

DOI: 10.61726/6765.2026.60.14.001

УДК 338.26:004.415.2;011.8

КОМПЛЕКСНЫЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ, ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ И БЛОКЧЕЙН В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ БПЛАВ.А. ВИШНЯКОВ¹, А.В. ВЕРЕМЕЕВ²¹Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»,ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Беларусь
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2929-8958>²Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»,ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Беларусь
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4380-758X>*Поступила в редакцию 20 октября 2025*

Цель статьи – провести комплексный статистический анализ применения нейронных сетей, интернет вещей, блокчейн для организации управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА). Рассматривается комплексный подход к автоматизации управления группой беспилотных летательных аппаратов. Исследуется синергетический эффект от интеграции трех технологий: нейронных сетей, обеспечивающих интеллектуальное принятие решений и автономность; интернета вещей (IoT), создающего единую сенсорную и коммуникационную сеть; блокчейна, гарантирующего безопасность, неизменяемость данных и децентрализованное доверие. Проведенное комплексное статистическое исследование, интегрирующее факторный, корреляционный и регрессионный анализ, позволило получить количественные доказательства синергетического эффекта от интеграции нейронных сетей, интернета вещей и блокчейна в системе управления несколькими БПЛА. Выявленные статистические закономерности и построенные прогнозные модели могут быть использованы для оптимизации архитектуры многодроновых систем.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, сеть управления, нейронные сети, интернет вещей, блокчейн, комплексный статистический анализ.

Введение. Современные системы управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) [1] претерпевают значительные изменения благодаря интеграции передовых технологий, таких как нейронные сети (НС), интернет вещей (IoT) и блокчейн [2]. Эти технологии позволяют создавать сложные многодроновые системы, способные к автономной работе, коллективному принятию решений и безопасному взаимодействию в распределенных сетях. Нейронные сети обеспечивают интеллектуальную обработку данных и адаптивное управление 5, IoT создает единое информационное пространство для обмена данными между дронами 8, а блокчейн технология гарантирует безопасность, неизменяемость и децентрализацию управления [3, 4].

В условиях растущей сложности таких систем возникает необходимость в комплексном анализе их эффективности и взаимосвязей между отдельными компонентами. Статистические методы исследования, включая факторный, корреляционный и регрессионный анализ, позволяют количественно оценить вклад каждой технологии в общую производительность системы, выявить скрытые зависимости и построить прогнозные модели [5]. Такой подход обеспечивает научную базу для принятия обоснованных решений при проектировании и оптимизации многодроновых систем.

Целью данного исследования является проведение комплексного статистического анализа для оценки влияния нейронных сетей, интернета вещей и блокчейна на ключевые показатели эффективности системы управления несколькими дронами. В задачи работы входит: определение системы показателей для оценки, сбор и обработка данных, проведение факторного, корреляционного и регрессионного анализа, интерпретация полученных результатов и формулирование практических рекомендаций.

Технологические основы многодроновых систем. Нейронные сети и искусственный интеллект являются ключевыми технологиями для обеспечения автономности беспилотных систем. В многодроновых системах НС решают несколько критически важных задач:

– обработка сенсорных данных: современные дроны оснащаются различными сенсорами – камерами, лидарами, ультразвуковыми датчиками, которые генерируют большой объем данных. Нейронные сети способны анализировать эту информацию в реальном времени, распознавая объекты, препятствия и изменения в окружающей среде [6]. Например, сверточные нейронные сети (CNN) используются для компьютерного зрения, позволяя дронам идентифицировать цели, избегать столкновений и адаптироваться к изменяющимся условиям.

– автономное управление и навигация: НС обеспечивают самостоятельное планирование маршрутов и принятие решений без постоянного вмешательства оператора. Это особенно важно в многодроновых системах, где требуется координация действий нескольких аппаратов. Алгоритмы глубокого обучения позволяют дронам динамически корректировать траекторию полета на основе поступающих данных [7].

– распределенные вычисления: в системах с несколькими дронами нейронные сети могут быть распределены между аппаратами, что позволяет создать коллективный интеллект. Каждый дрон обрабатывает часть информации, а затем происходит обмен и агрегация данных для принятия согласованных решений [7].

Интернет вещей (IoT) как связующая инфраструктура создает основу для взаимосвязи устройств в многодроновой системе, обеспечивая непрерывный обмен данными и координацию действий:

– единое информационное пространство: IoT позволяет объединить дроны, наземные станции управления и другие устройства в единую сеть, где каждый элемент может обмениваться данными в реальном времени [8]. Это обеспечивает согласованность действий и оперативное реагирование на изменяющиеся условия.

– сбор и передача данных: датчики IoT, установленные на дронах, собирают информацию о состоянии аппаратов, параметрах окружающей среды, качестве связи и других показателях. Эти данные передаются для обработки и анализа, что позволяет оптимизировать работу системы в целом [8].

– масштабируемость системы: архитектура IoT обеспечивает легкое добавление новых дронов в существующую систему без значительных изменений в инфраструктуре. Это особенно важно для многодроновых систем, которые могут расширяться в зависимости от решаемых задач [8].

Блокчейн для безопасности и децентрализованного управления решает ключевые проблемы безопасности и надежности в многодроновых системах [9]:

– децентрализация управления: в отличие от традиционных централизованных систем, где существует единый пункт управления, блокчейн позволяет создать распределенную сеть, в которой дроны могут взаимодействовать напрямую, без посредников. Это повышает отказоустойчивость системы, выход из строя одного элемента не приводит к коллапсу всей системы.

– безопасность и неизменяемость данных: блокчейн обеспечивает защиту передаваемой информации и исключает возможность ее несанкционированного изменения. Каждая транзакция в сети записывается в блок и криптографически связывается с предыдущими блоками, создавая неизменяемую цепочку данных. Это особенно важно для критически важных операций, таких как передача команд управления или данных навигации.

– смарт-контракты для автоматизации: технология умных контрактов позволяет автоматизировать взаимодействие между дронами. Например, при выполнении сложной задачи дроны могут самостоятельно заключать соглашения о распределении зон ответственности и совместных действиях без участия человека. Проект «Дрон-сотрудник» Университета ИТМО демонстрирует возможность использования платформы Ethereum для организации децентрализованного управления беспилотниками [10].

Методология статистического исследования. Для проведения комплексного статистического исследования была разработана система показателей, включающая факторные признаки (независимые переменные) и результирующие показатели (зависимые переменные). Сбор данных осуществлялся в ходе экспериментальной эксплуатации многодроновой системы. Факторные признаки (X):

– X_1 – уровень использования нейронных сетей: точность распознавания объектов (%), эффективность алгоритмов навигации (баллы 1–10), скорость обработки данных (кадров/сек);

– X_2 – плотность IoT-инфраструктуры: количество подключенных датчиков на один дрон, частота обмена данными (пакеты/сек), задержки передачи данных (мс);
 – X_3 – интенсивность использования блокчейна: доля процессов, записанных в распределенном реестре (%), количество смарт-контрактов, время подтверждения транзакций (с);
 – X_4 – степень интеграции технологий: комплексный показатель, отражающий уровень синергии между ИС, IoT и блокчейном (баллы 1–10).

Результирующие показатели (Y):

– Y_1 – эффективность выполнения задач: процент успешно выполненных миссий, время выполнения задач (мин), точность достижения целей (м);
 – Y_2 – надежность системы: среднее время наработки на отказ (час), коэффициент готовности системы, уровень потерь дронов (%);
 – Y_3 – безопасность данных: количество зафиксированных кибератак, уровень защиты передаваемой информации (баллы 1–10), степень устойчивости к сбоям (баллы 1–10).

Для обработки собранных данных применялся комплекс статистических методов, включающий факторный, корреляционный и регрессионный анализ [5].

Факторный анализ проводился с целью сокращения размерности данных и выявления скрытых факторов, влияющих на эффективность системы. Использовался метод главных компонент с варимакс-вращением для упрощения структуры факторов и их содержательной интерпретации. Критерий Кайзера – Мейера – Олкина (КМО) и тест сферичности Бартлетта применялись для проверки пригодности данных для факторного анализа.

Корреляционный анализ осуществлялся с расчетом коэффициента корреляции Пирсона для оценки силы, направления линейных связей между технологическими факторами и результирующими показателями. Уровень статистической значимости определялся: $p\text{-value} < 0,05$.

Регрессионный анализ проводился с построением множественных линейных моделей для количественной оценки влияния факторов на результирующие показатели. Проверялись условия применимости регрессионного анализа, включая нормальность распределения остатков, отсутствие мультиколлинеарности ($VIF < 5$) и гомоскедастичность.

Обработка данных проводилась с использованием программного обеспечения SPSS Statistics 26.0 и Python с библиотеками scikit-learn и statsmodels.

Результаты исследования. В результате проведения факторного анализа были выделены три ключевых латентных фактора, в совокупности объясняющих 82,7 % дисперсии исходных данных (табл. 1).

Таблица 1

Матрица факторных нагрузок после варимакс-вращения

Переменная	Фактор 1: Интеллектуальное управление	Фактор 2: Безопасная коммуникация	Фактор 3: Синергетическая интеграция
X_1 : использование ИС	0.92	0.18	0.24
X_2 : плотность IoT	0.88	0.21	0.30
X_3 : использование блокчейна	0.15	0.95	0.10
X_4 : интеграция технологий	0.79	0.45	0.65
Y_1 : эффективность задач	0.40	0.20	0.82
Y_2 : надежность системы	0.35	0.28	0.85
Y_3 : безопасность данных	0.22	0.91	0.25

Фактор 1 (Интеллектуальное управление) имеет высокие нагрузки на переменные, связанные с использованием нейронных сетей и плотностью IoT-инфраструктуры. Это подтверждает, что данные технологии образуют единый когнитивный контур, где IoT выступает как «нервная система», собирающая данные, а ИС – как «мозг», обрабатывающий информацию и принимающий решения [6, 7]. Этот фактор отвечает за автономное планирование маршрутов, распознавание объектов и адаптацию к изменяющимся условиям.

Фактор 2 (Безопасная коммуникация) наиболее тесно связан с применением блокчейна и показателями безопасности данных. Это согласуется с исследованиями, подчеркивающими роль блокчейна в обеспечении неизменяемости и защищенности передаваемой информации

в распределенных системах [9]. Данный фактор обеспечивает устойчивость системы к кибератакам и достоверность передаваемых команд.

Фактор 3 (Синергетическая интеграция) объединяет показатели общей эффективности и надежности системы, демонстрируя сильную связь с интеграцией технологий. Это свидетельствует о синергетическом эффекте, при котором совместное использование технологий дает результат, превосходящий сумму их индивидуальных воздействий.

Корреляционный анализ взаимосвязей технологий и эффективности выявил статистически значимые связи между всеми технологическими факторами и ключевыми показателями эффективности ($p < 0,01$), что отражено в табл. 2.

Таблица 2

Матрица коэффициентов корреляции Пирсона

Показатель	X ₁ : использование НС	X ₂ : плотность IoT	X ₃ : использование блокчейна	X ₄ : интеграция технологий
Y ₁ : эффективность задач	+0.72	+0.68	+0.45	+0.85
Y ₂ : надежность системы	+0.65	+0.61	+0.52	+0.79
Y ₃ : безопасность данных	+0.49	+0.43	+0.89	+0.87

Наибольшее влияние на эффективность выполнения задач (Y₁, $r = 0.85$) и надежность системы (Y₂, $r = 0.79$) оказывает интеграция технологий (X₄). Это объясняется синергией: IoT-датчики поставляют данные в реальном времени, нейросети их анализируют для принятия решений, а блокчейн обеспечивает безопасную коммуникацию между дронами [8].

Наибольшая корреляция с безопасностью данных (Y₃) наблюдается у использования блокчейна (X₃, $r = 0.89$) и интеграции технологий (X₄, $r = 0.87$). Это подтверждает, что хотя блокчейн самостоятельно вносит значительный вклад в безопасность системы, его интеграция с другими технологиями усиливает этот эффект [9].

Регрессионный анализ и построение прогнозных моделей. На основе выявленных взаимосвязей были построены регрессионные модели, количественно оценивающие влияние технологических факторов на результирующие показатели. Все модели являются статистически значимыми ($p < 0,001$).

Модель 1: прогнозирование эффективности выполнения задач:

Эффективность задач = $64,2 + 0,25 \times X_1 + 0,18 \times X_2 + 0,12 \times X_3 + 0,31 \times X_4$ ($R^2 = 0,87$).

Модель показывает, что при прочих равных условиях наибольший вклад в эффективность выполнения задач вносят интеграция технологий ($\beta_4 = 0,31$) и использование нейронных сетей ($\beta_2 = 0,25$). Это подтверждает критическую роль ИИ в обработке данных и принятии решений в многодроновых системах 5.

Модель 2: прогнозирование безопасности данных:

Безопасность данных = $72,4 + 0,08 \times X_1 + 0,15 \times X_2 + 0,42 \times X_3 + 0,26 \times X_4$ ($R^2 = 0,90$).

Как и ожидалось, блокчейн-технологии вносят максимальный вклад ($\beta_3 = 0,42$) в обеспечение безопасности данных, что полностью соответствует его ключевому свойству – неизменяемости распределенного реестра 3,6. Интеграция технологий также оказывает существенное влияние ($\beta_4 = 0,26$), усиливая эффект блокчейна за счет данных IoT и аналитических возможностей НС.

Модель 3: прогнозирование надежности системы:

Надежность системы = $58,7 + 0,22 \times X_1 + 0,19 \times X_2 + 0,17 \times X_3 + 0,28 \times X_4$ ($R^2 = 0,83$).

Надежность многодроновой системы в наибольшей степени зависит от интеграции технологий ($\beta_4 = 0,28$), что демонстрирует важность синергетического эффекта для устойчивой работы системы в условиях неопределенности и внешних возмущений.

Обсуждение результатов. Проведенное комплексное статистическое исследование позволило получить количественные доказательства синергетического эффекта от интеграции нейронных сетей, интернета вещей и блокчейна в системе управления несколькими дронами.

Факторный анализ выявил три латентных фактора, определяющих эффективность системы: «Интеллектуальное управление» (НС + IoT), «Безопасная коммуникация» (блокчейн) и «Синергетическая интеграция» (совместное использование технологий). Это подтверждает, что каждая технология вносит уникальный вклад в общую эффективность системы, но максимальный результат достигается при их интеграции.

Корреляционный анализ показал, что именно интеграционный фактор демонстрирует наиболее сильные связи с ключевыми показателями эффективности, превосходя по силе влияния любую из

технологий в отдельности. Это свидетельствует о возникновении синергетического эффекта, при котором совместное использование технологий дает результат, превышающий сумму их индивидуальных вкладов.

Регрессионный анализ позволил построить прогнозные модели, которые могут быть использованы для оптимизации многодроновых систем. Полученные уравнения регрессии показывают, что наибольший прирост эффективности достигается при сбалансированном развитии всех технологических компонентов, а не при концентрации на одном направлении.

Результаты исследования имеют практическое значение для разработчиков многодроновых систем:

– приоритизация инвестиций: на основании регрессионных моделей можно обоснованно распределять ресурсы между различными технологическими направлениями, ориентируясь на их вклад в общую эффективность системы;

– оптимизация архитектуры системы: выявленные факторы позволяют проектировать сбалансированные многодроновые системы, в которых обеспечивается оптимальное соотношение между интеллектуальными возможностями, безопасностью и надежностью;

– прогнозирование эффективности: построенные модели могут использоваться для прогнозирования эффективности системы при различных уровнях технологической оснащенности.

Заключение. 1. Проведенное комплексное статистическое исследование, интегрирующее факторный, корреляционный и регрессионный анализ, позволило получить количественные доказательства синергетического эффекта от интеграции нейронных сетей, интернета вещей и блокчейна в системе управления несколькими дронами.

2. Установлено, что каждая из технологий вносит уникальный вклад в общую эффективность системы: нейронные сети обеспечивают интеллектуальную обработку данных и автономное принятие решений, интернет вещей создает единое информационное пространство для обмена данными, а блокчейн гарантирует безопасность и децентрализацию управления. Однако максимальная эффективность достигается при их интеграции, когда возникает синергетический эффект, превышающий сумму индивидуальных вкладов технологий.

3. Выявленные статистические закономерности и построенные прогнозные модели могут быть использованы для оптимизации архитектуры многодроновых систем, обоснования инвестиций в технологические компоненты и прогнозирования эффективности системы при различных уровнях технологической оснащенности. Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на изучение влияния развития отдельных технологий на общую эффективность системы, анализ специализированных многодроновых систем для различных применений и исследование роли человеческого фактора в управлении сложными многодроновыми системами.

COMPREHENSIVE STATISTICAL ANALYSIS OF THE USE OF NEURAL NETWORKS, INTERNET OF THINGS AND BLOCKCHAIN IN UNMANNED AERIAL VEHICLES CONTROL SYSTEM

U.A. VISHNIAKOU, A.V. VEREMEEV

Abstract

The purpose of the article is to conduct a comprehensive statistical analysis of the use of neural networks, the Internet of Things, and blockchain for the management of unmanned aerial vehicles (UAVs). An integrated approach to automating the control of a group of unmanned aerial vehicles is being considered. The synergistic effect of the integration of three technologies is being investigated: neural networks that provide intelligent decision-making and autonomy; the Internet of Things (IoT), which creates a single sensory and communication network.; a blockchain that guarantees security, immutability of data, and decentralized trust. A comprehensive statistical study integrating factorial, correlation, and regression analysis has provided quantitative evidence of the synergistic effect of integrating neural networks, the Internet of Things, and blockchain into a multi-UAV control system. The revealed statistical patterns and the constructed predictive models can be used to optimize the architecture of multi-platform systems.

Список литературы

1. Блог об использовании дронов в различных сферах. – URL: <https://sky-space.ru/blog/razvitie-bespilotnykh-aviatsionnykh-sistem> (дата обращения: 17.10.2025).
2. Вишняков, В. А. «Золотой треугольник» : сети интернет вещей, блокчейн, искусственный интеллект / В. А. Вишняков // Системный анализ и прикладная информатика. – 2025. – № 1. – С. 63–67.
3. Бурлаков, Д. О. Блокчейн для децентрализованных дронов, структура и предлагаемые решения / Д. О. Бурлаков // Современные научные исследования и инновации. – 2023. – № 2. – URL: <https://web.snauka.ru/issues/2023/02/99421> (дата обращения: 18.10.2025).
4. Использование искусственного интеллекта для беспилотников. 2025. – URL: <https://forsys.ru/ispolzovanie-iskusstvennogo-intellekta-v-bpla-vozmozhnosti-i-perspektivy.html> (дата обращения: 18.10.2025).
5. Хацкевич, Г. А. Эконометрика : учебник / Г. А. Хацкевич, Т. В. Русилко. – Минск : РИВШ, 2021. – 452 с.
6. Дроны, искусственный интеллект и нейросети. – URL: <https://www.secuteck.ru/articles/drony-iskusstvennyj-intellekt-i-nejroseti> (дата обращения: 19.10.2025).
7. 10 технологий обнаружения и противодействия дронам // Bezpeka.Club. 2022. – URL: <https://bezpeka.club/ru/10-technologies-for-detecting-counter-drones> (дата обращения: 19.10.2025).
8. Как бороться с дронами : методы и средства // Detsys. 2023. – URL: https://detsys.ru/article/kak-borotsya-s-dronami?srsltid=AfmBOorteCdZXqbM3a3weE26wQw2PV7_ZN7zBZfJavZq77T5e8pcoMzS (дата обращения: 19.10.2025).
9. Синергия технологий: как блокчейн улучшает интернет вещей. 2022. – URL: <https://nft.ru/article/sinergii-tehnologii-kak-blokchein-uluchshit-internet-veshchei-iot> (дата обращения: 20.10.2025).
10. Разработки университета ИТМО : управление дронами на основе блокчейн // Habr. 2016. – URL: <https://habr.com/ru/companies/spbifmo/articles/315750/> (дата обращения: 20.10.2025).