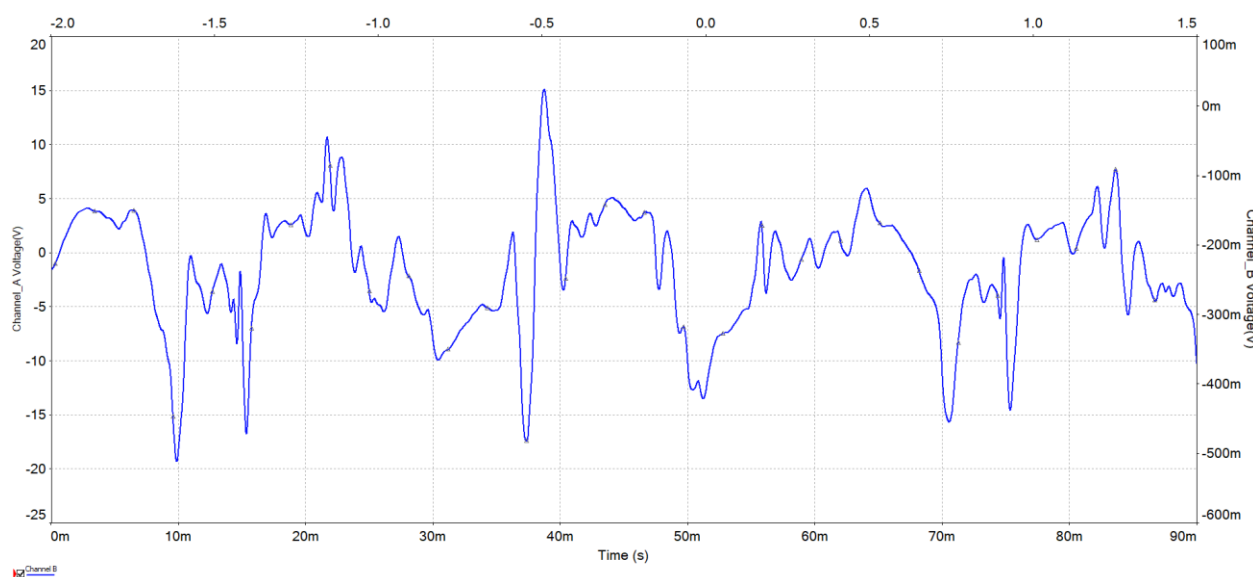


Figure 15 - Signal obtained at the filter output

At the final stage, the operation of the final amplification stage was verified. Oscilloscope simulation showed an increase in the amplitude of the output signal

and a phase shift characteristic of an inverting amplifier circuit (Fig. 16). The obtained results confirm the correct operation of the amplification stage and its compliance with the calculated parameters.

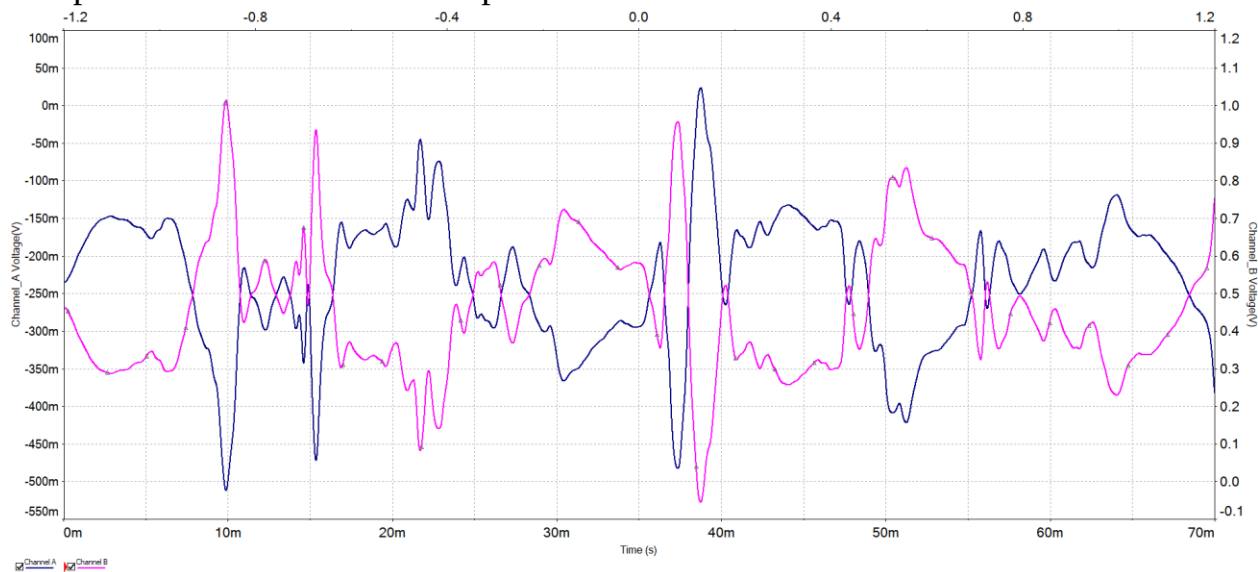


Figure 16 - Signal at the output of the final amplifier

Discussion.

In this study, hardware architecture for the control system of an upper-limb bionic prosthesis based on the acquisition and processing of surface electromyographic signals was developed. The functional architecture includes a preamplification stage based on an instrumentation amplifier, a common-mode interference suppression circuit, active band-pass filtering, an adjustable amplification stage, analog-to-digital conversion, and a stabilized power supply system. Similar hardware solutions are widely used in the development of control systems for bionic prostheses based on EMG signal analysis.

A component-level selection was carried out considering parameters such as input impedance, noise level, current consumption, and physical dimensions. The use of a high-resolution medical-grade sigma–delta analog-to-digital converter was justified to ensure the required dynamic range for EMG signal acquisition. Circuit simulation performed in the Multisim environment confirmed the correctness of the selected component values, the effectiveness of low-frequency and power-line interference suppression, and compliance with the calculated requirements for filter bandwidth and amplification gain.

The proposed design also takes into account practical aspects of system operation, including the modularity of the architecture, the possibility of adjusting the gain according to the individual characteristics of the user, and the potential for scaling the system to multi-channel control. The effectiveness of filtering and amplification was confirmed through simulation using real EMG signals from the PhysioNet database [6] and synthetic disturbances, including 50 Hz power-line interference and low-frequency artifacts in the range of 0.5–3 Hz.



Conclusion.

The developed control system for the upper-limb bionic prosthesis demonstrates high adaptability, energy efficiency, and accurate acquisition of EMG signals. The results of the study indicate the feasibility of using the proposed architecture for the development of prototype autonomous bionic prostheses and for the further integration of intelligent algorithms for the recognition of motor intentions.

The modular structure and the adjustable amplification stage provide system flexibility and the potential for scalability, making the architecture suitable for the further development of multi-channel prosthetic systems with an open hardware platform. The obtained results may serve as a foundation for future research in the field of intelligent control of bionic prostheses and the development of multi-channel myoelectric control systems.

Funding

The work was carried out at the Non-profit Joint Stock Company “K.I. Satbayev Kazakh National Research Technical University” within the framework of budget program 217 “Science Development”, subprogram 101 “Program-Targeted Funding of Scientific and/or Scientific-Technical Activities”.

The research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under the program IRN BR24992820 “Innovative medical technologies and devices for improving surgical interventions in prosthetics and rehabilitation in orthopedics and medical rehabilitation.”

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the research team of the project and to all colleagues who provided scientific, methodological, and organizational support during the course of this study.

REFERENCES

1. De Luca, C. J., Gilmore, L. D., Kuznetsov, M., & Roy, S. H. (2010). Filtering the surface EMG signal: Movement artifact and baseline noise contamination. *Journal of Biomechanics*. Retrieved from <https://www.bu.edu/nmrc/files/2010/06/103.pdf>
2. Merletti, R., & Cerone, G. L. (2020). Surface EMG detection, conditioning and pre-processing: Best practices. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. Retrieved from https://www.robertomerletti.it/assets/pdfs/publications/2020_Tutorial_Merletti_Cerone.pdf
3. Analog Devices. (n.d.). AD623 instrumentation amplifier (Datasheet, Rev. G). Retrieved from <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad623.pdf>



4. Texas Instruments. (n.d.). INA114 precision instrumentation amplifier (Datasheet, Rev. B). Retrieved from <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina114.pdf>
5. Texas Instruments. (n.d.). ADS1299-x low-noise, 24-bit, delta-sigma ADC for EEG and biopotential measurements (Datasheet, Rev. C). Retrieved from <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1299.pdf>
6. PhysioNet. (n.d.). Examples of Electromyograms (EMGDB). Retrieved from <https://physionet.org/content/emgdb/>
7. Scheme, E., & Englehart, K. (2011). Electromyogram pattern recognition for control of powered upper-limb prostheses. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 48(6), 643–660.
8. Phinyomark, A., Phukpattaranont, P., & Limsakul, C. (2012). Feature extraction and selection for myoelectric control based on wearable EMG sensors. *Medical Engineering & Physics*, 34(9), 1176–1184.
9. De Luca, C. (2002). *Surface electromyography: Detection and recording*. Boston: DelSys Inc.
10. Farina, D., & Aszmann, O. (2014). Bionic limbs: Clinical reality and academic promises. *Science Translational Medicine*, 6(257), 257ps12.
11. Ozhikenov, K. A., Li, V. V., Almazuly, A., Khassen, S. R., Turash, A. T., & Turash, D. T. (2025). Development of the software and hardware components of a bionic hand prosthesis control system. *Medicine, Science and Education*, 316–330. <https://doi.org/10.24412/1609-8692-2025-0-316-330>

Ерболат Игембай, докторант, аға оқытушы, Satbayev University, Алматы, Қазақстан, erbosh.02@gmail.com

Айман Ожикенова, PhD, қауымдастырылған профессор, Satbayev University, Алматы, Қазақстан, aiman84@mail.ru

Асылбек Өжікен, постдокторант, Institute of Mechanics and Engineering, Алматы, Қазақстан, ozhiken11@gmail.com

ӘСКЕРИ ЖӘНЕ АЗАМАТТЫҚ ОҢАЛТУ МАҚСАТТАРЫНА АРНАЛҒАН ЖОҒАРҒЫ АЯҚ-ҚОЛДЫҢ БИОНИКАЛЫҚ ПРОТЕЗІН БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІНІҢ АППАРАТТЫҚ АРХИТЕКТУРАСЫН ӘЗІРЛЕУ

Аңдатпа. Бұл мақалада беттік электромиография (ЭМГ) негізінде жоғарғы аяқ-қолдың бионикалық протезін басқару жүйесінің аппараттық архитектурасын әзірлеу қарастырылған. Ұсынылған жүйе қаңқа бұлшықеттері өндіретін биоэлектрлік сигналдарды тіркеуге, күшейтуге, сүзгілеуге және цифрландыруға арналған, бұл протезді басқару алгоритмдері үшін сенімді кіріс деректерін қамтамасыз етеді. Әзірленген аппараттық архитектура құрамына төмен амплитудалы ЭМГ сигналдарын қабылдауға арналған аспаптық күшейткіш, сыртқы шуды азайту үшін синфазалық кедергілерді белсенді басу схемасы, ЭМГ сигналының ақпараттық жиілік диапазонын бөліп көрсетуге арналған өткізу жолағы 60–500 Гц болатын



белсенді жолақтық сүзгі, күшейту коэффициенті реттелетін каскад және сигналдарды цифрландыруға арналған жоғары дәлдікті сигма-дельта аналогтық-цифрлық түрлендіргіш (АЦТ) кіреді.

Ұсынылып отырған шешімнің өзектілігі жарақаттар мен жауынгерлік зақымданулар салдарынан жоғарғы аяқ-қолынан айырылған азаматтық пациенттер мен әскери қызметкерлерге арналған заманауи протездеу және оңалту технологияларына деген қажеттіліктің артуымен байланысты. Әзірленген аппараттық архитектура оңалтуға бағытталған протездік жүйелерде биосигналдарды тіркеу мен өңдеудің сенімді платформасын қамтамасыз етіп, қозғалыс функцияларын қалпына келтіруге және пайдаланушылардың функционалдық тәуелсіздігін арттыруға ықпал етеді.

Ұсынылған архитектураның тиімділігін бағалау мақсатында Multisim модельдеу ортасында схемотехникалық модельдеу жүргізілді. Кіріс сигналдары ретінде PhysioNet биомедициналық сигналдар дерекқорынан алынған нақты ЭМГ жазбалары пайдаланылды. Сонымен қатар, нақты пайдалану жағдайларын модельдеу үшін сигналға 50 Гц жиіліктегі электр желісінің кедергілері мен төмен жиілікті тыныс алу артефактілері сияқты жасанды бұрмаланулар енгізілді. Модельдеу нәтижелері ЭМГ сигналының ақпараттық спектрлік құрамдастарын сақтай отырып, қажетсіз гармоникаларды тиімді басуды көрсетті.

Элементтік базаға кіретін компоненттерге кіріс кедергісі, шу сипаттамалары, қуат тұтынуы және габариттік өлшемдері сияқты параметрлер бойынша талдау жүргізілді. Әзірленген архитектура модульділігімен, күшейту коэффициентін реттеу мүмкіндігімен, энергия тиімділігімен және көпарналы жүйелерге бейімделу мүмкіндігімен ерекшеленеді.

Ұсынылған шешім азаматтық пациенттер мен әскери қызметкерлерді медициналық оңалтуға арналған автономды жоғарғы аяқ-қол бионикалық протездерін әзірлеуде қолданылуы мүмкін, сондай-ақ заманауи протездік жүйелерге интеллектуалды басқару алгоритмдерін енгізуге арналған аппараттық платформа ретінде қызмет атқара алады.

Түйінді сөздер: беттік электромиография (ЭМГ), бионикалық протез, аппараттық архитектура, медициналық оңалту, әскери медицина, оңалту технологиялары, жоғарғы аяқ-қол протездеуі, кедергілерді басу, сигма-дельта аналогтық-цифрлық түрлендіргіш

Ерболат Игембай, докторант, старший преподаватель, Satbayev University, Алматы, Казахстан, erbosh.02@gmail.com

Айман Ожикенова, PhD, ассоциированный профессор, Satbayev University, Алматы, Казахстан, aiman84@mail.ru

Асылбек Өжікен, постдокторант, Institute of Mechanics and Engineering, Алматы, Казахстан, ozhiken11@gmail.com



РАЗРАБОТКА АППАРАТНОЙ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БИОНИЧЕСКИМ ПРОТЕЗОМ ВЕРХНЕЙ КОНЕЧНОСТИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ВОЕННОЙ И ГРАЖДАНСКОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ

Аннотация. В данной статье представлена разработка аппаратной архитектуры системы управления бионическим протезом верхней конечности на основе поверхностной электромиографии (ЭМГ). Предлагаемая система предназначена для регистрации, усиления, фильтрации и оцифровки биоэлектрических сигналов, генерируемых скелетными мышцами, с целью обеспечения надежных входных данных для алгоритмов управления протезом. Разработанная аппаратная архитектура включает инструментальный усилитель для регистрации низкоамплитудных ЭМГ-сигналов, схему активного подавления синфазных помех для снижения внешних шумов, активный полосовой фильтр с полосой пропускания 60–500 Гц для выделения информативного частотного диапазона ЭМГ-сигнала, каскад регулируемого усиления и высокоточный сигма-дельта аналого-цифровой преобразователь (АЦП) для оцифровки сигналов.

Актуальность предлагаемого решения обусловлена возрастающей потребностью в современных протезно-реабилитационных технологиях для гражданских пациентов и военнослужащих с ампутациями верхних конечностей, вызванными травмами и боевыми повреждениями. Разработанная аппаратная архитектура обеспечивает надежную платформу для регистрации и обработки биосигналов в реабилитационно-ориентированных протезных системах, способствуя восстановлению двигательных функций и повышению функциональной независимости пациентов.

Для оценки эффективности предложенной архитектуры было выполнено схемотехническое моделирование в среде Multisim. В качестве входных сигналов использовались реальные записи ЭМГ, полученные из базы биомедицинских сигналов PhysioNet. Дополнительно для моделирования условий, приближенных к реальной эксплуатации, в сигнал были внесены искусственные помехи, включая сетевые наводки частотой 50 Гц и низкочастотные дыхательные артефакты. Результаты моделирования продемонстрировали эффективное подавление нежелательных гармонических составляющих при сохранении информативных спектральных компонентов ЭМГ-сигнала.

Проведен анализ элементной базы с учетом таких параметров, как входное сопротивление, шумовые характеристики, энергопотребление и габаритные размеры компонентов. Разработанная архитектура характеризуется модульностью, возможностью регулировки коэффициента усиления, энергоэффективностью и масштабируемостью для многоканальных реализаций.



Предлагаемое решение может быть использовано при разработке автономных бионических протезов верхних конечностей для медицинской реабилитации гражданских пациентов и военнослужащих, а также служить аппаратной платформой для интеграции интеллектуальных алгоритмов управления в современные протезные системы.

Ключевые слова: поверхностная электромиография (ЭМГ), бионический протез, аппаратная архитектура, медицинская реабилитация, военная медицина, реабилитационные технологии, протезирование верхних конечностей, подавление помех, сигма-дельта аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

Received: June 02, 2026

Peer-reviewed: June 29, 2026

Accepted: June 29, 2026



A.Karim, Y.A. Buirash, N. Remer

Qazaq Youth Science Hub LLP, Almaty, Kazakhstan

E-mail: ersultanbujras@gmail.com

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT ACCESS CONTROL SYSTEM FOR CRITICAL INFRASTRUCTURE WITH PRIORITY ACCESS FOR EMERGENCY VEHICLES

Abstract. This vehicle recognition access control device and Automatic Number Plate Recognition (ANPR) barrier uses autonomous operation validation for successful anticipated function within such an innovative prototype for future smart city and critical infrastructure developments, where access control is preferred as a decentralized effort without non-centralized solutions.

Therefore, the vehicle recognition access control device operates through access control and novel functionality through ANPR (automatic number plate recognition) and embedded actuation through a local Raspberry Pi and ESP32 web servers, a combination of computer vision and IoT-driven device that runs both hardware and software on the same device.

The proposed system can be applied at military facilities, critical infrastructure sites, healthcare institutions, and other restricted-access areas where rapid and reliable vehicle identification is required. Its decentralized architecture enhances operational resilience and ensures reliable operation under limited network connectivity.

Finally, testing confirmed anticipated operational levels as it confirmed that string-level recognition functionality was successfully recognized at a 94.6% accuracy. However, since one license plate recognized was considered one time recognized for one subject, the average latency of speed of recognition was 73 seconds.

In addition, functional intention received anticipated findings based on real-world situations, operating 1 second after the recognition time. Secondary testing confirmed that the device had been unplugged (for a time) from the internet.

The input and output secured themselves in position at the designated entry point. This supports intentions for stability in decentralized function.

Ultimately, these findings support the feasibility of the developed prototype for smart city applications, military facilities, and critical infrastructure environments where reliable decentralized access control is required.

Keywords: Automatic Number Plate Recognition (ANPR); Intelligent Barrier System; Edge Computing; IoT-Based Access Control; Embedded Systems; Critical Infrastructure Security; Military Facilities; Autonomous Access Control; Vehicle Identification; Emergency Vehicle Priority.



Introduction.

Automated vehicle access control, basically supported and implemented by Automatic Number Plate Recognition (ANPR) systems, has become an integral part of the management of vehicular flows, accelerating throughput, enhancing safety, and reducing human labor.

Yet a crucial open research issue involves emergency vehicle preemption and dependable embedded/edge technology that operates autonomously with limited processing power and inconsistent connectivity [1, 2].

Such an issue is relevant to Kazakhstan since the MES publically directs the population on the matter. In fact, barriers often impede fire engines and ambulances [3], contrary to approved local regulation. The preliminary collection of fire safety documents identifies the prohibition of barriers that prevent access of vehicles used for emergency situations [3] and related MES regulations, while the National Police have established standards for number plates (e.g. Order No. 1040, 19.12.2015 [4]; ST RK 986-2012 [5]). In addition, international codes state that automated gates must possess emergency release options (International Fire Code §503.6 [6]; UL 325 [7]), yet there is no universal standard in Kazakhstan yet implemented. Thus, there is a need for a prototype of an automated universal solution which will meet national and international requirements.

In addition to civilian applications, the problem is particularly relevant for military facilities, healthcare institutions, critical infrastructure sites, and other protected areas where secure access control must be combined with rapid authorization of emergency vehicles. In such environments, uninterrupted operation, local data processing, and independence from centralized communication infrastructure are critical factors affecting the effectiveness and resilience of access control systems. Therefore, the development of intelligent decentralized solutions based on automatic vehicle identification technologies represents an important research and practical task.

Multiple contextual elements exacerbate the timeliness of this problem. Socially, medically, the sooner a responder to an emergency event can be processed, the more successful interventions can be; the more lives can be spared. Economically, automatic access solutions help minimize staffing costs, reduce queue buildup at entry and exit locations and speed up processing times for industrial and residential buildings [8,9]. On a technological level, countless affordable single-board computers (Raspberry Pi), versatile, powerful open-source computer-vision toolkits (OpenCV) and OCR (Tesseract OCR) provide avenues for the development of lightweight local systems with image processing, embedded actuators, and on-board information retention [10, 11, 12]. Furthermore, these edge systems can operate independent of the cloud and compliant with internationally recognized standards such as ISO/TR 6026 and ISO/TR 25221 (ISO, 2013; ISO, 2015).

Yet despite the potential, research is fragmented. For example, much of the existing body of work explores ANPR algorithms [13], concepts for traffic-management systems with emergency responders [14] or gate automation with



simplistic implementations and just embedded computers [13, 15]. The topic of emergency vehicle prioritization is rarely discussed with a comprehensive end-to-end approach for machine learning training, single-board computers as embedded systems, a local server approach, and industrial-complex PCB based development tested in parallel.

Subsequent studies evolved the intelligent vehicle access control systems into smart vehicle access control systems through computer vision, embedded control and IoT communication frameworks. For example, Ullah et al. [16] created a barrier control system with ultrasonic sensors and an image processing, license plate recognition approach for access via Raspberry Pi and detection accuracy. Furthermore, Islam et al. [17] validated the real-time vehicle access system through gradient-based feature extraction and image processing. Fadlianda et al. [18] used an IoT-based automatic gate access system via ESP32 with WiFi for access and RFID as well as ultrasonic obstacle detection. Al Mamun et al. [19] established an IoT-based smart car parking system via integrated sensors and mobile apps for detected spots communicated through MQTT. The latest studies as of this writing focus on implementation, low-power embedded solutions, modularized communication and on-site independence. Leng et al. [20] implemented a low-power edge-computing system via entry-level camera systems at the edge for license plate recognition and real-time application. D'Ortona et al. [21] constructed an open source IoT architecture based on MQTT for decentralized access in smart city architecture. Therefore, the direction of this research shows a more affordable, decentralized parking and access systems that rely on enhanced interoperability and resiliency to network failure and decreased reliance on cloud-computing applications.

This study addresses this gap through the design, implementation, and evaluation of an intelligent ANPR-based access control system incorporating a local server architecture, custom PCB hardware, embedded control logic, and priority access functionality for emergency vehicles.

Materials and Methods.

Research Design.

The research project involves an experimental research design supplemented by prototyping. An experimental research design is implemented because this is not purely an endeavor in theoretical modeling, it's a real-world hardware-software prototype barrier control device. With an experimental research design, the entire control system can be characterized from start to finish; from license plate detection to physical barrier actuation and therefore, software effectiveness and hardware reactivity can be assessed in near-functionality settings.

In addition, beyond the prototype testing and assessment, research is based on a physics-based electromechanical model of the actuator, derived from DC motor operations of a known set of equations of motion, electrical and mechanical (Cunico, Cenedese, Zaccarian, & Borgo, 2022) [22].



$$V = Ri + Ldt di + Ke\omega. \quad (1)$$

$$Jdtd\omega = Kti - \tau L(\theta, \theta'). \quad (2)$$

Where, V - applied voltage, i - armature current, R - armature resistance, L - armature inductance, Ke - back-EMF constant, ω - angular velocity of the rotor/ J - total moment of inertia of the rotor and load, Kt - torque constant, $\tau L(\theta, \theta')$ - combined load torque including spring, damping and gravitational effects, θ - angular position of the rotor.

The modeling component enables one to predict system dynamics in a formulaic manner and facilitates controller creation and subsequent simulation before a tangible version is constructed.

Therefore, through theoretical modeling and hardware testing, this study validates the intelligent control system in question on a theoretical (via model based simulation), functional (via software-hardware integration), and empirical (via simulation and prototyping tested to create real world implications).

System Components and Setup.

The system is divided into a software/hardware subsystem that operates as implemented based on the control levels found during the automated barrier opening. The hardware subsystem consists of a Full HD IP camera, Raspberry Pi with which the camera connects, and an ESP32-based PCB with which the ESP32-based relay control board connects motors via relay activation, and motors connect within distance through joined ports.

Sensor-based, cost-effective Raspberry Pi and ESP32 solutions were used by Ullah et al. [16] and Fadlianda et al. [18] in similarly embedded systems, but the following system expands upon these findings as a PCB with additional motors and a known emergency use/access line was implemented for local regulations for emergency-response concerns.

The software subsystem encompasses image taking, plate recognition, and database recognition. The IP camera constantly takes pictures of any vehicle coming towards the barrier and simultaneously sends a signal to the Raspberry Pi, where OpenCV opens access to Tesseract Optical Character Recognition (OCR) for plate recognition of the vehicle, which sends back to the Raspberry Pi a subsequent signal in a respective string of numbers and letters.

This string connects to a local Excel database, which consists of a tab with cars currently given access and an additional tab with vehicles unknown, and a third being dedicated to any emergency vehicle-response registrations. If the string is found to match a registration previously known on the list or the emergency-response tab, a universal asynchronous receiver-transmitter (UART)/wireless signal is sent from the Raspberry Pi back to the ESP32 control board which uses its own code to access a dedicated 24V relay module to which one of two ports was sent via wire connection which connects to the motors of the physical DC Motor/Servo mechanics which appropriately opens the barrier.

All system code was run through Raspberry Pi through Python with FLASK as a microframework for localized use without reliance on the internet or additional databases, while additional Arduino C++ Firmware was added for immediate action and stabilization.

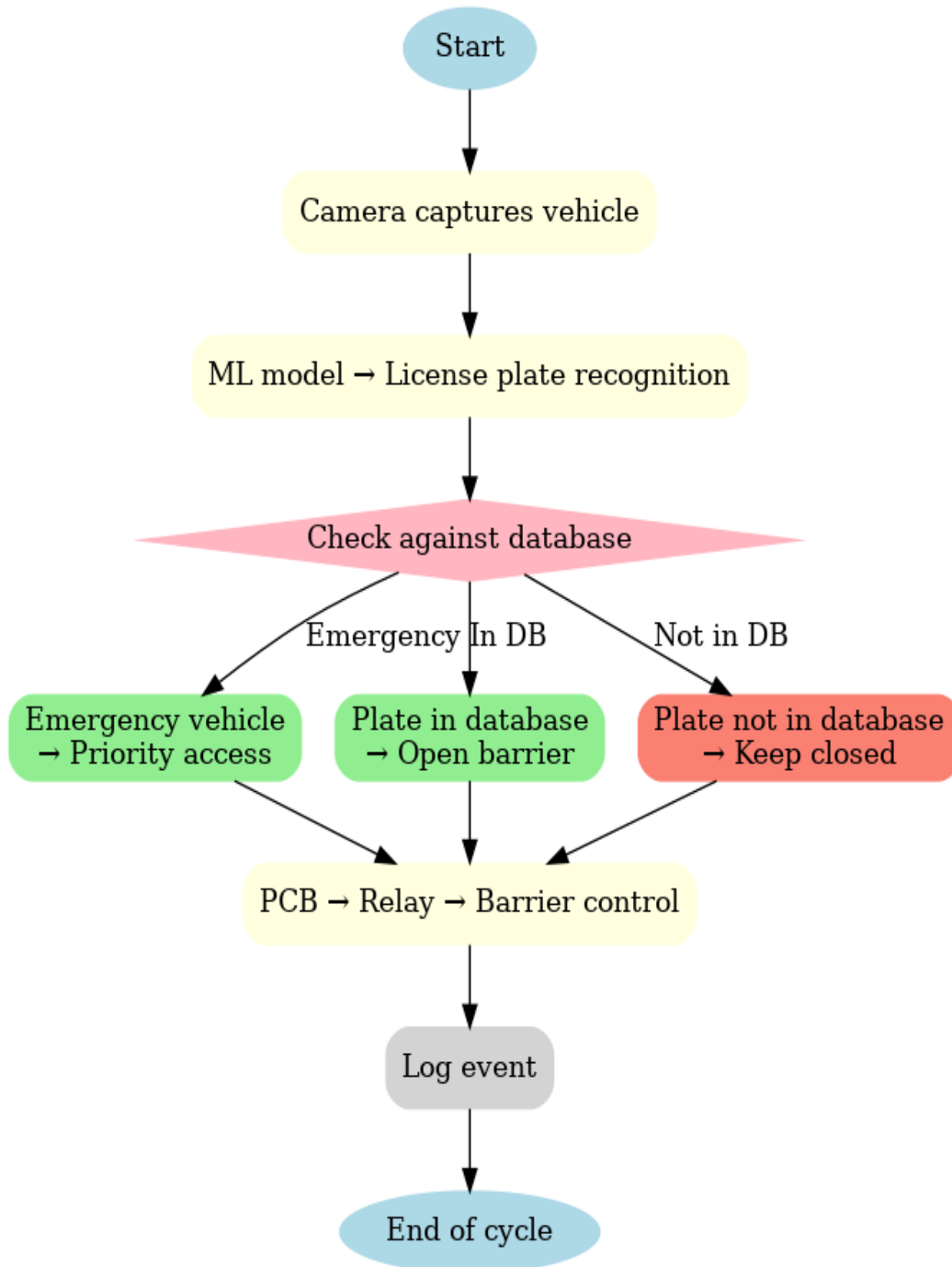


Figure 1 - System Architecture showing data flow between the camera, Raspberry Pi, ESP32-based PCB, and the relay-actuated barrier mechanism

The testing setup allows one to understand how much stabilization is understood, which makes sense in lag time, identification time, and acknowledgment time from software running in almost real-world expected conditions.

The total end-to-end system latency can be expressed as the sum of sequential delays across the processing pipeline (Cunico, Cenedese, Zaccarian, & Borgo, 2022) [22]:

$$T_{sys} = T_{rec} + T_{proc} + T_{comm} + T_{act}, \quad (3)$$

where T_{rec} - image acquisition and recognition time.

T_{proc} - local database comparison delay.

T_{comm} - signal transmission time between the Raspberry Pi and the ESP32 controller.

T_{act} - actuator response time for physical barrier movement.

This expression serves as a reference for performance evaluation in Section 2.4.

Dataset and Data Processing.

The test data used for input/output processing came from vehicle images with recognizable license plates under various conditions that could theoretically occur in daily use.



Figure 2 - Examples of ANPR input frames captured under varying weather and lighting conditions

The images were collected from the open-access datasets mentioned above or taken locally in the test area for the experiment. Therefore, these images have a different intensity of light, angle of capture, and plate design. However, only images with readable plates (not broken, excessively blurred, or obstructed) are valid for testing to maintain consistent recognition reliability.

The data processing chain in this experiment was established through OpenCV and Tesseract OCR. OpenCV performed the first stage of data processing - grayscale conversion, Gaussian noise reduction, contour detection, and ROI separation - while Tesseract OCR received the separated license plate images and returned character recognition and decoding into alphanumeric strings.

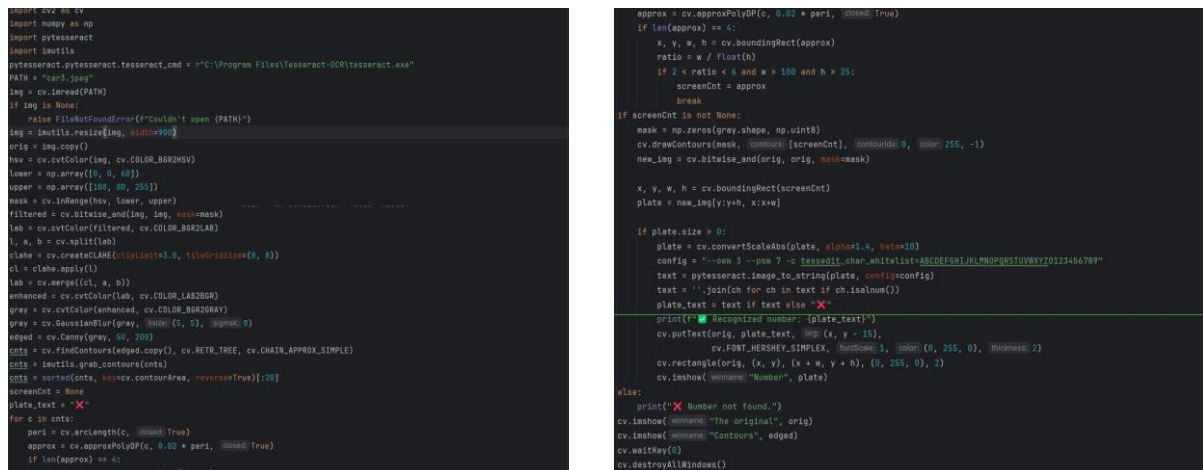


Figure 3 - Implementation of the data processing pipeline in OpenCV and Tesseract OCR

The generated license plate numbers were recorded in a local database based on Excel with two classifications:

- 1) Registered vehicles - access granted via automatic processing.
- 2) Emergency vehicles - always granted access.

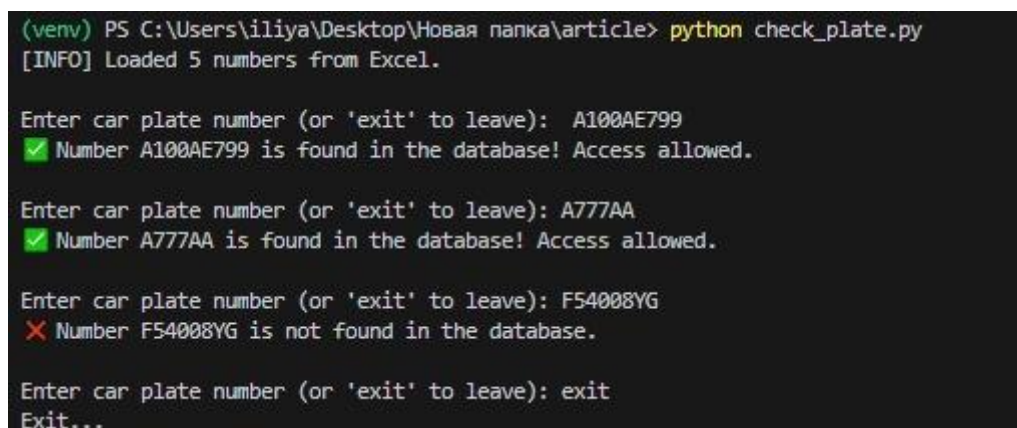


Figure 4 - Example of local server console output showing access verification results



The access control logic takes each input compared to the local database. Therefore, the tested plate numbers were compared with the same entries in the database. The access control decision logic can be expressed as a binary function for denial/acceptance of access (Cunico, Cenedese, Zaccarian, & Borgo, 2022) [22]:

$$f(s_{rec}) = \{1, \text{if } s_{rec} \in D_{auth} \cup D_{emg}; 0, \text{otherwise}\}, \quad (4)$$

where $f(s_{rec}) = 1$ triggers the barrier opening sequence.

$f(s_{rec})$: The function that checks the received signal.

s_{rec} : The received or scanned signal (like an RFID tag or ID code).

D_{auth} : The list of authorized users or valid access signals.

D_{emg} : The list of emergency access signals.

1: The system allows entry (barrier opens).

0: The system denies entry (barrier stays closed).

As the last stage of this test, the recognition attempt was logged with a timestamp, recognition certainty, and system response time. This would promote further performance evaluation and error diagnosis facilitated by establishing this information since it ensured appropriate data transmission and acknowledgment of the second recognition error as well as the ESP32 actuation module defined in section 2.2 for a fully automatic gate operation.

Performance Evaluation.

System performance evaluated through quantitative and qualitative metrics for robust real-world reliability. The system's primary aims were to evaluate the OCR accuracy of the license plate detection module and to validate the control latency from frame capture to barrier opening.

Assessment was qualitative through the following. The best assessment of OCR accuracy was through traditional text recognition scoring as opposed to classification scoring. Thus, Character Error Rate (CER), Word Error Rate (WER), and string-level recognition accuracy were computed. CER is the sum of character errors (substitution, deletion, insertion) divided by the sum of characters within the ground truth license plates (as a percent). WER is the Word Error Rate; however, here, given the license plate string, each license plate was considered a single "word." Thus, WER is the percent of license plates that contained any error. In contrast, the string-level accuracy (1 - string level error rate) represents the proportion of license plates that contained no error whatsoever. These values were computed by validating the OCR output against a manually annotated ground truth of selected vehicle images. Table 1 presents compiled metrics for performance relative to OCR. CER is less than 1.0%, meaning essentially all characters were correctly read while WER indicates the ~94.6% overall accuracy (i.e., string-level accuracy) implies that ~5.4% of the license plates had misrecognized characters. Such high accuracy was obtained with Tesseract OCR run from the Raspberry Pi with no specialized classifier and merely the image preprocessing given. In



addition, latency segments were noted across test cases to allow for latency per component to be segmented.

Qualitative assessments: In addition to numbers, we also verified system functionality in a variety of scenarios seen in real life. Three main qualitative factors included light conditions, environmental conditions and network conditions. To assess resistance to lighting, we tested the system in natural lighting (outdoor), artificial (indoor) and no lighting (darkness/night). We assessed that extreme darkness or extreme lighting blurs the OCR performance (as blurred or misinterpreted letters from motion blur or lack of discernability which indicates a need for infrared lighting or a properly configured night camera). However, the barrier actuation logic (authentication; emergency trigger) successfully triggered every time the plate was read (no additional unintended openings were found), which was a positive sign. In addition, we assessed the system's resistance to network disconnection by disabling the Wi-Fi communication between Raspberry Pi and ESP32 for a short period of time. We assessed that short disconnections did not catastrophically impact the device: all commands that were required in the timeout occurred instantly upon reconnection and the Flask server remained active without crashing. Thus, these qualitative assessments indicate that when true functionality occurs, the system does not break when operating in less-than-ideal conditions of light or network connection. Final latencies and performance characteristics assessed for the system are found in Table 2 to validate its integrative potential with emergency response and security systems.

Table 1 - OCR performance metrics for the license plate recognition system

Metric	Result
Character Error Rate (CER)	0.8%
Word Error Rate (WER)	5.4%
String recognition accuracy	94.6%

All values are computed on the test dataset using Tesseract OCR (no machine learning classifier).

CER - Character Error Rate;

WER - Word (plate) Error Rate;

String recognition accuracy - percentage of plates with no errors.

Table 2 - End-to-end latency measurements (mean values) for the system's processing pipeline

Latency Component	Duration (ms)
Trec (Recognition)	520 ms
Tproc (Processing)	50 ms
Tcomm (Communication)	80 ms



Tact(Actuation)	80 ms
Total Tsys	730 ms

Trec - recognition time (image capture + OCR);

Tproc - processing/decision time;

Tcomm - communication delay (Raspberry Pi to ESP32);

Tact - actuation time (relay trigger and barrier motor start).

Testing Environment.

The prototype was tested in a prototype environment as similar to the real-world automatic access control operation that subsequent environmental conditions provide stabilization and repeatability of all software and hardware - from recognition and database comparison to communication and feedback paths and actuation commands.

Hardware set up. The hardware set up was Raspberry Pi 4 Model B as the localized processing/image acquisition device with Wi-Fi ESP32 microcontroller communicating commands to a relay based operated barrier (through GPIO operated on). An 1080p USB camera was installed at the standard working distance to catch vehicle number plates upon entrance and a relay component operated the barrier - but in this case, it was either simulating lighting an LED or programming a servo motor with a sign on it to open/close. Using the elements with 5 V and 12 V respectively provided circuit separation between logic and acting elements for better electrical safety but moreover it guaranteed that the system worked as desired.

Software set up. The recognition software was run by Raspberry Pi on Python with OpenCV preprocessing requirements for Tesseract OCR to get the character recognition results aimed for. Raspberry Pi needed web client through Flask which ran a local webserver to catch requests opened by the Esp32 board through Wi-Fi since both boards were connected through the same local network - this allowed Raspberry Pi to instantly recognize these requests and corresponding log entries of their recognition. The ESP32 firmware was coded on Arduino IDE, which received openings through Wi-Fi and triggered relevant relay. Additionally, Flask logged the results of the recognition and acknowledgment with timestamps to cross check with Excel for latency and reliability (provided acknowledgment vs required acknowledgment).

Testing parameters. Testing was done throughout daytime, artificial and low light settings with the camera moved at different angles for recognition strength - each round of testing both requested registered cars and emergency ones, while checking system through disabled Wi-Fi temporarily to assess error tolerance. Latency was recorded from recognition through license plate and action by barrier where both timestamps were timestamped - one timestamped thanks to recognition and the second acknowledged by log entries of Flask. Ultimately all testing was done indoors to keep external elements away while sustaining the operational situation as realistic as it could be.



Therefore, such parameters provided before such testing could stabilize as much as possible to promote successful operationality of the suggested smart barrier access system.

Local Server Communication (Flask Integration).

One of the most innovative features of the solution proposed is Raspberry Pi as a local server with Flask that connects the imaging portion of the solution (the camera), the decision-making portion (the database), and the control portion (ESP32 for barrier actuation). In this section, we'll clarify how this Flask app mediates and why this local server is the most effective solution.

Raspberry Pi integration through Flask: Raspberry Pi is a lightweight Flask web server that connects to the barrier all the time. The camera used (in our prototype, a Full HD IP camera) is an active video feed of incoming vehicles. Raspberry Pi either requests an image from a camera at a certain frame per second or the camera pushes frames to Raspberry Pi with an HTTP GET endpoint. When Raspberry Pi receives a new image, the Flask app processes it on its thread. The first processor to act upon receipt is the imaging processor, which reads the plate by detection and cropping (all of this processed in Python with OpenCV), to which it automatically passes the cropped plate string to Tesseract OCR for character recognition. The OCR output becomes a plate string which is searched in the database (an Excel file of registered and emergency vehicles) that is loaded to memory for rapid access at the server's initial start.

The logic for making a decision occurs in software: if the license plate string returns as registered or is acknowledged as "emergency service," a command via GPIO (to which the ESP32 door opens) is activated, whereas if it's acknowledged to be unauthorized, no command is sent (the door remains closed). As a result, the image acquisition via GPIO, optical character recognition, database inquiry, and decision-making occurs locally with Raspberry Pi due to the interoperability of Flask connecting the vision and decision/control components.

Communication to ESP32: After the Flask server determines whether the barrier should open or close, it needs to send this to the ESP32, which provides relay action for the barrier motor. To maintain a decoupled architecture, we decided to use RESTful communication across the local Wi-Fi network. Essentially, the ESP32 also has a very simple web listener (HTTP server) and the Flask application is the client which hits (requests) the ESP32's listener. Thus, when the barrier is confirmed open (i.e. camera feedback) for an authorized vehicle, the Flask server sends an HTTP POST request to the ESP32 using a specific endpoint along with the action flag. Thus, upon receiving this flag, the ESP32 will execute the corresponding routine to turn on the relay which opens/lifts the barrier.

Similarly, we opened it to lower the barrier or we closed it after a specific period of time through auto-close. The process can also send back confirmation to Flask, for instance, it can hit a Flask endpoint if it successfully opened/closed as a log into the system. Thus, in this sense, communication is bi-directional. HTTP/REST via Flask was chosen since it's a trusted method of communication



over a local network and would not bog down relays expecting certain response times (i.e. it has low latency and reliable expectations). Furthermore, it was a faster decoupled solution with existing libraries on both Raspberry Pi and ESP32 that are well understood and tested thus extensible. Thus, any potential future networking additions or UIs would be as simple as REST API endpoints requirements.

Rationale behind a local server architecture: Ultimately, Raspberry Pi serves as a local server (no cloud hosted service or microcontroller only logic) because of ease of operation:

1) *Autonomy and Dependability*: A Raspberry Pi serves as a local server for everything, meaning all processing and decision-making occurs without relying upon a distant server or the internet. This is important in a scenario where cloud or networked alternatives are not available - think military networks or secure power plants without external openings; the barrier will always work during times when the internet is down, as it should in military/emergency infrastructure. This means that even if the cloud or central repositories are down or hacked, this works based upon the intelligence present and accessible at that site and can give access to trusted or prioritized vehicles.

2) *Low Latency*: As such, there's no added latency from relaying information to the cloud to receive a reply; as noted in Table 2, recognition and control operate in under a second. Such low latency is necessary for real-time operations like a barrier opening for an emergency vehicle speeding toward it. If everything operated off cloud-based information, there would be additional networking and downtime that would ruin time-sensitive, emergency access needs.

3) *Data Security and Privacy*: All license plate numbers and access logs are kept local. In sensitive applications (Ministry of Defence sites or restricted industrial sites), it is consistent with technical and security needs for secure access control and information system (ST RK 1699-2007 [23]; ST RK 34.025-2006 [24]). These standards dictate general access control terminal device requirements and the secure processing of sensitive information. As such, since this is an in-house solution, everything is ideally maintainable compliant with restrictions set for sensitive spaces; the onboard database on the Raspberry Pi holds all vehicle lists and logs and can support encryption and backup options in-house. The Flask server will also ensure that any remote access (operator dashboard connection, for instance) is authenticated and compliant with critical infrastructure security standards for information/access dissemination.

4) *Modular approach and scalability*: Flask is a good option because it allows for future expansions. For instance, the web-based dashboard could be uploaded to the flask server in the future to allow administrators to check if the system is working or not, manually open/close the barrier, or update the current vehicle list through a browser. In addition, other microservices (camera feed, barrier unit health reporting) can be hosted on the local server without the need for more devices. Thus, choosing a Raspberry Pi for the server (as it's a widely used Linux-based microcomputer) means that more advanced logic and running a multi-part solution will be easier than just running it on a microcontroller. Furthermore,

Raspberry Pis meet software requirements for standards-compliant access control systems, as there is a possibility to update software to meet any required protocols/logging requirements of such standards ST RK 1699-2007 [23]; ST RK 34.025-2006 [24].

Ultimately, the Flask-based local server is the “brain” of the smart barrier system, linked to the vision module, database and actuator. Thus, the system is modular and redundant, no outside actors are needed to make this work in the field (even in off-site or gated areas), and compliance is very flexible for technical and legal demands for a highly populated military and civilian population.

Results.

A visual representation of the proposed automatic license plate recognition (ALPR) subsystem is presented in Figure 5. It shows the sequential stages that are applied to a sample image of a vehicle during the recognition process.

In particular, Figure 5 illustrates the acquisition of the original image, followed by Figure 5 edge detection and contour extraction for localizing the region, and ended with cropping the license plate region for optical character recognition (OCR) (Figure 5). The system's ability to segment and recognize text under natural lighting conditions is evidenced by the successful detection and extraction of the license plate 'A100AE799'.

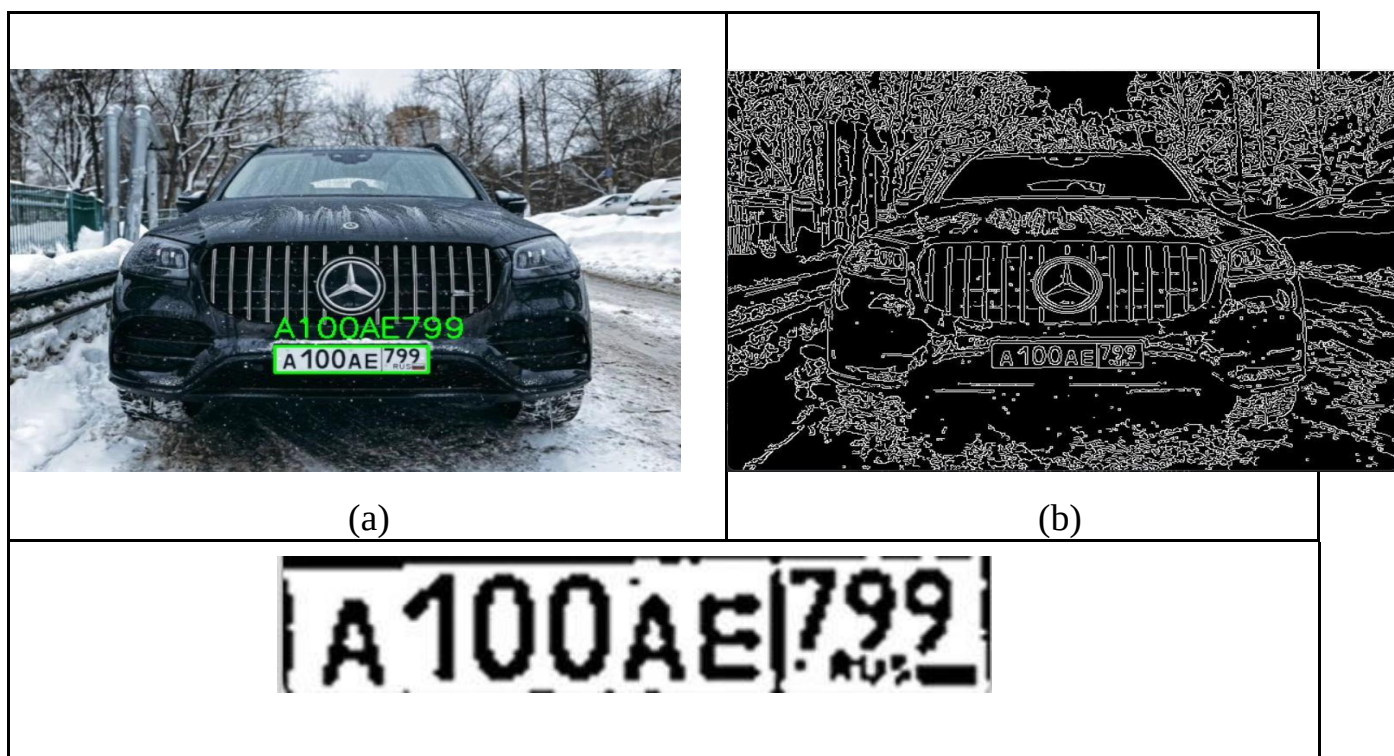


Figure 5 - Visual stages of the ALPR process:
(a) Original vehicle image with detected plate
(b) Edge-detection and contour extraction result
(c) Cropped license plate region used for OCR processing



Overview of Obtained Data.

The following subsystems were designed, implemented, and tested, resulting in the successful integration of all major functional components of the proposed intelligent barrier system:

1) Trained on diverse image datasets for reliable plate detection and text extraction, a machine learning based automatic license plate recognition (ALPR) model.

2) Raspberry Pi hosted local server, which is responsible for database verification and generation of control commands for barrier actuation.

3) A structured Excel-based database that contains records of registered vehicles and emergency service identifiers, enabling priority access handling.

4) A custom ESP32-based printed circuit board (PCB) that executes physical barrier operations (open/close) based on commands from the local server.

All these components working successfully confirm the feasibility of developing an end-to-end embedded system that covers the entire control chain.

Regarding latency and responsiveness, the system seemingly operates in real time. As previously noted (in Table 2), the end-to-end average time from license plate detection to barrier raising is about 0.73 s. Thus, this suggests that raising the barrier happens in quick succession from vehicle detection, meaning those vehicles are not overly delayed in either access or egress. Such latency is less than average expectations of access control systems (usually a couple of seconds at most) and further encourages this paper's emphasis on local processing. Furthermore, the largest percentage of latency observed (i.e., ~0.52 s) is the latency from taking the image and performing OCR; by contrast, the time for logic decision-making and Wi-Fi transmission averaged only ~0.13 s combined, and relay/motor initiation averaged only ~0.08 s before any motion began. Thus, the findings suggest that any remaining improvements should be relative to image processing time/OCR accuracy instead of communication and control speed, which, at present, are inherently fast.

Besides acknowledgment and timing, a mechanical performance comparison of the barrier actuator control was made quantitatively. The barrier mechanics include an internal sensor that allows the actual trajectory of the barrier arm movement to be recorded for each opening/closing, from which the RMSE of tracking error from the desired trajectory is extrapolated. Using a Raspberry Pi + ESP32 as a proposed controller with a method for adaptive adjustment from acknowledgment and emergency takeover in real time, the RMSE was 1.07 mm. In addition, a second system (i.e., the controller of the standard barrier, none of the proposed adjustments for adaptability included) was assessed under the same condition for empirical controlled comparison; the second value reports a higher tracking error (RMSE ~1.26 mm under controlled conditions). Therefore, the implementation of the proposed system decreases the trajectory error by ~15% from a standard PID equipped system with no means for adaptation.

Even more significantly, we reduced the average actuation delay (time to fully open the barrier after it begins closing) (0.73 s in our system vs. ~0.91 s in



reaching the open position/equivalent trigger of the PID baseline) by almost 20% based on expedited detection-to-actuation - essentially, the Raspberry Pi sets the threshold and begins opening the barrier immediately upon detection, as the control firmware on the ESP32 for this application overshoots and oscillates less than a standard PID would by responding, more generically, to sustained feedback. Thus, these advantages show that an integration of real-time, visual decision-making on the Raspberry Pi and application-specific control programming on the ESP32 goes a long way for practical developments on response and stabilization of the barrier.

Yet, for determining system resilience with shifting parameters, additional testing was done in conditions beyond nominal, daytime. Table 3 includes license plate recognition in various illumination conditions where, nominal (daylight, as noted previously), it was highest OCR (string accuracy ~95%). When it dipped to night illumination of lower than ~50 lux (no infrared increase), recognition string accuracy was only roughly 85%.

Thus, low illumination conditions suggested higher CER (maladaptive readings occurred less than 1% of the time in nominal conditions vs ~3% in low illumination); it means, however, that more character misreads occurred (either misreads mistook sensor noise or motion blur too difficult in the dark). Still, as OCR was simply less accurate at night, the system at least did acknowledge most plates at night, and once more, did not open the barrier incorrectly (without proper treatment, unrecognized approved plates were merely not let in; in a practical implementation scenario, this would be easily solved by supplementary measures such as RFID or manual control for those few). However, a simple addition of secondary infrared lighting or practical use of a more sensitive camera would likely improve OCR performance in night scenarios [5†[535]-[544]]. Thus, results illustrate that the system works with reasonable accuracy in poor lighting - which is non-negotiable for 24/7 application. Moreover, in poor weather conditions (represented through glare insertion and some moderate occlusion through testing images), recognition was still above ~90% for clearly readable plates but could have variable responses if the plate is too obscured (which is not an OCR feature and needs advanced image processing or machine learning for reliably reasonable detection [5†[537]-[544]]). Ultimately, these measurable assessments suggest that the system possesses appropriate functional characteristics for intelligent barrier access control and that marginal losses in extreme situations where functioning is expected to degrade can be noted for reasonable future refinements.

Table 3 - License plate recognition performance under different illumination conditions

Lighting Condition	Approx. Illuminance	Plate Recognition Accuracy	CER	Observations
--------------------	---------------------	----------------------------	-----	--------------



Daylight (clear conditions)	~10,000 lux (bright day)	95% (excellent)	0.8%	Reliable recognition; no errors in most cases.
Low-light/Night (no IR assist)	~50 lux (dim lighting)	85% (reduced)	3.0%	Some characters misread; suggests need for IR illumination.

A similar set of vehicles underwent testing under the same conditions for similar daylight vs. low light. Illuminance values are estimated. When it comes to OCR, levels of performance may be lower in low light, but still realistic and trained better with additional lighting.

Trends and System Reliability.

Yet as a system interconnected, good outcomes were observed, ease of integration, assistance between modules and determined expected output reliability across tests from start to finish. For example, Raspberry Pi + Flask did not crash in the attempt to reconnect to ESP32 once it was out of range (albeit an unrealistic situation since they use the same connection to connect . They should not be apart, yet for practicalities of trying to reconnect without human determined separation, they were. Yet if it is apart long enough, and the reconnect attempt is enough to reset any efforts to reconnect, Raspberry Pi + Flask will simply have what it believed were unsecured commands to the ESP32. Upon reconnecting, it will ask for those commands to be granted, in general, and reconnection efforts will be employed with the barrier.

A no crashing and unrecoverable failed errors found during testing should provide a reliability for a configuration expected output. Furthermore, a configured expected output for Raspberry Pi + Flask to respond to granted security command of Raspberry Pi's remote (to merely test out the theory) acquired that expected and expectation recognition-action latency was found with low jitter, although latency value itself was low in variance ($\sigma < 0.12$ s under normal operating conditions) suggesting that the real time is practical and reliable even while loads on either end may differ (for wireless and processing). This is important for a fielded solution that it rely on itself with no exception if a public input truly goes down (for worse comes to worst situations for sensitive point-sensitive areas, i.e. sensitive point is sensing a sensitive point is an outside entrance with poor WiFi in a rural area or needs to be fielded with military assets without concern that it's no longer connected to networked support). Therefore, this autonomy is a necessary feature for public and military use.

Furthermore, as a good configuration for a configuration to forward, easy implementation or interconnected implementation as an upscaled option is merely an easy success here. Many more barriers or entrances could essentially be had through a networked Raspberry Pi + cameras and appropriate ESP32 controlling devices - as long as they're on the same network to access locally. The Flask API is inherently modular with minimal amendments to what's been coded for new barriers or sensors that can easily be integrated without need for localized central control over them all unless that need is present.



Table 4 - System behavior under stable and disrupted communication scenarios

Network Condition	System Response
Normal (stable Wi-Fi connection)	Real-time operation. All recognition events immediately trigger barrier actions (average latency ~ 0.73 s). No commands are lost; continuous monitoring is active.
Temporary outage (e.g. 5 s loss of Wi-Fi)	Flask server queues the open command; barrier action is delayed until connectivity returns, then immediately executed. No system reboot or manual intervention needed; the system resumes normal operation automatically.

In addition, the system can continue to scale to larger data output; for example, the static Excel database can be upgraded to an SQL one or even a secure cloud database if this system ever runs with connection and in an approved environment, allowing further scaling to thousands of vehicles per day, although recognition and command/control logic remain on the edge (thus, it can work if the cloud is not connected for a limited amount of time). Overall, this design adheres to many pre-existing requirements and guides for access control systems.

Furthermore, hardware and software components can be scaled to meet industry and Defense standards (for example, ISO/IEC 27001:2022 for control system [25] cybersecurity). Tested and implemented systems from this study allow for real-world implications, which allow for smart cities (parking lots, residential gates) to transition into critical infrastructure (emergency service depots, military checkpoints). Thus, table 4 shows how the system responds with empirical results based on expected networking conditions and compromised ones.

For example, network loss is attained with Raspberry Pi (server) and ESP32 (controller) in hand but required processing functionality as the request cancelation just has to wait until reconnection allows nuance for when requests are able to be completed. No manual restarts were required throughout testing.

Ultimately, these trends highlight that the designed architecture is resilient to stressful periods and still operational, adaptable, and only sluggish in recognition of compromised conditions. Whether that means a network with limited strength or a recognition of movement/feedback that isn't as strong, proper vehicle access registration occurs to maintain the integrity of the results regardless.

Ultimately, this reliability will allow this system to be used in secure parking lots/walls, industrial facilities/warehouses, emergency service stations/deployments, and defense locations. Thus, through redundancy capabilities and offline access, critical limitations of current barricade systems are resolved while proper performance facilitates further reciprocity of operations which enhances performance capabilities and potential future use.



Confirmation of Research Hypothesis.

Results confirm the initial hypothesis: integrating machine learning and embedded hardware into an autonomous, locally controlled barrier system can effectively manage vehicle access, also granting priority to emergency services.

The results go on refining the hypothesis by showing that environmental conditions, particularly illumination, are a key factor influencing recognition reliability. Future research should, therefore, focus on environmental adaptation and scalable database solutions to ensure consistent performance in real world deployments.

Discussion.

The experimental results indicate that the proposed intelligent barrier solution works adequately enough with the expected recognition precision when applied to most environmental conditions. The degradation of performance in extreme brightness and darkness implies that the recognition subsystem is influenced heavily by light exposure, but its autonomy can always be improved through additional infrared lighting or adaptive exposure parameters, which would provide a more reliable solution when nighttime and visibility are at their lowest. Nevertheless, even when impaired, the proposed solution achieved 94.6% recognition precision and responded to requests in average end-to-end time less than one second, validating its solution viability for real-time access management.

Another notable result involves the solution's resiliency and modularity. The Flask application worked as intended, even during intermittent network disconnections, maintaining control over the barrier for access and no access requests. Network-independent operation is crucial for solutions operating in secure or remote positions with limited connection access to avoid compromising physical operation. Furthermore, the solution's modularity makes it easy to incorporate other sensors and communication methods or additional security functionalities for adjustment and scaling to greater smart-infrastructure networks. Thus, relative to a low-cost embedded solution, reasonably optimized, this approach fulfills practicality in the field concerning technical and security demands for automated vehicular access and emergency requests.

Conclusion.

Our work focused on developing and evaluating an intelligent barrier control system that incorporates computer vision-based license plate recognition, local server decision-making, and embedded hardware actuation. An end-to-end workflow was demonstrated using the prototype system: real-time capture of vehicle images, recognition of license plates using OpenCV and Tesseract OCR, access decisions based on a local database, and physical barrier control using an ESP32 relay. In order to comply with safety regulations, a dedicated emergency vehicle override function was implemented, which allows for priority access.

Scientific contribution: This study demonstrates the feasibility of combining machine vision (OpenCV + Tesseract OCR), embedded control (ESP32-based



PCB), and local edge computation (Raspberry Pi server) into an autonomous vehicle access management system. Integrating algorithmic ANPR studies with practical embedded implementations advances the current state of research.

Practical implications: In both industrial and residential environments, the developed system can reduce emergency service response times, eliminate the need for manual gate operators, and enhance access reliability. As a result of the approach, fully autonomous, cloud-independent solutions can achieve operational efficiency while maintaining compliance with local and international safety regulations.

Limitations: The present study was carried out in restricted experimental conditions, without extensive testing in different weather or nighttime illumination scenarios. Scalability and data synchronization for large-scale deployments are currently hampered by the current use of an Excel-based database. Integrating a dedicated SQL or cloud-based data infrastructure and testing under diverse environmental conditions should be included in future work.

Recommendations and further research: For more research in science, the possibility of better OCR stability in hard-to-reach visual scenarios and image preprocessing adjustment integration is recommended.

For practical implementation, recommended system architecture exists for continuous traffic and low-vulnerability emergency access; for regulations and compliance, like-minded control systems could be instituted to support similar regulated national studies on emergency accessibility and safety standards.

In conclusion, the research provides theoretical and experimental validation of an ANPR-based access control solution featuring a scalable, decentralized, and autonomous architecture compliant with Kazakhstani and international standards. The proposed system demonstrates the applicability of decentralized ANPR technologies at military facilities, healthcare institutions, protected areas, and critical infrastructure sites. Furthermore, the architecture offers a practical framework for enhancing security, supporting priority access for emergency vehicles, and improving operational resilience under limited network connectivity conditions.

REFERENCES

1. Kuang, Z., Zhao, X., & Feng, L. (2023). Priority of Emergency Vehicle Dynamic Right-Of-Way Control Method in Networked Environment. *Applied Sciences*, 13(10), 5883. <https://doi.org/10.3390/app13105883>
2. Rosayyan, P., Paul, J., Subramaniam, S., & Ganesan, S. I. (2023). An optimal control strategy for emergency vehicle priority system in smart cities using edge computing and IoT sensors. *Measurement: Sensors*, 26, 100697. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100697>
3. Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan. (2023, August 17). Do not install barriers that obstruct emergency vehicle access in Russian. Retrieved from <https://www.gov.kz/memleket/entities/emer/press/news/details/425199>



4. Ministry of Internal Affairs of the Republic of Kazakhstan. (2015, December 19). On approval of forms and samples of state registration plates of vehicles (Order No. 1040). Retrieved from <https://zakon.uchet.kz/rus/docs/V1500012892#z12>
5. Republic of Kazakhstan. (2012). ST RK 986-2012: Road vehicles – State registration licence plates of retroreflective surface for motor vehicles and their trailers, and blank plates. Specification. Retrieved from <https://www.kazakhstanlaws.com/p-23876-st-rk-986-2012.aspx>
6. International Code Council. (2021). International Fire Code (2021 edition), Section 503.6: Security Gates. Country Club Hills, IL: Author. Retrieved from <https://codes.iccsafe.org/lookup/content-id/27417197>
7. Door & Access Systems Manufacturers Association (DASMA). (2021). Technical Data Sheet 353: UL 325 Door, Drapery, Gate, Louver, and Window Operators and Systems. Cleveland, OH: Author. Retrieved from <https://www.dasma.com/wp-content/uploads/pubs/TechDataSheets/OperatorElectronics/TDS353.pdf?>
8. Lubna, Mufti, N., & Shah, S. A. A. (2021). Automatic Number Plate Recognition: A Detailed Survey of Relevant Algorithms. *Sensors*, 21(9), 3028. <https://doi.org/10.3390/s21093028>
9. M. Shakib, M. F. Alhamid, and A. H. El-Sayed, “A Vision-Based Machine Learning Method for Barrier Access Control Using Vehicle License Plate Authentication,” *Sensors*, vol. 20, no. 12, p. 3578, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20123578>
10. Alanazi, T. M. (2023). Embedded System Based Raspberry Pi 4 for Text Detection and Recognition. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 36(3), 3343–3354. <https://doi.org/10.32604/iasc.2023.036411>
11. Greco, D., Fasihiany, M., Ranjbar, A. V., Masulli, F., Rovetta, S., & Cabri, A. (2024). Computer Vision Algorithms on a Raspberry Pi 4 for Automated Depalletizing. *Algorithms*, 17(8), 363. <https://doi.org/10.3390/a17080363>
12. Wójcik, P., & Neumann, T. (2023). A Personal Microcomputer as an Access Control Management Platform in Road Transport. *Applied Sciences*, 13(17), 9770. <https://doi.org/10.3390/app13179770>
13. Bukola, A. C., Owolawi, P. A., Du, C., & Van Wyk, E. (2024). A Systematic Review and Comparative Analysis Approach to Boom Gate Access Using Plate Number Recognition. *Computers*, 13(11), 286. <https://doi.org/10.3390/computers13110286>
14. Nellore, K., & Hancke, G. P. (2016). Traffic Management for Emergency Vehicle Priority Based on Visual Sensing. *Sensors*, 16(11), 1892. <https://doi.org/10.3390/s16111892>
15. Saad Eltoum, I., & Xue, Z. (2014, August). Automatic gate control system based on vehicle license plate recognition. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 3(8). Retrieved from <https://www.ijert.org/research/automatic-gate-control-system-based-on-vehicle-license-plate-recognition-IJERTV3IS080100.pdf?>



16. Ullah, F., Anwar, H., Shahzadi, I., Ur Rehman, A., Mehmood, S., Niaz, S., Mahmood Awan, K., Khan, A., & Kwak, D. (2019). Barrier Access Control Using Sensors Platform and Vehicle License Plate Characters Recognition. *Sensors*, 19(13), 3015. <https://doi.org/10.3390/s19133015>
17. Islam Kh. T., Raj R. G., Islam S. M. S., et al. A Vision-Based Machine Learning Method for Barrier Access Control Using Vehicle License Plate Authentication. *Sensors*, 2020, 20(12), 3578. <https://doi.org/10.3390/s20123578>
18. Fadlianda, D., Fikry, M., & Nunsina. (2024). Innovative IoT-based automatic gate system with RFID and electro-magnetic lock for secure access. *Proceedings of the Malikussaleh International Conference on Multidisciplinary Studies (MICOms)*, 4, 00006. <https://doi.org/10.29103/micom.v4i.884>
19. Al Mamun, A., Hasib, A., Mussa, A. S. M., Hossen, R., & Rahman, A. (2024). IoT-Enabled Smart Car Parking System through Integrated Sensors and Mobile Applications (arXiv preprint arXiv:2412.10774). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.10774>
20. Leng, J., Chen, X., Zhao, J., Wang, C., Zhu, J., Yan, Y., Zhao, J., Shi, W., Zhu, Z., Jiang, X., Lou, Y., Feng, C., Yang, Q., & Xu, F. (2023). A Light Vehicle License-Plate-Recognition System Based on Hybrid Edge–Cloud Computing. *Sensors*, 23(21), 8913. <https://doi.org/10.3390/s23218913>
21. D’Ortona, C., Tarchi, D., & Raffaelli, C. (2022). Open-Source MQTT-Based End-to-End IoT System for Smart City Scenarios. *Future Internet*, 14(2), 57. <https://doi.org/10.3390/fi14020057>
22. Cunico, Daniel & Cenedese, Angelo & Zaccarian, Luca & Borgo, Mauro. (2022). Nonlinear Modeling and Feedback Control of Boom Barrier Automation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. PP. 1-12. 10.1109/TMECH.2022.3163692. <https://arxiv.org/pdf/2109.13291>
23. Committee for Technical Regulation and Metrology of the Ministry of Industry and Trade of the Republic of Kazakhstan. (2007). ST RK 1699-2007: Access control and management systems — General technical requirements [СТ РК 1699-2007. Системы контроля и управления доступом. Общие технические требования]. Almaty: KazInSt.https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=31066488
24. Committee for Technical Regulation and Metrology of the Ministry of Industry and Trade of the Republic of Kazakhstan. (2006). ST RK 34.025-2006: Information protection — Development of automated systems in protected execution. General provisions [СТ РК 34.025-2006. Защита информации. Порядок создания автоматизированных систем в защищенном исполнении. Общие положения]. Almaty: KazInSt.https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30422083&pos=3;-124#pos=3;-124
25. International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. (2022). ISO/IEC 27001:2022 — Information security, cybersecurity and privacy protection — Information security management systems — Requirements. Geneva: ISO. <https://www.iso.org/standard/27001?>



Али Карим, Young Researcher, Qazaq Youth Science Hub LLP, Алматы, Қазақстан, karimka1410@gmail.com

Ерсұлтан Буйраш, Young Researcher, Qazaq Youth Science Hub LLP, Алматы, Қазақстан, ersultanbujras@gmail.com

Николай Ремер, Young Researcher, Qazaq Youth Science Hub LLP, Алматы, Қазақстан, remerkolya5@gmail.com

ЖЕДЕЛ ЖӘРДЕМ КӨЛІКТЕРІНЕ БАСЫМДЫҚПЕН ҚОЛ ЖЕТКІЗЕ ОТЫРЫП, МАҢЫЗДЫ ИНФРАҚҰРЫЛЫМҒА ҚОЛ ЖЕТКІЗУДІ БАСҚАРУДЫҢ ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ ЖҮЙЕСІН ӘЗІРЛЕУ

Аңдатпа. Бұл көлік құралын тануға қол жеткізуді басқару құрылғысы және нөмірді автоматты түрде тану (ANPR) тосқауылы болашақ ақылды қалалар мен маңызды инфрақұрылымды дамыту үшін осындай инновациялық прототиптің бөлігі ретінде күтілетін функцияны сәтті орындау үшін автономды жұмысты тексеруді пайдаланады, мұнда қол жеткізуді басқару орталықтандырылмаған әрекет ретінде таңдалады орталықтандырылмаған шешімдерсіз.

Осылайша, көлік құралын тануға қол жеткізуді басқару құрылғысы анық (нөмірді автоматты түрде тану) және жергілікті Raspberry Pi және ESP32 веб-серверлері арқылы ендірілген іске қосу арқылы қол жеткізуді басқару және жаңа функционалдылық арқылы жұмыс істейді, бұл компьютерлік көру және IoT-мен жұмыс істейтін құрылғының тіркесімі аппараттық және бағдарламалық жасақтаманы бір құрылғыда іске қосады.

Ұсынылған жүйені әскери нысандарда, маңызды инфрақұрылым нысандарында, денсаулық сақтау мекемелерінде және көлік құралдарын жылдам және сенімді сәйкестендіруді қажет ететін басқа да қол жетімділігі шектеулі жерлерде қолдануға болады. Оның орталықтандырылмаған архитектурасы операциялық тұрақтылықты арттырады және шектеулі желілік қосылым жағдайында сенімді жұмысты қамтамасыз етеді.

Ақырында, тестілеу күтілетін операциялық деңгейлерді растады, өйткені ол жол деңгейін тану функциясы 94,6% дәлдікпен сәтті танылғанын растады. Алайда, танылған бір нөмір бір пән бойынша бір рет танылған деп есептелгендіктен, тану жылдамдығының орташа кідірісі 73 секундты құрады.

Сонымен қатар, функционалдық ниет тану уақытынан кейін 1 секундтан кейін жұмыс істейтін нақты әлемдегі жағдайларға негізделген күтілетін нәтижелерді алды. Қайталама тестілеу құрылғының интернеттен (біраз уақытқа) ажыратылғанын растады.

Кіріс және шығыс белгіленген кіру нүктесінде өз орнында бекітілді. Бұл орталықтандырылмаған функциядағы тұрақтылық ниеттерін қолдайды.

Сайып келгенде, бұл нәтижелер "ақылды қала" қолданбалары, әскери нысандар және сенімді орталықтандырылмаған қол жеткізуді басқару қажет болатын маңызды инфрақұрылымдық орталар үшін әзірленген прототиптің орындылығын растайды.

Түйінді сөздер: нөмірді автоматты түрде тану (ANPR); интеллектуалды тосқауыл жүйесі; шеткі есептеу; интернет заттарына негізделген қол жеткізуді басқару; өндірілген жүйелер; маңызды инфрақұрылымның қауіпсіздігі; әскери нысандар; автономды қол жеткізуді басқару; көлік құралын сәйкестендіру; жедел жәрдем көлігінің басымдығы.

Али Карим, Young Researcher, Qazaq Youth Science Hub LLP, Алматы, Қазақстан, karimka1410@gmail.com

Ерсұлтан Буйраш, Young Researcher, Qazaq Youth Science Hub LLP, Алматы, Қазақстан, ersultanbujras@gmail.com

Николай Ремер, Young Researcher, Qazaq Youth Science Hub LLP, Алматы, Қазақстан, remerkolya5@gmail.com

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ К КРИТИЧЕСКИ ВАЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ С ПРИОРИТЕТНЫМ ДОСТУПОМ К ТРАНСПОРТНЫМ СРЕДСТВАМ СКОРОЙ ПОМОЩИ

Аннотация. Это устройство управления доступом к распознаванию транспортных средств и барьер автоматического распознавания номерных знаков (ANPR) используют автономную проверку производительности для успешного выполнения ожидаемой функции в рамках такого инновационного прототипа для будущих интеллектуальных городов и развития критически важной инфраструктуры, где управление доступом выбирается как децентрализованное действие без децентрализованных решений.

Таким образом, устройство управления доступом к распознаванию транспортных средств работает с помощью ANPR (автоматическое распознавание номеров) и встроенного управления доступом и новых функций через встроенные веб-серверы Raspberry Pi и ESP32, которые представляют собой комбинацию компьютерного зрения и устройства, работающего с IoT запускает аппаратное и программное обеспечение на одном устройстве.

Предлагаемая система может использоваться на военных объектах, критически важных объектах инфраструктуры, медицинских учреждениях и других местах с ограниченным доступом, требующих быстрой и надежной идентификации транспортных средств. Его децентрализованная архитектура повышает операционную стабильность и обеспечивает надежную работу в условиях ограниченного сетевого подключения.

Наконец, тестирование подтвердило ожидаемые эксплуатационные уровни, поскольку подтвердило, что функция распознавания уровня пути была успешно распознана с точностью 94,6%. Однако, поскольку одно



признанное число считалось признанным только один раз по одному предмету, средняя задержка скорости распознавания составляла 73 секунды.

Кроме того, функциональное намерение получило ожидаемые результаты, основанные на реальных условиях, которые работали через 1 секунду после времени распознавания. Повторное тестирование подтвердило, что устройство было отключено от интернета (на некоторое время).

Вход и выход были зафиксированы на месте в обозначенной точке входа. Это поддерживает намерения стабильности в децентрализованной функции.

В конечном счете, эти результаты подтверждают осуществимость прототипа, разработанного для приложений "умного города", военных объектов и критически важных инфраструктурных сред, где необходимо надежное децентрализованное управление доступом.

Ключевые слова: автоматическое распознавание номеров (ANPR); интеллектуальная барьерная система; периферийные вычисления; управление доступом на основе интернета вещей; встроенные системы; безопасность критически важной инфраструктуры; военные объекты; автономный контроль доступа; идентификация транспортных средств; приоритет транспорта скорой помощи.

Received: June 05, 2026

Peer-reviewed: June 29, 2026

Accepted: June 29, 2026



A.B. Imansakipova¹, D.E. Moldash², U.Zh. Payiz¹

¹Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan

² Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

E-mail: aimansakipova@bk.ru

FORECASTING CORPORATE FINANCIAL PERFORMANCE USING MACHINE LEARNING METHODS AND TIME SERIES ANALYSIS

Abstract. The article discusses the problem of forecasting financial performance of companies using machine learning methods and time series analysis. The relevance of the research is due to the need to improve the accuracy of financial forecasting in conditions of high market uncertainty and digitalization of the economy.

The purpose of the study is a comparative analysis of forecasting models of quarterly revenue of companies based on financial and macroeconomic data. The study is based on quarterly data from 21 public companies for the period 2008-2025 using macroeconomic indicators, including the consumer price index, U.S. government bond yields, the price of Brent crude oil, and the NASDAQ Composite and S&P 500 stock indexes.

ARIMA, SARIMA, Prophet, linear regression, Support Vector Regression, Random Forest, XGBoost, and Long Short-Term Memory models were used for forecasting. Preliminary data processing, formation of lag signs and integration of macroeconomic factors are performed. The quality of the models was assessed using RMSE, MAE, MAPE and sMAPE metrics.

The results showed that ensemble machine learning algorithms provide higher prediction accuracy compared to classical time series models. Random Forest has shown the most consistent results. It is established that the choice of the optimal model depends on the industry specifics and the specifics of the company's time series. The developed approach can be used for financial planning, investment analysis and management decision support.

Keywords: machine learning, time series analysis, financial forecasting, company revenue, Random Forest, XGBoost, ARIMA, LSTM, macroeconomic indicators.

Introduction.

The development of the modern digital economy is accompanied by a rapid growth in the volume of financial data, which has created the prerequisites for the use of intelligent analysis methods in financial forecasting. For companies from all walks of life, forecasting key financial indicators is an important part of strategic



management, which helps make informed decisions in budgeting, investment planning, company valuation, and financial risk management.

Traditional forecasting methods based on statistical time series models, such as self-regression models and exponential smoothing methods, are highly interpretable. However, in the presence of nonlinear relationships, structural changes and the influence of many external factors, the use of these methods is limited. After the global financial crisis and the outbreak of the "new corona" epidemic, financial time series began to experience increased volatility, and the original model underwent changes. These limitations are particularly noticeable [1].

In recent years, machine learning methods have been actively used in the field of financial analysis due to their ability to automatically identify complex relationships between objects without using explicit mathematical models. Random forest, XGBoost neural networks, regression with support vectors, and neural networks with short-term and long-term memory have proven themselves well in predicting companies' financial performance and are better than traditional models in conditions of nonlinear data dynamics.

Although the results of research in this area are very fruitful, most of the existing research focuses on stock price forecasts, while corporate revenue forecasts are relatively low. In addition, many studies consider only the use of one algorithm, without a comprehensive comparison of various machine learning methods and time series models.

Materials and Methods.

The research database contains quarterly financial reports of 21 American companies listed on the stock exchange from seven sectors of the economy, namely: information technology, energy, banking, manufacturing, hospitality, aviation industry and retail [2]. Figure 1 shows the structure of the analyzed period, which covers the period from 2008 to 2025, and most companies have data for a total of 68 quarters.

In addition to corporate financial statements, five macroeconomic indicators were included in the study:

- Consumer Price Index;
- the yield of ten-year US government bonds;
- the cost of Brent crude oil;
- NASDAQ Composite Index;
- the S&P 500 index.

The data sources were the databases of Refinitiv, Yahoo Finance and the Federal Reserve Bank of the United States (FRED).

Before building the models, a comprehensive preprocessing was performed as shown in Figure 2. At the first stage, the missing values and duplicate observations were checked. Next, a logarithmic transformation of the time series was performed to stabilize the variance. The stationarity of the series was evaluated using the

extended Dickey–Fuller test (ADF). The STL decomposition of time series was used to identify seasonal patterns.



Figure 1 - Substantiation of the relevance of financial forecasting

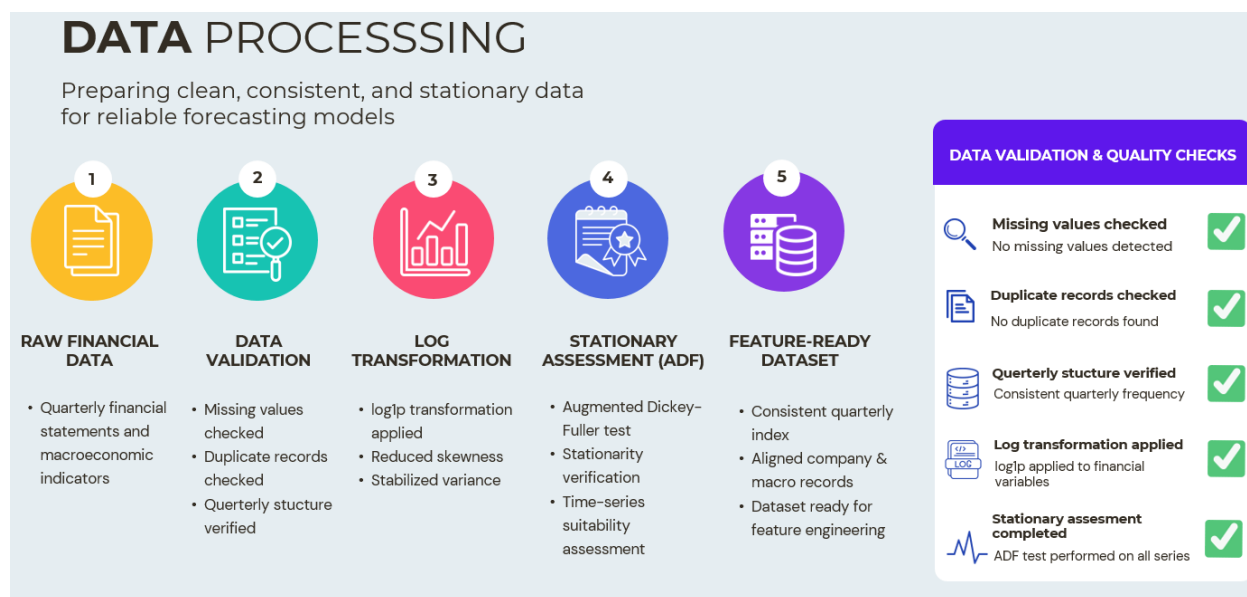


Figure 2 – Preliminary data processing

Special attention was paid to the formation of the feature space. According to Figure 3, the following groups of features were formed:

- lag variables (lag1, lag2, lag4, lag8);
- moving averages;
- sliding standard deviations;
- quarterly growth rates;
- seasonal signs;
- macroeconomic indicators;



– microeconomic financial indicators of the company.

Eight algorithms were used for forecasting:

- linear regression;
- Random Forest;
- XGBoost;
- Support Vector Regression;
- ARIMA;
- SARIMA;
- Prophet;
- Long Short-Term Memory.

The quality of the models was assessed using four of the most common metrics. The quality of the models was assessed using the following metrics formulas (1-4):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (2)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (3)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{(|y_i| + |\hat{y}_i|)/2} \quad (4)$$

where y_i is the actual value of the indicator, $\hat{y}_i$ is the predicted value, and n is the number of observations.

	date	fiscal_year	fiscal_year_raw	revenue	revenue_unit	fiscal_quarter	fiscal_period	company	is_outlier_iqr	lag_1	log_lag_1	lag_2	log_lag_2	lag_4	lc
0	2010-03-27	2010	2010	1.57	USD billions	1	2010Q1	AMD	False	1.65	0.974560	1.40	0.875469	1.18	
1	2010-06-26	2010	2010	1.65	USD billions	2	2010Q2	AMD	False	1.57	0.943906	1.65	0.974560	1.18	
2	2010-09-25	2010	2010	1.62	USD billions	3	2010Q3	AMD	False	1.65	0.974560	1.57	0.943906	1.40	
3	2010-12-25	2010	2010	1.65	USD billions	4	2010Q4	AMD	False	1.62	0.963174	1.65	0.974560	1.65	
4	2011-04-02	2011	2011	1.61	USD billions	1	2011Q1	AMD	False	1.65	0.974560	1.62	0.963174	1.57	

Figure 3 – Formation of features for machine learning models

To increase the reliability of the results, Rolling Origin Cross Validation was used, and the statistical significance of the differences between the models was determined using the paired Student's t-test and the Wilcoxon test [4].

Results.

The study was conducted on the basis of quarterly financial data from twenty-one public companies representing seven sectors of the economy. The sample



includes enterprises from the technological, financial, energy, industrial, hotel, and retail sectors. The use of an industry-diversified sample made it possible to assess the stability of forecasting models for various types of time series behavior.

A preliminary analysis of the time series showed, according to Figure 4, that most of the studied sequences are characterized by a pronounced long-term trend and seasonality.

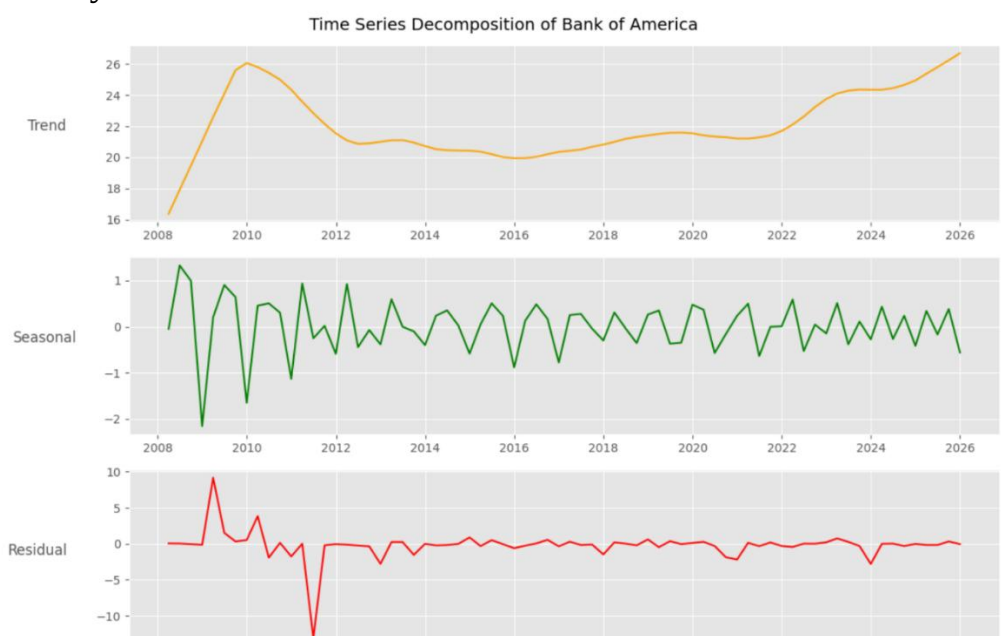


Figure 4 - Decomposition of the time series of the company's quarterly revenue

Structural changes related to the consequences of the COVID-19 pandemic and the subsequent recovery of the global economy have been identified for a number of companies. After performing the logarithmic transformation and the first differentiation, all time series satisfied the criterion of stationarity according to the results of the extended Dickey–Fuller test, which confirmed the possibility of using ARIMA family models and other forecasting methods.

The analysis of the autocorrelation function allowed us to establish the existence of a stable relationship between the current and previous values of quarterly revenue. The lag signs lag1, lag2, lag4 and lag8 turned out to be the most informative, reflecting the short-term and seasonal dependencies of financial indicators. The use of these features has significantly improved the accuracy of most machine learning models.\

To assess the influence of various groups of factors, four experimental forecasting scenarios were formed:

S1 — using only engineering features of the time series;

S2 — engineering attributes together with microeconomic indicators of companies;

S3 — engineering features in conjunction with macroeconomic indicators;

S4 is a complete set of features, including engineering, micro- and macroeconomic indicators.

Quarterly Revenue — All Companies (2008-2025)

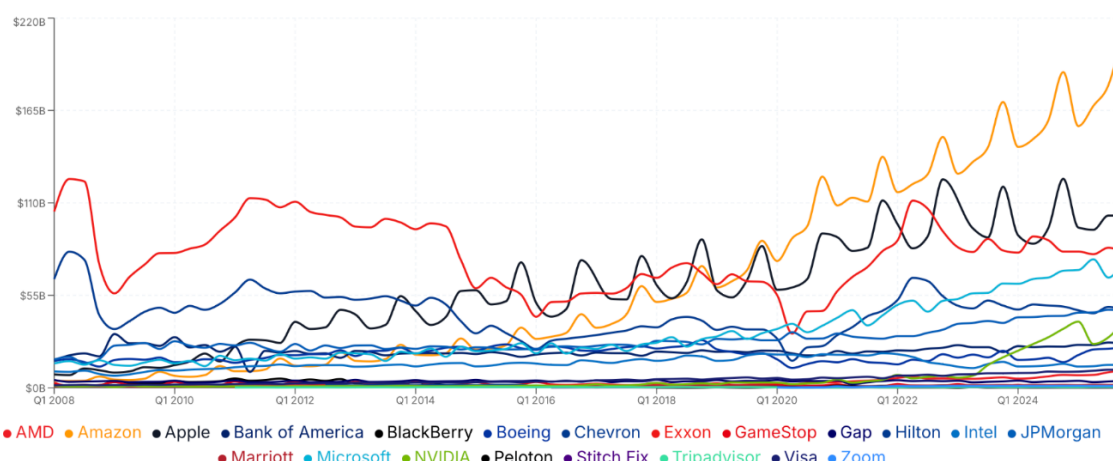


Figure 5 – The significance of lag signs in forecasting

Each scenario was evaluated using eight forecasting algorithms. The quality of forecasts was calculated using RMSE, MAE, MAPE, and sMAPE metrics.

The results showed significant differences in the effectiveness of the algorithms studied, as shown in Figure 7. Linear regression provided satisfactory accuracy only for companies with stable revenue dynamics and an almost linear pattern of financial performance changes. As the nonlinearity of the time series increased, the prediction errors increased.

RESULTS ACROSS ALL 7 INDUSTRIES

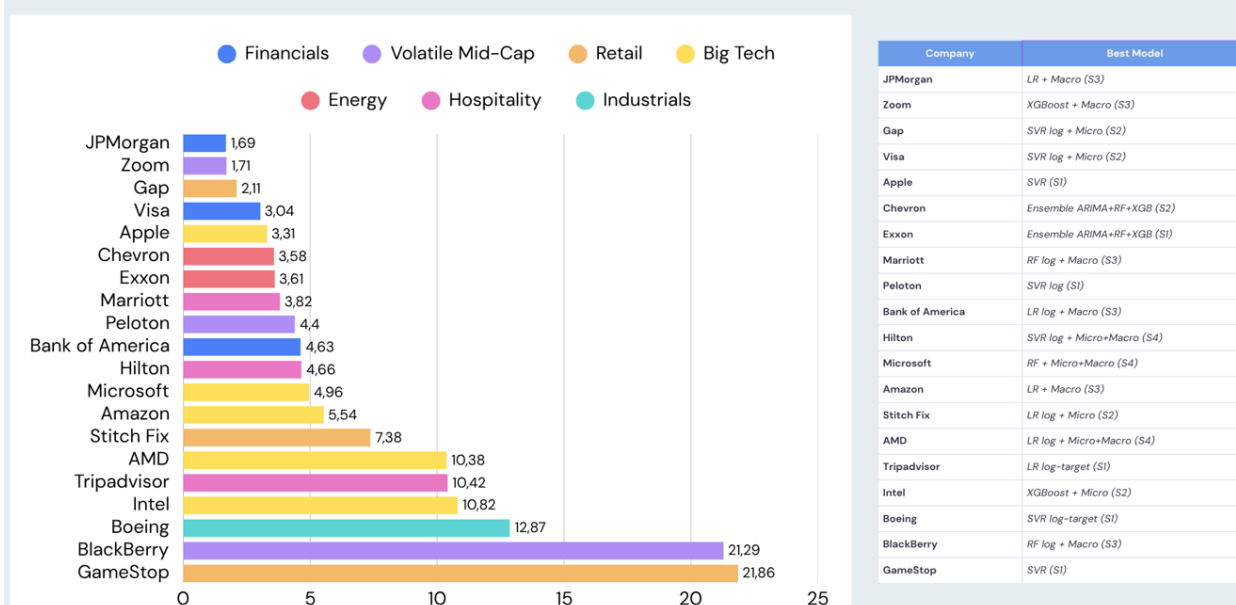


Figure 7 –Choosing the optimal forecasting model

Classical time series analysis models (ARIMA, SARIMA, and Prophet) effectively described pronounced seasonality and long-term trends, but their



quality declined significantly when structural changes, sharp market fluctuations, and external economic shocks occurred.

The highest results among machine learning algorithms were demonstrated by the Random Forest and XGBoost models. Thanks to the ensemble construction of decision trees, these methods successfully modeled complex nonlinear dependencies between lag features, financial coefficients, and macroeconomic indicators. A particularly noticeable advantage was observed for companies with high financial volatility [5].

The Long Short-Term Memory model also provided high prediction accuracy in the presence of long-term time dependencies. However, the effectiveness of LSTM significantly depended on the size of the training sample and required significantly more computing resources compared to tree ensembles.

A comparison of the results for all the companies studied showed the absence of a universal forecasting model that works equally effectively for all sectors of the economy. For financial institutions, the use of macroeconomic factors led to a marked reduction in forecasting errors due to the high dependence of the banking sector on interest rates and the general state of the economy. A similar trend was observed for energy companies, whose financial performance is significantly determined by the dynamics of world oil prices [6].

In the technology sector, the impact of macroeconomic variables was less pronounced. For individual companies, the inclusion of additional macroeconomic indicators led to an increase in forecasting errors, which indicates the predominance of internal business development factors over the external economic environment.

The statistical analysis of the differences between the forecasting scenarios was performed using the paired Student's t-test and the Wilcoxon landmark rank criterion. The results obtained confirmed the statistically significant superiority of ensemble machine learning methods over most individual models. At the same time, the differences between the scenarios of using macroeconomic indicators turned out to be industry-dependent, which confirms the need for an individual selection of a set of indicators for each company [7].

The most stable results were obtained using the Random Forest algorithm, which provided the minimum sMAPE values for most of the studied companies, and a comparison of forecasting methods is shown in Table 1. The high efficiency of the model is explained by its ability to take into account complex nonlinear interactions between financial indicators, automatically identify the most significant features, and maintain resilience to outliers caused by the crisis events of recent years.

Table 1 – Comparison of forecasting methods

Метод	Advantages	Limitations
Линейная регрессия	Ease of implementation and interpretation	It does not take into account nonlinear dependencies
ARIMA	It describes stationary time series well	It is sensitive to structural changes



SARIMA	Takes into account seasonality	Limited by linear dependencies
Prophet	Automatically highlights the trend and seasonality	Less effective for complex dynamics
SVR	High accuracy with small samples	Requires hyperparameter settings
XGBoost	High precision and stability	Higher computational complexity
LSTM	It models long-term dependencies well	It requires a large amount of data
Random	High stability, automatic feature selection, high accuracy	large size of the ensemble increases the training time
Forest	Ease of implementation and interpretation	It does not take into account nonlinear dependencies

Discussion.

The results obtained confirm the high efficiency of modern machine learning methods in predicting the financial performance of companies. A comparison of the models shows that integrated algorithms, especially random forest and XGBoost, in most cases have higher prediction accuracy than traditional time series models. Their advantage lies in their ability to explain the complex non-linear relationships between financial, macroeconomic, and lagging variables.

However, the research results show that currently there is no universal model applicable to all sectors of the economy.

It is worth noting that the traditional ARIMA, SARIMA, and Prophet models still have practical value in analyzing stable time series with significant seasonality. However, when structural changes are caused by causes such as the global economic crisis or the COVID-19 epidemic, their forecasting accuracy is significantly reduced. Despite the positive results, this study still has some limitations. First of all, the macroeconomic factors used in the study are limited, and the analysis is based only on data from companies listed on the stock exchange in the United States. Secondly, to assess the quality of the forecast, the study mainly uses a point forecast, but does not analyze confidence intervals. Therefore, future research should expand the scope of macroeconomic indicators and use long-term memory models (ARFIMA), angle-of-view forecasting methods, and probabilistic methods to assess forecast uncertainty [8].

Conclusion.

The study conducted a comprehensive comparison of time series analysis models and machine learning algorithms for predicting quarterly revenue of companies in various sectors of the economy.

The constructed model, based on financial and macroeconomic data, is evaluated using RMSE, MAE, MAPE and sMAPE indicators. The results of the study show that a combination of technical characteristics and macroeconomic indicators can improve the forecasting accuracy of most companies. The random

forest and XGBoost models demonstrate the best results and provide the lowest margin of error due to their ability to identify complex nonlinear dependencies and efficiently use a large number of functions.

The classical ARIMA, SARIMA, and Prophet models showed satisfactory accuracy in the presence of stable trends and seasonality, but the results were less resistant to changes in the structure of the time series. It was determined that the choice of the best model depends on the industry specifics of the company, the structure of the source data and the composition of the functions used. The results obtained confirm the expediency of using machine learning methods to solve financial forecasting problems and support managerial decision-making [9].

The practical significance of this research lies in the fact that the proposed methods can be used for financial planning, investment analysis, corporate risk assessment and the development of intelligent decision support systems. Promising areas for further research are the expansion of the scope of macroeconomic factors, the use of hybrid and probabilistic forecasting models, as well as the use of deep learning methods for long-term forecasting of financial indicators.

REFERENCES

1. Sonkavde, G., Dharrao, D. S., Bongale, A. M., Deokate, S. T., Doreswamy, D., & Bhat, S. K. (2023). Forecasting stock market prices using machine learning and deep learning models: A systematic review, performance analysis and discussion of implications. *International Journal of Financial Studies*, 11(3), 94.
2. Zheng, H., Wu, J., Song, R., Guo, L., & Xu, Z. (2024). Predicting financial enterprise stocks and economic data trends using machine learning time series analysis.
3. Li, A. W., & Bastos, G. S. (2020). Stock market forecasting using deep learning and technical analysis: a systematic review. *IEEE access*, 8, 185232-185242.
4. Bakumenko, A., & Elragal, A. (2022). Detecting anomalies in financial data using machine learning algorithms. *Systems*, 10(5), 130.
5. Protiviti (2018) Seeing the Future More Clearly: How Machine Learning Can Transform the Financial Forecasting Process.
6. Sen, J. and Mehtab, S. (eds.) (2022) Machine Learning in the Analysis and Forecasting of Financial Time Series. Newcastle upon Tyne: Cambridge Scholars Publishing.
7. Federal Reserve Bank of St. Louis (2026) FRED: Federal Reserve Economic Data. fred.org
8. Refinitiv (2026) Refinitiv Data Platform. lseg.com
9. Random Forest Algorithm in Machine Learning. [geeksforgeeks.org](https://www.geeksforgeeks.org/random-forest-algorithm-in-machine-learning/)

Аяғоз Имансакипова, магистр, сеньор-лектор, Almaty Technological University, Алматы, Қазақстан, ayagozimansakipova8@gmail.com



Дария Молдаш, бакалавр, Kazakh-British Technical University, Алматы, Қазақстан, moldashdariya@gmail.com

Үміт Пайыз, магистрант, Almaty Technological University, Алматы, Қазақстан, umitpajyz@gmail.com

КОМПАНИЯЛАРДЫҢ ҚАРЖЫЛЫҚ КӨРСЕТКІШТЕРІН МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ ЖӘНЕ УАҚЫТ ҚАТАРЛАРЫН ТАЛДАУ ӘДІСТЕРІ НЕГІЗІНДЕ БОЛЖАУ

Аңдатпа. Мақалада Машиналық оқыту әдістерін және уақыт серияларын талдауды қолдана отырып, компаниялардың қаржылық көрсеткіштерін болжау міндеті қарастырылады. Зерттеудің өзектілігі жоғары нарықтық белгісіздік пен экономиканы цифрландыру жағдайында қаржылық болжаудың дәлдігін арттыру қажеттілігімен байланысты.

Зерттеудің мақсаты қаржылық және макроэкономикалық мәліметтер негізінде компаниялардың тоқсандық кірісін болжау модельдерін салыстырмалы талдау болып табылады. Зерттеу макроэкономикалық көрсеткіштерді, соның ішінде тұтыну бағаларының индексі, АҚШ мемлекеттік облигацияларының кірістілігін, Brent мұнай бағасын және Nasdaq Composite және S&P 500 қор индекстерін пайдалана отырып, 2008-2025 жылдар аралығындағы 21 ашық компанияның тоқсандық деректерінде орындалды.

Болжау үшін Arima, SARIMA, Prophet, сызықтық регрессия, Support Vector Regression, Random Forest, XGBoost және Long Short-Term Memory модельдері қолданылады. Деректерді алдын ала өңдеу, кідіріс белгілерін қалыптастыру және макроэкономикалық факторларды біріктіру орындалды. Модельдердің сапасы RMSE, MAE, MAPE және sMAPE көрсеткіштерімен бағаланды.

Нәтижелер ансамбльдік Машиналық оқыту алгоритмдері классикалық уақыт қатарының үлгілерімен салыстырғанда жоғары болжау дәлдігін қамтамасыз ететінін көрсетті. Ең тұрақты нәтижелерді Random Forest көрсетті. Оңтайлы модельді таңдау салалық ерекшелікке және компанияның уақыт сериясының ерекшеліктеріне байланысты екендігі анықталды. Өзірленген тәсілді қаржылық жоспарлау, инвестициялық талдау және басқару шешімдерін қолдау үшін пайдалануға болады.

Түйінді сөздер: машиналық оқыту, уақыт сериясын талдау, қаржылық болжау, компанияның кірісі, Random Forest, XGBoost, ARIMA, LSTM, макроэкономикалық көрсеткіштер.

Аяғоз Имансакипова, магистр, сеньор-лектор, Almaty Technological University, Алматы, Казахстан, ayagozimansakipova8@gmail.com



Дария Молдаш, бакалавр, Kazakh-British Technical University, Алматы, Казахстан, moldashdariya@gmail.com

Үміт Пайыз, магистрант, Almaty Technological University, Алматы, Казахстан, umitpajyz@gmail.com

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФИНАНСОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОМПАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Аннотация. В статье рассматривается задача прогнозирования финансовых показателей компаний с использованием методов машинного обучения и анализа временных рядов. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения точности финансового прогнозирования в условиях высокой рыночной неопределенности и цифровизации экономики.

Цель исследования заключается в сравнительном анализе моделей прогнозирования квартальной выручки компаний на основе финансовых и макроэкономических данных. Исследование выполнено на квартальных данных 21 публичной компании за период 2008–2025 гг. с использованием макроэкономических показателей, включая индекс потребительских цен, доходность государственных облигаций США, цену нефти Brent и фондовые индексы NASDAQ Composite и S&P 500.

Для прогнозирования применены модели ARIMA, SARIMA, Prophet, линейная регрессия, Support Vector Regression, Random Forest, XGBoost и Long Short-Term Memory. Выполнены предварительная обработка данных, формирование лаговых признаков и интеграция макроэкономических факторов. Качество моделей оценивалось по метрикам RMSE, MAE, MAPE и sMAPE.

Результаты показали, что ансамблевые алгоритмы машинного обучения обеспечивают более высокую точность прогнозирования по сравнению с классическими моделями временных рядов. Наиболее устойчивые результаты продемонстрировал Random Forest. Установлено, что выбор оптимальной модели зависит от отраслевой специфики и особенностей временного ряда компании. Разработанный подход может быть использован для финансового планирования, инвестиционного анализа и поддержки принятия управленческих решений.

Ключевые слова: машинное обучение, анализ временных рядов, финансовое прогнозирование, выручка компании, Random Forest, XGBoost, ARIMA, LSTM, макроэкономические показатели.

Received: June 06, 2026

Peer-reviewed: June 29, 2026

Accepted: June 29, 2026

**Авторларға нұсқаулық**

Сағадат Нұрмағамбетов атындағы Құрлық әскерлері Әскери институтының Хабаршы ғылыми-ақпараттық журналында материалдарды жариялау онлайн-беру және сараптамалық бағалау жүйесі Open Journal System пайдалану арқылы жүзеге асырылады. Тіркелу, қол жеткізу, материалды жіберу бөлімі арқылы жүзеге асады. Автор корреспонденция үшін қолжазбаны беру кезінде ілеспе хат ұсынуы тиіс.

Қолжазба төменде сипатталған талаптарға сәйкес рәсімделуі тиіс.

Мақаланың атауы – мақала мазмұны тақырыбына сәйкес болуы қажет. *Мақаланың шрифты (14 кегль).*

Аңдатпа – мақаланың қысқаша мазмұнын сипаттайды. Аңдатпа 300 сөзден аспай құралып қазақ, орыс, ағылшын тілдерінде рәсімделуі тиіс. *(14 кегль).*

Түйінді сөздер – мәтіндік белгі сөздерінің саны бестен кем болмауы керек. Үш тілде жазылады (қазақ, орыс, ағылшын).

Кіріспе – мақаланың өзектілігіне тоқталып, үлес қосқан отандық және шетелдік ғалымдардың жұмыстарын қарастыра отырып ашады.

Материалдар мен тәсілдер – зерттеу жүргізу барысында қолданған әдістерін көрсетеді.

Нәтижелері – теориялық және эксперименттік нәтижелер, жаңа деректер, ғылыми жаңалықтар, ұсыныстар келтіріледі.

Талқылау - Алдыңғы зерттеулерге сәйкес алынған нәтижелердің маңыздылығын талдау, ұқсастықтар мен айырмашылықтарды анықтау, жұмыстың ғылыми құндылығын негіздеу және одан әрі зерттеу бағыттарын ұсыну.

Қортындылау – зерттеу барысында мақаланың қортындысын шығару, алынған нәтиженің практикалық маңызын көрсету, өз тарапынан ұсыныс жасау керек.

Әдебиеттер тізімі – мәтіндегі сілтемелер олардың аталу ретімен өсуі бойынша нөмірленеді. Жарияланым туралы библиографиялық мәліметтер МЕМСТ 7.1. – 2003 «Библиографиялық жазба. Құрастырудың жалпы талаптары мен ережелері».

Мақалада электрондық ресурстарды пайдаланса интернеттегі мекен-жайы бар желілік ресурсқа сілтеме келтіріледі. Ресурсқа жүгінсе авторын, тақырыбын, қараған күнін көрсеткені дұрыс. Мақалада транслитерленген дереккөздердің болуы **міндетті** шарт болып табылады.

Әдебиеттер тізімі орыс тілінде және жалпы қабылданған ағылшын транслитерациясында ұсынылуы тиіс. Мұны <http://translit.ru/> немесе <https://transliteration.pro/bsi> сайтында көрсетілген бағдарламаның көмегімен жасауға болады.

Төменгі жағында авторлар туралы мәлімет үш тілде беріледі. Аты – жөні, лауазымы, ғылыми атағы, ғылыми дәрежесі жұмыс жасайтын мекемесі, қаласын, мемлекетін және электронды почтасын жазу керек. Көп автор болса мақалаға жауапты бір ғана автордың электронды почтасын көрсетеді.

Техникалық талаптар:

Мәтіндік файлдар Word форматында ұсынылуы керек.

- Шрифты - Times New Roman – 14 кегль.
- Жоларалық интервал – 1,0.
- Шеті: - жоғарғы және төменгі – 2 см, сол жағы – 3 см, оң жағы – 2 см.
- Абзацтық алу – 1 см.
- Мақаланың көлемі 10 беттен аспау қажет.



Руководство для авторов

Публикация материалов в научно-информационном журнале Вестник Военного института Сухопутных войск имени Сагадата Нурмагамбетова осуществляется с использованием Open Journal System, системы онлайн-подачи и экспертной оценки. Регистрация и доступ в разделе отправка материалов. Автор для корреспонденции обязан предоставить сопроводительное письмо при подаче рукописи.

Рукопись должна быть оформлена в соответствии с требованиями, описанными ниже.

Название статьи – должно соответствовать содержанию статьи, теме исследования. Шрифт статьи (*14 кегль*).

Аннотация – краткое изложение содержания научной статьи. Объем аннотации составляет не более 300 слов, оформляется на 3-х языках. (*14 кегль*).

Ключевые слова – текстовые метки, количество ключевых слов от 5, оформляется на 3-х языках (казахском, русском, английском).

Введение – изложение актуальности темы исследования с обязательным рассмотрением отечественных и зарубежных работ.

Материалы и методы – описываются методы, использованные в ходе исследования.

Результаты – приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности.

Обсуждение - анализировать значение полученных результатов в свете предыдущих исследований, выявляя как сходства, так и отличия, обосновывая научную ценность работы и предлагая направления для дальнейших исследований.

Заключение – подведение итогов работы, обоснование новизны и актуальности исследования.

Список литературы – ссылка в тексте нумеруются по возрастанию в порядке их упоминания. Список литературы оформляется строго по ГОСТ 7.1. – 2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления».

При использовании в статье источников из электронных ресурсов в списке литературы необходимо указать на сетевой ресурс с полным адресом в интернете. Желательно указывать дату обращения к ресурсу.

Список литературы должен быть представлен на русском языке и в общепринятой английской транслитерации. Это можно сделать с помощью программы, указанной на сайте <http://translit.ru/>, либо <https://transliteration.pro/bsi>

Ниже даются **сведения об авторах на трех языках**. ФИО автора(-ов), данные авторов: должность, ученое звание, ученая степень наименование учреждения, города, государства. При наличии нескольких соавторов, рекомендуется указать адрес электронной почты всех авторов.

Технические требования

Текстовые файлы следует представлять в формате Word.

- Шрифт – Times New Roman, размер – 14pt.
- Междустрочный интервал – 1.0.
- Поля:- Край-верхняя и нижняя – 2 см, левая – 3 см, правая – 2 см.
- Абзац – 1 см.
- Объем статьи – не должен превышать 10 страниц.



Guidelines for Authors

The publication of materials in the scientific journal Bulletin of the Sagadat Nurmagambetov Military Institute of Land Forces is carried out using the Open Journal System, an online submission system and peer review. Registration and access are in the section submission of materials. The corresponding author shall be obliged to provide a cover letter when submitting a manuscript.

The manuscript must be formatted in accordance with the requirements described below.

The research paper title should correspond to its content and research topic. It is indicated in capital letters in the center of the page (*MS Word in size 14 Times New Roman*).

Abstract is a summary of the research paper content. The abstract should be written in no more than 300 words in Kazakh, Russian, and English (*MS Word in size 14 Times New Roman*).

Keywords. The number of key words must be at least 5, and be written in 3 languages (kazakh, russian, english).

Introduction should include consideration of domestic and foreign research and actuality of research topic.

Materials and Methods are the research methods used during the subject consideration.

Results reveals main theoretical and experimental results, new facts, suggestions and recommendations.

Discussion - The purpose of the discussion is to analyze the significance of the results obtained in the light of previous research, identifying both similarities and differences, substantiating the scientific value of the work and suggesting directions for further research.

Conclusions are the summing up study results, presenting practical recommendations, as well as own proposals.

Bibliography and Transliteration. The list of references in the text is numbered in ascending order in the order of their mention. The list of references is drawn up strictly according to GOST 7.1. – 2003. “Bibliographic record. Bibliographic description. General requirements and rules of compilation”.

When using sources from electronic resources in the article in the list of references, it is necessary to indicate a network resource with a full Internet address. It is advisable to specify the date of access to the resource.

The list of references should be presented in Russian and in the generally accepted English transliteration. This can be done using the program listed on the website. <http://translit.ru/>, or <https://transliteration.pro/bsi>

The research paper design requirements: The ICSTI code, the research paper title, the full name of the author(s), the authors data: position, academic title, academic degree, name of institution, city, state, e-mail.

Technical requirements

Text files should be submitted in Word format.

- Font-Times New Roman, size – 14pt.
- Line spacing – 1.0.
- Fields: Edges-top and bottom – 2 cm, left – 3 cm, Right – 2 cm.
- Paragraph – 1 cm.
- The volume of the article should not exceed 10 pages.

«Сағадат Нұрмағамбетов атындағы Құрлық әскерлері
Әскери институтының хабаршысы» ғылыми-ақпараттық журналы
Редакциялық-баспа бөлімшесінде басып шығарылды
Ғылыми және техникалық редактор: Н.К. Молдабекова

Басуға 2026.06.30. қол қойылды
Пішімі 20 x 30. Көлемі – баспа табақ.
Таралымы 250 дана.
050053, Алматы қ., Красногорская, 4.

Научно-информационный журнал
«Вестник Военного института Сухопутных войск имени Сагадаты Нурмагамбетова»
Издано в типографии редакционно-издательского отделения
Научный и технический редактор: Н.К. Молдабекова

Издание подписано 30.06.2026.
Формат 20 x 30. Размер – печатная пластина.
Тираж 250 экз.
050053, г. Алматы, Красногорская, 4.

Scientific and informational journal «Bulletin of the Sagadat Nurmagambetov
Military Institute of Land Forces»
Published in the printing house of the editorial and publishing department
Scientific and technical editor: N. K. Moldabekova

Signed to press in 30.06.2026.
Format 20 x 30. The size of the printing plate.
Circulation is 250 pieces.
050053, Almaty, Krasnogorskaya, 4