

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY,
COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT



УДК 004.75

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-4-2238>

**Концепция многоуровневой сетевой инфраструктуры
мониторинга агропромышленных объектов
на основе беспроводных сенсорных сетей**



EDN: CLJRZJ

В.В. Самойленко

Ставропольский государственный аграрный университет, г. Ставрополь, Российская Федерация

✉ samoilenko.vv@stgau.ru

Аннотация

Введение. В условиях цифровизации агросектора точное земледелие становится ключевым драйвером устойчивости: беспроводные сенсорные сети (БСС) обеспечивают непрерывный мониторинг почвенно-климатических параметров и состояния растений, поддерживая прогнозирование урожайности и ресурсную оптимизацию при снижении операционных рисков. Несмотря на значительный прогресс в исследованиях энергоэффективности, маршрутизации и топологии БСС, проблема их системной надежности в реальных агросценариях освещена фрагментарно. Существующие теоретические подходы опираются на теорию графов, марковские и квазидетерминированные модели для оценки связности и отказоустойчивости, но недостаточно учитывают деградацию батарей, вариативность радиоканала и внешние факторы (микроклимат, помехи), а также их совместное влияние. Цель данной статьи — разработать методический подход к повышению надежности БСС для мониторинга агрообъектов посредством многоуровневой модели, интегрирующей сетевые параметры, свойства аппаратуры и внешние воздействия.

Материалы и методы. Для разработки модели были применены методы системного анализа, в т.ч. анализа и синтеза ранее известных моделей и алгоритмов управления БСС для различных уровней сетевого взаимодействия. На первом этапе рассмотрены аналитические модели каждого уровня: технического состояния радиоустройств; физического канала с помехами и аппаратурными искажениями; энергопотерь узлов в канале с переменными характеристиками среды; линейной БСС с гетерогенными участками радиосвязи и кластеризации БСС. На втором этапе произведен анализ алгоритмов управления БСС: выбора режима передачи с минимальными искажениями сигналов; оптимизации структуры сигнала с минимальным BER; управления длиной пакета данных и мощностью передатчика; маршрутной балансировки энергопотерь в узлах ретрансляции, а также маршрутизации с минимальными потерями времени и энергии. На третьем этапе произведен синтез полученных результатов, представлена иерархическая инфраструктура мониторинга агропромышленного объекта, учитывающая все уровни взаимодействия БСС, параметры сенсорных узлов и влияние внешних факторов.

Результаты исследования. Предложен и обоснован методический многоуровневый подход к повышению надежности БСС для мониторинга агрообъектов, интегрирующий сетевые параметры, свойства аппаратуры и внешние воздействия, подтвержденный моделированием повышения энергоэффективности, снижения задержек и роста отказоустойчивости. В рамках этого разработана пятииерархическая концепция многоуровневой сетевой инфраструктуры для мониторинга агропромышленных объектов на базе БСС, интегрирующая модели и алгоритмы на уровнях: устройства, физического канала, канала передачи данных, линейного маршрута и сети. Получены одноуровневые и межуровневые зависимости, связывающие показатели эффективности, дестабилизирующие факторы и управляемые параметры.

Обсуждение. Представленный подход устраняет выявленный в литературе разрыв между энергетическими моделями и учетом динамических/информационных ограничений узлов, а также учитывает реальное техническое состояние модемов и термозависимость источников питания. Многоуровневая интеграция критериев (от корреляционных показателей формы сигнала до сетевых вероятностных метрик целостности БСС) позволяет согласовывать локальные оптимизации и системные цели, уменьшая риск конфликтов между уровнями. Принцип согласования уровней и внешнего дополнения обеспечивает итеративную корректировку требований и параметров, что повышает устойчивость принятия решений к неопределенности среды и гетерогенности каналов.

Ограничениями текущей работы являются: необходимость калибровки моделей под конкретные аппаратные профили, зависимость эффективности от доступных режимов PHY/MAC и протоколов ARQ, а также чувствительность к точности оценок помеховой обстановки и температурных режимов.

Заключение. Разработанные модели и алгоритмы на пяти уровнях обеспечивают достижение заданных показателей помехоустойчивости, времени доставки и энергопотребления при минимально необходимом задействовании ресурсов, что повышает живучесть и срок службы БСС. Предложенный подход создает основу для перехода к системно спроектированным, воспроизводимым решениям в точном земледелии, снижает ресурсные затраты и экологическую нагрузку, а также повысит устойчивость и рентабельность агропроизводства. Для масштабирования необходимы полевые испытания и публикация эталонных конфигураций и кодов для воспроизводимости.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, агропромышленный объект, надежность, сетевая инфраструктура, физический канал передачи данных, искажение сигнала, алгоритмы маршрутизации

Благодарности. Автор выражает благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Самойленко В.В. Концепция многоуровневой сетевой инфраструктуры мониторинга агропромышленных объектов на основе беспроводных сенсорных сетей. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(4):371–382. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-4-2238>

Original Empirical Research

Concept of a Multilevel Network Infrastructure for Monitoring Agricultural Facilities Based on Wireless Sensor Networks

Vladimir V. Samoylenko 

Stavropol State Agrarian University, Stavropol, Russian Federation

✉ samoilenko.vv@stgau.ru

Abstract

Introduction. In the context of digitalization of the agricultural sector, precision farming becomes a key driver of sustainability: wireless sensor networks (WSN) provide continuous monitoring of edaphoclimatic parameters and plant health, supporting yield forecasting and resource optimization while reducing operational risks. Despite significant progress in research on energy efficiency, routing, and topologies of WSN, the issue of their systemic reliability in real agricultural scenarios has been addressed only fragmentarily. Existing theoretical approaches rely on graph theory, Markov and quasi-deterministic models to assess connectivity and fault tolerance but do not sufficiently account for battery degradation, radio channel variability, and external factors (microclimate, interference), as well as their combined effects. The objective of this article is to develop a methodological approach to enhance the reliability of WSN for monitoring agricultural objects through a multilevel model that integrates network parameters, hardware properties, and external actions.

Materials and Methods. To develop the model, methods of system analysis were used, including analysis and synthesis of previously known models and algorithms for controlling the WSN for various levels of network interaction. At the first stage, analytical models of each level were examined: operating conditions of radio devices; physical channels with interference and hardware distortions; energy losses of nodes in channels with variable environmental characteristics; linear WSN with heterogeneous radio communication segments and clustering of WSN. At the second stage, an analysis of WSN control algorithms was conducted: selection of transmission modes with minimal signal distortion; optimization of signal structure with minimal Bit Error Rate (BER); control of data packet length and transmitter power; balancing of energy losses in relay nodes, as well as routing with minimal time and energy losses. At the third stage, the synthesis of the obtained results was performed, presenting a hierarchical monitoring infrastructure for the agricultural object that considered all levels of WSN interaction, parameters of sensor nodes, and the external actions.

Results. A methodological multilevel approach to increasing the reliability of WSN for monitoring agricultural facilities has been proposed and substantiated. This approach integrates network parameters, equipment properties, and external actions. It is validated by modeling the improvement of energy efficiency, reduction of delays, and increase in fault tolerance. Within this framework, a five-tier hierarchical concept of multilevel network infrastructure for monitoring agro-industrial objects based on WSN has been developed. It incorporates models and algorithms at the levels of: devices, physical channels, data transmission channels, linear routes, and networks. Single-level and inter-level dependences linking performance indicators, destabilizing factors, and controllable parameters have been established.

Discussion. The presented approach addresses the gap between energy models and the consideration of dynamic/information constraints of nodes, while also taking into account the actual operating condition of modems, and the thermal dependence of power sources. The multilevel integration of criteria (from signal shape correlation indicators to network probabilistic metrics of WSN integrity) allows for the alignment of local optimization and system goals, reducing the risk of conflicts between levels. The principle of level matching and external augmentation provides iterative adjustments of requirements and parameters, which increases the robustness of decision-making to environmental uncertainty and channel heterogeneity. Constraints of the current work include the need to calibrate models for specific hardware profiles, the dependence of efficiency on available PHY/MAC modes and ARQ protocols, and sensitivity to the accuracy of interference environment and temperature assessments.

Conclusion. The developed models and algorithms across five levels provide the specified metrics of interference resilience, delivery time and energy consumption with the minimum required involvement of resources, which increases the survivability and service life of the WSN. The proposed approach creates the basis for the transition to systemically designed, reproducible solutions in precision agriculture. It reduces resource costs and environmental impact, and also increases the sustainability and profitability of agricultural production. Scaling requires field testing and publication of reference configurations and codes for reproducibility.

Keywords: wireless sensor network, agricultural facility, reliability, network infrastructure, physical data transmission channel, signal distortion, routing algorithms

Acknowledgements. The author would like to thank the Editors and reviewers for their attentive attitude to the article and the comments they made, which allowed us to improve its quality.

For Citation. Samoylenko VV. Concept of a Multilevel Network Infrastructure for Monitoring Agricultural Facilities Based on Wireless Sensor Networks. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(4):371–382. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-4-2238>

Введение. Развитие сельскохозяйственной индустрии неотъемлемо связано с внедрением современных цифровых систем управления, использующих концепцию Интернета вещей (Internet of Things, IoT) [1]. Одной из ключевых технологических концепций точного земледелия являются беспроводные сенсорные сети (БСС) [2]. Применение данной технологии позволяет перейти от реактивного к прогнозному и прецизионному управлению. БСС активно используется для мониторинга сельскохозяйственных объектов, включая:

- мониторинг состояния почвы [3] (измерение влажности, температуры, уровня pH, содержания NPK (азот, фосфор, калий) и уровня засоленности) [4, 5];
- контроль микроклимата в теплицах и овощехранилищах (измерение температуры воздуха, относительной влажности, уровня освещенности, концентрации CO₂) [6];
- мониторинг состояния растений, выявление заболеваний и вредителей, а также прогнозирование продуктивности (измерения индекса листовой поверхности (LAI), уровня хлорофилла и температурного стресса) [7];
- управление животноводческими предприятиями (определение местоположения животных (GPS, RFID), измерение физической активности, температуры тела и частоты сердечных сокращений) [8].

Основные преимущества цифровизации сельскохозяйственного производства включают оптимизацию расхода энергоресурсов, что позволяет снизить затраты на воду, электроэнергию, удобрения и пестициды до 20–30 % и повысить урожайность и качество продукции на 10–15 %. В рамках экологического аспекта прецизионное управление позволяет сократить выбросы парниковых газов за счет оптимизации логистики и внесения агрохимикатов. Системный подход к цифровизации агропромышленных предприятий обеспечивает удаленный мониторинг и управление, а также принятие решений на основе объективных данных.

Несмотря на достижения, проблема обеспечения надежности БСС до настоящего времени не нашла полного решения в большинстве прикладных задач, несмотря на то, что первые исследования в данной области относятся к началу 2000-х годов [9]. Общим недостатком существующих исследований надежности сетей БСС является акцент на динамических и информационных ограничениях узловых модулей, а не на их энергетическом потенциале.

Это приводит к неполному учету факторов, влияющих на надежность. Например, в работе [10], несмотря на рассмотрение модели энергопотребления и учета емкости источника питания, объем данных и энергозатраты на связь остаются без должного внимания в связи с их влиянием на межуровневые показатели функционирования БСС.

С другой стороны, завышенная оценка влияния дестабилизирующих факторов внешней среды приводит к нерациональному и избыточному потреблению энергоресурсов. Часть этих недостатков была учтена в работе [11], где оценка надёжности основана на методе иерархической базы правил доверия. Тем не менее остаётся значительное число факторов, влияющих на надёжность БСС, среди которых:

- ограниченная вычислительная мощность и ёмкость сенсорных узлов;
- невозобновляемый характер источников питания в большинстве практических приложений;
- простая архитектура и программное обеспечение узлов, не позволяющие выполнять сложные вычислительные задачи;
- уязвимость БСС к атакам вследствие использования открытых методов связи;
- размещение сенсорных узлов в сложных эксплуатационных условиях, приводящее к их преждевременному выходу из строя.

При этом во многих исследованиях не учитывается реальное техническое состояние сенсорных узлов. Технология массового производства недорогих электронных устройств не обеспечивает высокой точности и воспроизводимости их характеристик. Основной проблемой при развертывании БСС остаётся ограниченный запас энергии сенсорных узлов при отсутствии возможности подзарядки или быстрой замены элементов питания. Поэтому уже на этапе проектирования сети первостепенное значение приобретают задачи минимизации энергопотребления. Вопросы повышения энергетической эффективности узлов сенсорной сети являются приоритетными [12].

Научные исследования в области анализа времени работы узла БСС показывают, что наиболее энергозависимыми режимами работы являются режимы активной передачи трафика [13]. Связано это с работой сетевого интерфейса при приеме, передаче и ожидании данных.

Безотказность источников питания играет одну из ключевых ролей, поскольку во многих случаях их резервирование отсутствует. Отказ источника, в частности снижение его емкости, может вывести из строя локальный сенсорный узел и, как следствие, повлиять на работоспособность всей сети. Проблема усугубляется ограниченной максимальной емкостью применяемых аккумуляторных батарей и кратной разницей в стоимости более емких источников.

Для снижения энергопотребления сенсорных узлов предлагается ряд методов, в частности: подходы, направленные на экономию энергии за счет оптимизации циклов работы передатчика; способы адаптации передатчика и приемника к изменяющимся внешним условиям; методы оптимизации маршрутизации и коррекции топологии сети с учетом энергозатрат каждого узла [14]. Для выравнивания потребляемой мощности всеми узлами сети применяются различные методы энергетической балансировки. Кроме того, одним из вариантов решения указанной проблемы является оптимизация покрытия БСС, в том числе с использованием кластерных и некластерных подходов [15].

Тем не менее, в известных работах отсутствует достаточный научный задел в области многоуровневого исследования БСС, предназначенных для мониторинга агропромышленных объектов. В работе [16] представлен метод анализа локальных и глобальных состояний иерархических многокомпонентных систем в условиях неопределенности. Однако без адаптивного отслеживания границ неопределенного воздействия факторов внешней среды затруднено формирование решений по экономическому расходованию общесетевых ресурсов. Методология многоуровневого синтеза, разработанная в [17], предлагает комплекс итеративных процедур для сквозного проектирования системы — от формирования исходного облика до рабочей детализации, — однако её применимость ограничена начальными фазами жизненного цикла, включающими разработку и проектирование.

Ряд принципов и моделей принятия согласованных решений для различных уровней и стадий функционирования БСС представлен в работе [18]. Большинство этих исследований опирается на принцип вертикальной декомпозиции «сверху-вниз», согласно которому характеристики синтезируемой системы определяются при помощи многоуровневой процедуры: от общесистемной модели с соответствующими показателями, параметрами условий, ограничений и управления — до моделей нижнего уровня с их показателями и параметрами. Недостатком такого подхода является жесткость и низкая эффективность управления, поскольку процесс принятия решений не включает предварительного детального анализа ресурсного потенциала элементов нижних уровней.

Современные исследования [19] предлагают осуществлять многоуровневый синтез БСС на основе принципов согласования уровней и внешнего дополнения. Согласно первому принципу, требования, сформированные на любом уровне системы, выступают в качестве ограничений при выборе моделей и определении функциональных возможностей нижележащих уровней. При невозможности выполнения этих требований осуществляется итеративная корректировка условий и результатов моделирования на вышестоящих уровнях. Принцип внешнего дополнения предполагает получение результатов на нижнем уровне, их верификацию с использованием данных и методов вышестоящих уровней и, при необходимости, уточнение этих результатов при переходе к синтезу системы вышележащего уровня.

Несмотря на значительные преимущества использования современных цифровых технологий для интенсификации агропромышленного производства, включая снижение себестоимости продукции на 20–30 % и повышение урожайности на 10–15 %, активное внедрение таких решений сдерживается отсутствием системного подхода к технической реализации цифровой инфраструктуры. Каждое из рассмотренных в литературе решений вносит свой вклад в повышение энергоэффективности БСС, однако, в контексте поставленных в данном исследовании задач, их прямое применение затруднено или оказывается невозможным.

Проведенный литературный обзор выявил существенный пробел в научных знаниях, заключающийся в отсутствии комплексных многоуровневых моделей систем точного земледелия на платформе БСС. Такие модели должны быть ориентированы на комплексное решение проблем, связанных с исчерпанием энергетических ресурсов и ограничениями радиопередающих элементов сенсорных узлов.

Целью настоящего исследования является разработка нового методического подхода к обеспечению надежности БСС. Подход основан на создании комплексной многоуровневой модели сетевой инфраструктуры мониторинга агропромышленных объектов, учитывающей не только параметры БСС и внешние факторы, но и синергетический эффект их взаимодействия, включая структурно-энергетические, частотно-динамические и топологодинамические аспекты.

Материалы и методы. Для достижения цели, заключавшейся в разработке комплексной многоуровневой модели сетевой инфраструктуры мониторинга агропромышленных объектов (рис. 1), был использован системный подход. Декомпозиция иерархической модели на пять уровней составила основу исследования. Для каждого уровня ранее были разработаны специальные модели и алгоритмы, обеспечивающие синергетический эффект. Методологическая база исследования включала оригинальные результаты, полученные и опубликованные авторами. Далее представлены ключевые модели и алгоритмы, обобщенные в разработанной модели.

На уровне устройства применялась модель технического состояния объектов. В качестве критерия оценки состояния радиосредства использовался коэффициент взаимной корреляции эталонного и искаженного сигналов [20]. Этот показатель демонстрирует высокую чувствительность к типам деградации, таким как межсимвольные искажения и аддитивные шумы. Для оптимизации энергопотребления на данном уровне использовали алгоритмы выбора режима передачи с минимальными искажениями. Эти алгоритмы в реальном времени анализируют качество канала связи и динамически переключают модуляцию и мощность передатчика, обеспечивая баланс между надежностью связи и эффективным использованием ресурсов. Такой подход позволяет повысить как надежность работы устройства, так и продолжительность его автономной работы.

На уровне физического канала использовалась модель канала с помехами и аппаратурными искажениями сигнала [21]. Аналитические модели каналов связи БСС представляли собой зависимости вероятности битовой ошибки при некогерентном приеме сообщений от энергетических и стохастических параметров искаженного сигнала и аддитивной помехи на входе приемника. Эти модели обеспечивают высокую точность прогнозирования качества связи в условиях нестабильных замираний и импульсных шумов. Для данного уровня применяется алгоритм оптимизации структуры сигнала с минимальной частотой битовой ошибки (BER). Его работа основывается на адаптивном подборе длительности символа и применении скрытой помехоустойчивой кодировки, что гарантирует надежную передачу данных при сохранении общей пропускной способности канала.

На уровне канала передачи данных использовалась модель энергопотерь узлов в канале с переменными характеристиками среды [22]. Данная модель устанавливает аналитическую связь между вероятностью битовой ошибки (BER), температурой нагрева узла, глубиной замирания сигнала в канале (К-фактор Райса) и отношением сигнал/шум (SNR). Учет теплового состояния узла позволяет прогнозировать его энергопотребление и надежность в процессе работы. Для управления длиной пакета данных и мощностью передатчика применялся специализированный алгоритм, который динамически находил компромисс между необходимостью повторной передачи коротких пакетов и энергозатратами на передачу длинных, минимизируя совокупные энергопотери в условиях изменяющейся помеховой обстановки. Это существенно увеличивает время автономной работы сети без ущерба для достоверности передаваемой информации.

На уровне маршрута применялась модель линейной БСС с гетерогенными участками радиосвязи и алгоритмы маршрутной балансировки энергопотерь в узлах ретрансляции [23]. Аналитические модели потерь времени и энергии учитывают межузловые расстояния, мощности передатчиков и особенности многолучевого распространения сигналов. На основе зависимостей потерь времени от числа ретрансляторов использовались алгоритмы развертывания гетерогенной БСС с критерием минимизации задержки сети, которые не ограничивали ресурсы. Это обеспечивало гибкость планирования как для задач с избыточными, так и с ограниченными ресурсами. Алгоритмы балансировки перераспределяли нагрузку между узлами, предотвращая преждевременный выход из строя из-за истощения энергии и удлиняя общий срок службы сети. Таким образом, этот комплекс моделей и алгоритмов позволил оптимизировать ключевые показатели сети — энергоэффективность, задержку и живучесть.

На сетевом уровне использовалась модель кластеризации БСС, учитывая взаимные помехи в каналах и остаточный заряд узловых батарей, а также алгоритмы маршрутизации с минимальными потерями времени и энергии [24]. Проведенные исследования позволили сформировать достаточное количество соединений между узлами, соответствующих критериям надежности связи, нормированным в соответствии с требованиями к помехоустойчивости и своевременности передачи пакетов данных. Алгоритмы маршрутизации динамически адаптировались к изменению уровня помех и остаточной энергии узлов, выбирая путь, который обеспечивал баланс между скоростью доставки и энергозатратами. Результаты моделирования позволили реализовывать алгоритмы управления топологией и кластеризацией сети. Эти алгоритмы обеспечили самовосстановление сети при выходе из строя ключевых узлов и позволили перераспределять нагрузку для предотвращения перегрузки отдельных кластеров. Такой подход повысил отказоустойчивость и общую продолжительность жизни сети в условиях динамической помеховой обстановки.



Рис. 1. Схема многоуровневой сетевой инфраструктуры мониторинга агропромышленных объектов на основе беспроводных сенсорных сетей

Результаты исследования. Результатом исследований стала многоуровневая сетевая инфраструктура мониторинга агропромышленных объектов. Составляющие данной системы представлены в таблице 1.

Таблица 1

Составляющие системы многоуровневого управления надежностью БСС
с учетом различных дестабилизирующих факторов

Уровень v	Факторы дестабилизации $\xi^{(v)}$	Показатели качества функционирования $\varphi^{(v)}$	Управление оптимизируемыми параметрами $\omega^{(v)}$	Ограничения ресурсов Ω_v	Дополнительные (предлагаемые для учета) условия $\zeta^{(v)}$
1 – устройства	Аппаратурные дефекты, искажающие сигнал	Относительный показатель степени искажения сигнала	Перераспределение энергии в полосе частот сигнала	Режимные	Радиочастотные отпечатки модемов при различных дефектах
2 – физического канала	Внешевые помехи с переменной частотой	Вероятность битовой ошибки (BER)	Подбор фазокодовой структуры сигнала	Структурно-кодовые	Неравномерность спектров сигнала и помехи

3 – канала передачи данных	Вариативность температуры среды, многолучевость сигналов	Вероятность потери пакета (PER), частота повторной передачи. Энергопотери узла за раунд связи	Фрагментация пакетов данных. Оптимизация уровня мощности передачи	Энергетические; наличие протокола ARQ	Термозависимые разрядные характеристики батарей
4 – линейного маршрута	Гетерогенность различных участков маршрута	Сквозная задержка передаваемого пакета. Энергетический баланс узлов	Адаптивное чередование активностью узлов	Аппаратурные; динамические	Особенности распространения радиоволн
5 – сети	Взаимные помехи от соседних узлов	Количество альтернативных маршрутов передачи данных	Управление топологией и кластеризацией сети	Топологические	Топографические условия размещения узлов

На основании полученных результатов метод многоуровневого синтеза БСС определяется как итеративный процесс, заключающийся в последовательном определении параметров сигналов, функциональных и мобильных режимов сетевых узлов при учете ограниченности ресурсов каждого уровня.

Как следует из рис. 1, в данном исследовании представлены следующие уровни анализа и синтеза БСС: Θ_1 — устройства; Θ_2 — физического канала; Θ_3 — передачи данных; Θ_4 — линейного маршрута; Θ_5 — сетевой.

Каждая группа характеристик $\Theta_v = \{\varphi^{(v)}, \xi^{(v)}, \varpi^{(v)}\}$, где $v = 1, 2, 3, 4, 5$, включает следующие показатели:

1) **показатели эффективности** $\varphi^{(v)} \in \Phi_v$, определяющие уровень достижения целевых показателей помехозащищенности в результате применения синтезированных алгоритмов. В контексте рассматриваемой предметной области к числу таких показателей относятся: $\varphi^{(1)}$ — коэффициенты взаимной корреляции искаженного и опорного сигналов (характеризующие степень их перекрытия в частотно-временной области); $\varphi^{(2)}$ — вероятность битовой ошибки; $\varphi^{(3)}$ — частота повторной передачи пакета при обнаружении искаженного бита; $\varphi^{(4)}$ — сквозная задержка передаваемого пакета, энергетический баланс узлов на маршруте; $\varphi^{(5)}$ — вероятность того, что время целостного состояния БСС не меньше требуемого надсистемой периода (например, периода вегетации агрокультуры);

2) **основные дестабилизирующие факторы** $\xi^{(v)} \in \Xi_v$, оказывающие непосредственное влияние на значения показателей $\varphi^{(v)}$: $\xi^{(1)}$ — аппаратурные дефекты узлового модема, искажающие сформированный сигнал; $\xi^{(2)}$ — помеха со спектром в пределах полосы пропускания приемника; $\xi^{(3)}$ — изменяющаяся температура внешней среды и условия распространения радиоволн; $\xi^{(4)}$ — неоднородность различных участков линейного маршрута; $\xi^{(5)}$ — взаимные помехи от соседних узлов;

3) **управляемые параметры** $\varpi^{(v)} \in \Omega_v$, т.е. параметры алгоритмов распределения ресурсов определенного уровня, позволяющие компенсировать дестабилизирующее воздействие среды, отраженное условиями выбора: $\varpi^{(1)}$ — вектор перераспределения энергии между ортогональными составляющими сигнала на уровне изменения режима работы модема; $\varpi^{(2)}$ — подбор фазо-кодовой структуры сигнала с режекцией участка спектра, пораженного помехой; $\varpi^{(3)}$ — фрагментация длины пакета либо выбор оптимальной градации мощности передатчика с целью снижения энергопотерь узла; $\varpi^{(4)}$ — график очередности смены состояний активности узла «сон-бодрствование»; $\varpi^{(5)}$ — матрица выбора координат очередного местоположения узлов БСС и график смены глав кластеров;

4) **ограничения на ресурсы** Ω_v управляемых параметров: Ω_1 — виды сменяемых режимов модема; Ω_2 — номенклатура сигнально-кодовых структур; Ω_3 — форматы пакета данных, градации мощности передатчика; Ω_4 — официальные возможности управления активностью радиотракта; Ω_5 — ресурс подвижных средств и возможных мест размещения узлов БСС.

Параметры верхнего уровня, заданные выражением $\{\varpi^{(v+1)}\}$, являются ограничениями для нижнего уровня:

$$\Omega_v \subset \{\varpi^{(v+1)}\} \in \Omega_{v+1}. \quad (1)$$

Параметры Φ_v , Ξ_v , Ω_v являются областями допустимых значений соответствующих показателей. Модель системы радиосвязи представляет собой систему детерминированных и статистических взаимосвязей, объединяющих показатели эффективности, эксплуатационные условия и управляемые параметры всех иерархических уровней.

Выделяются следующие типы зависимостей.

Одноуровневые зависимости, которые устанавливают взаимосвязь между показателями эффективности $\varphi^{(v)}$, условиями $\xi^{(v)}$ и параметрами выбора $\varpi^{(v)}$ на каждом v -м уровне:

$$\varphi^{(v)} = f_v [\varpi^{(v)}, \xi^{(v)}]. \quad (2)$$

Несмотря на широкое применение данных зависимостей для решения локальных задач обеспечения помехозащищенности в пределах отдельного уровня, их использование создает существенные трудности при разработке решений по оптимальному распределению ограниченных системных ресурсов между уровнями.

Межуровневые зависимости, которые определяют взаимосвязь между показателями эффективности v -го и $(v - 1)$ -го уровней, условиями v -го и $(v + 1)$ -го уровней и параметрами выбора v -го уровня:

$$\varphi^{(v)} = f_{v, v-1, v+1} \left[\varphi^{(v-1)} \geq \varphi_{mp}^{(v-1)}, \varpi^{(v)} \in \Omega_v \subset \{\varpi^{(v+1)}\}, \xi^{(v)} \right]. \quad (3)$$

Показатель эффективности $\varphi^{(v-1)}$ нижележащего уровня может быть учтен при синтезе по схеме «снизу-вверх», характерной для этапа эксплуатации (включая обеспечение надежности БСС), в отличие от проектной стадии, использующей синтез «сверху-вниз» [25].

На каждом иерархическом уровне синтез объекта реализуется посредством оптимизации управляемых переменных $\varpi^{(v)}$ в рамках установленных ограничений Ω_v . Данные ограничения формируются значениями параметров смежного верхнего уровня $\{\varpi^{(v+1)}\}$. Необходимость перехода на вышестоящий уровень возникает при невозможности обеспечения требуемой энергетической надежности локальными ресурсами, что обуславливает привлечение ресурсов системы. Данное решение принимается с комплексным учетом факторов среды синтезируемого уровня, включая температурный режим и помеховую обстановку.

Следуя принятой в системном подходе процедуре математического описания сложных объектов [26], ключевым этапом моделирования является формирование системы показателей эффективности и оптимизационных критериев. Эти параметры служат основанием для синтеза оптимальных алгоритмов распределения ресурсов, обеспечивающих требуемую надежность БСС и позволяющих оценивать результативность управляемых решений в условиях многоуровневого внешнего воздействия. При этом выбранные показатели и критерии должны обеспечивать количественную оценку степени реализации базовых функций сетевыми узлами на всех иерархических уровнях, гарантируя достижение установленных целевых значений в соответствии с системным предназначением системы.

Критерий функционирования объекта в системе v -го уровня задает область допустимых значений показателя эффективности Φ_v^* , где $\varphi^{(v)} \in \Phi_v^*$. В контексте обеспечения надежности БСС целесообразно выделение двух критериев: пригодности и оптимальности.

При ограниченных ресурсах и скалярном показателе $\varphi^{(v)}$ критерий пригодности $\varphi^{(v)} \geq \varphi_{\text{доп}}^{(v)}$ определяет целевую область $\Phi_v^* = [\varphi_{\text{доп}}^{(v)}, 1]$, где $\varphi_{\text{доп}}^{(v)}$ — допустимое значение показателя. Это позволяет сформулировать задачу синтеза алгоритмов энергоэффективности как обратную задачу оптимизации — найти минимальные значения ресурсов $\varpi^{(v)} \in \Omega_v$, обеспечивающие достижение допустимых значений показателей эффективности.

Для критерия оптимальности $\varphi^{(v)}$ → $\max_{\varpi^{(v)} \in \Omega_v}$ область Φ_v^* вырождается в точку, соответствующую максимальному значению $\varphi^{(v)}$ при допустимых значениях параметров выбора $\varpi^{(v)} \in \Omega_v$ и заданных условиях выбора. В данном контексте разработка управляющих алгоритмов сводится к решению прямой задачи оптимального распределения ресурсов.

Локальное использование анализируемых критериев не позволяет осуществить комплексный учет особенностей процессов обеспечения надежности БСС при вариациях рабочих режимов сетевых узлов. В связи с этим многоуровневый процесс управления надежностью целесообразно реализовывать на основе принципа достаточности, обеспечивающего улучшение характеристик системы при минимальных дополнительных ресурсных затратах.

Практическая реализация принципа достаточности основана на итерационном процессе выбора параметров, где миграция между иерархическими уровнями происходит при возрастании ресурсных затрат, необходимых для обеспечения заданных показателей надежности. На каждом шаге выполняется проверка достаточности вырабатываемых решений для выполнения установленных нормативов эффективности. Инструментарий для реализации данного подхода включает в себя аппарат критериев пригодности и иерархический набор моделей, обеспечивающих информационную поддержку при принятии проектных решений на всех этапах синтеза сложной системы.

К числу **дополнительных условий выбора решений** $\zeta^{(v)}$, учитываемых в данной работе, относятся: $\zeta^{(1)}$ — радиочастотные отпечатки модемов при различных дефектах; $\zeta^{(2)}$ — неравномерность спектров сигнала и помехи; $\zeta^{(3)}$ — термозависимые разрядные характеристики батарей; $\zeta^{(4)}$ — особенности распространения радиоволн; $\zeta^{(5)}$ — топографические условия размещения узлов.

С учетом иерархической организации ресурсов, описываемой цепочкой вложенных множеств:

$$\dots, \varpi^{(v-1)} \in \Omega_{v-1} \subset \{\varpi^{(v)}\}, \varpi^{(v)} \in \Omega_v \subset \{\varpi^{(v+1)}\}, \varpi^{(v+1)} \in \Omega_{v+1} \subset \{\varpi^{(v+2)}\}, \dots,$$

где с ростом уровня системы наблюдается увеличение объемов и стоимости ресурсов, выбор решений по обеспечению заданной помехозащищенности предполагает первоочередное использование ресурсов нижних уровней. В этом случае общая постановка проблемы имеет следующий вид:

— на основе известных и разработанных одноуровневых и многоуровневых моделей вида (2) и (3) системы радиосвязи, учитывающих как основные условия $\zeta^{(v)}$ — факторы дестабилизации, так и дополнительные условия $\zeta^{(v)}$ выбора решения, определить минимальный уровень v^* исследуемой системы, на котором за счет оптимального распределения ресурса $\varpi^{(v)} \in \Omega_v$ обеспечивается показатель качества функционирования БСС $\phi^{(v)*}$ не ниже допустимого (требуемого) значения $\phi_{\text{доп}}^{(v)}$. При этом значение $\phi_{\text{доп}}^{(v)}$ рассчитывается с учетом требуемой надежности БСС, определяемой надсистемой.

В математической постановке данная задача имеет вид:
требуется определить

$$v^* = \min \left\{ v = f^{-1} \left[\max_{\varpi^{(v)} \in \Omega_v} \left\{ \phi^{(v)} \right\} \geq \phi_{\text{доп}}^{(v)}, \varpi^{(v)*}, \xi^{(v)}, \zeta^{(v)} \right] \right\}, \quad (4)$$

при котором

$$\begin{aligned} \varphi^{(v-1)*} &= \max_{\varpi^{(v-1)} \in \Omega_{v-1}} \left\{ \phi^{(v-1)} \left[\varphi^{(v-2)}, \varpi^{(v-1)}, \xi^{(v-1)}, \zeta^{(v-1)} \right] \right\} < \phi_{\text{доп}}^{(v-1)}; \\ \varphi^{(v)*} &= \max_{\varpi^{(v)} \in \Omega_v} \left\{ \phi^{(v)} \left[\varphi^{(v-1)}, \varpi^{(v)}, \xi^{(v)}, \zeta^{(v)} \right] \right\} \geq \phi_{\text{доп}}^{(v)}; \\ \varphi^{(v+1)*} &= \max_{\varpi^{(v+1)} \in \Omega_{v+1}} \left\{ \phi^{(v+1)} \left[\varphi^{(v)}, \varpi^{(v+1)}, \xi^{(v+1)}, \zeta^{(v+1)} \right] \right\} \geq \phi_{\text{доп}}^{(v+1)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Общая научная проблема решается поэтапного (в соответствии с рассматриваемыми уровнями обеспечения надежности БСС) путем последовательной проверки выполнения неравенств (5). Левая часть каждого из неравенств (5) представляет собой решение частной задачи исследования, при постановке которой используется критерий оптимальности. С учетом определенных характеристик многоуровневого представления БСС частными задачами исследования являются:

1) минимизация аппаратурных искажений формы сигнала относительно опорного сигнала:

$$\phi^{(1)} \left[\varpi^{(1)}, \xi^{(1)}, \zeta^{(1)} \right] \rightarrow \max_{\varpi^{(1)}} \varpi^{(1)} \in \Omega_1; \quad (6)$$

2) оптимальное распределение энергии сигнала между ортогональными составляющими с учетом вероятностного распределения частоты помехи в спектре сигнала:

$$\phi^{(2)} \left[\varphi^{(1)}, \varpi^{(2)}, \xi^{(2)}, \zeta^{(2)} \right] \rightarrow \max_{\varpi^{(2)}} \varpi^{(2)} \in \Omega_2; \quad (7)$$

3) оптимизация мощности передатчика и длины пакета с целью снижения энергозатрат узла за раунд связи:

$$\phi^{(3)} \left[\varphi^{(2)}, \varpi^{(3)}, \xi^{(3)}, \zeta^{(3)} \right] \rightarrow \max_{\varpi^{(3)}} \varpi^{(3)} \in \Omega_3; \quad (8)$$

4) оптимизация графика чередования активностью узлов в режимах «сон/бодрствование» с целью маршрутной балансировки энергопотребления:

$$\phi^{(4)} \left[\varphi^{(3)}, \varpi^{(4)}, \xi^{(4)}, \zeta^{(4)} \right] \rightarrow \max_{\varpi^{(4)}} \varpi^{(4)} \in \Omega_4; \quad (9)$$

5) оптимальная кластеризация сети, обеспечивающая требуемое число альтернативных маршрутов с допустимым снижением узловых энергоресурсов:

$$\phi^{(5)} \left[\varphi^{(4)}, \varpi^{(5)}, \xi^{(5)}, \zeta^{(5)} \right] \rightarrow \max_{\varpi^{(5)}} \varpi^{(5)} \in \Omega_5; \quad (10)$$

Как следует из выражений (6)–(10), диапазоны изменения варьируемых параметров $\varpi^{(v)}$ ограничены ресурсными возможностями системы Ω_v на соответствующем уровне управления v , в частности:

1) на уровне устройств — наличием режимов коррекции (предискажения) спектра формируемых сигналов для оптимального перераспределения энергии в полосе пропускания модема;

2) на физическом уровне — возможностью подбора фазо-кодовых конструкций с прямым расширением спектра для минимизации влияния помех и аппаратурных искажений на достоверность приема сообщений;

3) на уровне канала передачи данных — наличием протокола повторного запроса пакетов (ARQ) в случае выявления на приеме искаженных битов с последующей оптимизацией режима передачи;

4) на уровне маршрута — ограниченностью аппаратурного и динамического ресурсов, позволяющих обеспечивать адаптивное управление активностью узлов (в режимах сна/бодрствования);

5) на сетевом уровне — возможностью реконфигурации структуры сети при формировании кластеров и резервных маршрутов передачи данных (таблица 1).

Интеграция дополнительных условий $\zeta^{(v)}$, не учитывавшихся ранее в одноуровневых моделях, в процедуру оптимизации алгоритмов обеспечения надежности БСС способствует развитию методологического аппарата, подтверждает научную новизну формулировки и решения прикладных исследовательских задач.

Обсуждение. Проведенный аналитический анализ показал, что традиционные методологии исследования энергетической надежности беспроводных сенсорных систем часто страдают от фрагментарности, что снижает их эффективность. Основной проблемой этих подходов является игнорирование влияния технических состояний низкоуровневых узлов на выходные показатели систем верхнего уровня. В результате это снижает точность оценки и приводит к неоптимальному распределению ресурсов.

В представленной работе эта проблема решена за счёт итерационного многоуровневого подхода, основанного на принципе достаточности. Его ключевым преимуществом является поиск минимального иерархического уровня v , на котором распределение ресурсов $\sigma(v)$ обеспечивает требуемое значение показателя качества $\phi(v) \geq \phi_{\text{доп}}(v)$. По сравнению с известными методами [16], применение данного подхода позволяет достигать целевых показателей надежности с минимальными ресурсными затратами.

Научная новизна работы выражается в интеграции в модель новых условий $\zeta(v)$, которые ранее в исследованиях не учитывались [20–24]. Это обеспечивает более корректные и практико-ориентированные алгоритмы управления, что имеет ключевое значение для повышения надежности БСС. Разработанная многоуровневая модель сетевой инфраструктуры демонстрирует, как системный подход к проектированию может улучшить управление надежностью. Она позволяет интегрировать параметры технического состояния сенсорных узлов, что в конечном итоге повышает точность прогнозирования рабочих характеристик системы и позволяет адаптировать ее работу к условиям в реальном времени.

Многоуровневая модель сетевой инфраструктуры, построенная на принципах иерархического синтеза, демонстрирует возможность согласованного учёта параметров отдельных сенсорных узлов [13] в контексте глобальных показателей функционирования сети. По сравнению с моделями, в которых состояние узлов описывается агрегированно, предложенный подход обеспечивает более детализированное и вместе с тем системное представление, что повышает точность прогнозирования рабочих характеристик и устойчивость принимаемых управляющих решений.

Разработанная методология управления надёжностью на основе принципа достаточности обеспечивает компромисс между качеством функционирования и ресурсными ограничениями. В отличие от работ, где приоритет отдается либо максимизации надёжности, либо минимизации энергопотребления, здесь предлагается механизм согласования этих критерии на каждом уровне иерархии. Это выражается, в частности, в алгоритмах маршрутизации, учитывающих остаточную энергию узлов и помеховую обстановку в канале связи. Их применение позволяет не только повысить энергоэффективность и продлить срок службы сети, но и обеспечить требуемые показатели надёжности в условиях изменяющихся внешних воздействий.

Таким образом, представленный подход формирует более целостную и практико-ориентированную основу для управления энергетической надёжностью БСС по сравнению с существующими решениями. Он сочетает детальный учёт низкоуровневых состояний с системным описанием верхнего уровня, расширяя возможности адаптации сети к реальным условиям эксплуатации и оптимизации использования ограниченных ресурсов.

Заключение. Несмотря на достигнутые результаты, критическое понимание границ и возможностей применяемых моделей остается актуальным. Намеченные в работе направления требуют дальнейшего исследования, включая более глубокое понимание механик взаимодействия дестабилизирующих факторов и системных откликов. Чтобы подтвердить полученные результаты и оценить их стационарность, необходимо проводить полевые испытания и проводить аналогичные исследования в различных агроклиматических условиях.

Настоящее исследование не только подтверждает необходимость применения многоуровневого подхода к управлению надежностью БСС, но и предоставляет основу для дальнейших исследований в этой области. Подробный анализ и интеграция факторов, влияющих на надежность и энергоэффективность, потенциально открывают новые горизонты для применения БСС в агропромышленности и других сферах, требующих эффективного и надежного мониторинга.

Практическая реализация может включать в себя развертывание гетерогенных БСС, в которых узлы-маршрутизаторы собирают данные с датчиков, балансируя энергопотребление на основании разработанной комплексной многоуровневой модели сетевой инфраструктуры мониторинга агропромышленных объектов. К примеру, предложенные алгоритмы могут быть использованы для построения цифровых карт полей, автоматизации полива и внесения средств защиты растений, минимизации затрат и воздействия на окружающую среду.

Список литературы / References

1. Mazitov AA. Web Application for Mathematical Modeling of Unsteady Oil Flow in Porous Medium. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(4):422–432. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-422-432>
2. Samoylenko I, Fedorenko V, Samoylenko V. Adaptive Data Relay Transmission in Wireless Sensor Networks for Reliable Crop Growth Monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2025;234:110367. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110367>
3. Hamouda F, Puig-Sirera À, Bonzi L, Remorini D, Massai R, Rallo G. Design and Validation of a Soil Moisture-Based Wireless Sensors Network for the Smart Irrigation of a Pear Orchard. *Agricultural Water Management*. 2024;305:109138. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109138>
4. Xinqing Xiao. Sustainable Agriculture with Self-Powered Wireless Sensing. *Agriculture*. 2025;15:234. <https://doi.org/10.3390/agriculture15030234>
5. Al-Attafi MKR, Yesaulko AN, Kotova AS. Optimization of Macro- and Microelement Content in Soil for Sunflower Cultivation under Unstable Moisture Conditions of the Central Ciscaucasus Region. *Agrarian Bulletin of the North Caucasus*. 2025;15(2):74–84. <https://doi.org/10.31279/2949-4796-2025-15-2-74-84>
6. Jingxin Yu, Jiang Liu, Congcong Sun, Jiaqi Wang, Jianchao Ci, Jing Jin, et al. Sensing Technology for Greenhouse Tomato Production: A Systematic Review. *Smart Agricultural Technology*. 2025;11:101020. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101020>
7. Dinn C, Adhikari R, Hassan E, Shakshuki E, Eaman A. Developing a New IoT Network Topology for Effective Greenhouse Monitoring and Control. *Procedia Computer Science*. 2025;265:285–292. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.07.183>
8. Sharma B, Koundal D. Cattle Health Monitoring System Using Wireless Sensor Network: A Survey from Innovation Perspective. *IET Wireless Sensor Systems*. 2018;8(4):143–151. <https://doi.org/10.1049/iet-wss.2017.0060>
9. Sisinni E, Saifullah A, Song Han, Jennehag U, Gidlund M. Industrial Internet of Things: Challenges, Opportunities, and Directions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2018;14(11):4724–4734. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2852491>
10. Tsarev OYu, Tsarev YuA. Validation of Reliability Indices during Experimental Development of a Complex Technical Series System. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(1):26–33. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-1-26-33>
11. Wei He, Guan-Yu Hu, Zhi-Jie Zhou, Pei-Li Qiao, Xiao-Xia Han, Yuan-Yuan Qu, et al. A New Hierarchical Belief-Rule-Based Method for Reliability Evaluation of Wireless Sensor Network. *Microelectronics Reliability*. 2018;87:33–51. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2018.05.019>
12. Lajara R, Pelegri-Sebastiá J, Solano JJP. Power Consumption Analysis of Operating Systems for Wireless Sensor Networks. *Sensors*. 2010;10(6):5809–5826. <https://doi.org/10.3390/s100605809>
13. Lajara R, Perez-Solano JJ, Pelegri-Sebastia J. Predicting the Batteries' State of Health in Wireless Sensor Networks Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2018;65(11):8936–8945. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2808925>
14. Maltseva NS, Azhmuratova RR, Bondarenko DS. Extending the Service Life of a Wireless Sensor Network Environmental Monitoring. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2023;46(4):99–103. <https://doi.org/10.52684/2312-3702-2023-46-4-99-103>
15. Nam-Tuan Le, Yeong Min Jang. Energy-Efficient Coverage Guarantees Scheduling and Routing Strategy for Wireless Sensor Networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2015;11:612383. <https://doi.org/10.1155/2015/612383>
16. Reformat MZ, Yager RR. Multi-Level State Evaluation in Complex Systems: Information Granules and Evidence Theory Approach. *Granular Computing*. 2024;9:57. <https://doi.org/10.1007/s41066-024-00477-3>
17. Volchenkov D. Mathematics of Multi-Level Complex Systems. *Discontinuity, Nonlinearity, and Complexity*. 2014;3(3):223–225. <https://doi.org/10.5890/DNC.2014.09.001>
18. Khan MA, Shalu, Naveed QN, Lasisi A, Kaushik S, Kumar S. A Multi-Layered Assessment System for Trustworthiness Enhancement and Reliability for Industrial Wireless Sensor Networks. *Wireless Personal Communications*. 2024;137:1997–2036. <https://doi.org/10.1007/s11277-024-11391-x>
19. Ojeda F, Mendez D, Fajardo A, Ellinger F. On Wireless Sensor Network Models: A Cross-Layer Systematic Review. *Journal of Sensor and Actuator Networks*. 2023;12(4):50. <https://doi.org/10.3390/jsan12040050>
20. Fedorenko V, Samoylenko V, Vinogradenko A, Samoylenko I, Sharipov I, Anikuev S. Mathematical Aspects of Stable State Estimation of the Radio Equipment in Terms of Communication Channel Functioning. In book: Vishnevskiy VM, Samouylov KE, Kozyrev DV (eds). *Distributed Computer and Communication Networks*. Cham: Springer; 2019. P. 547–59. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36625-4_44

21. Listova NV, Fedorenko VV, Samoylenko IV, Emelyanenko IV, Samoylenko VV. The Communications Channels Models in Wireless Sensor Networks, Based on the Structural-Energetic Interaction between Signals and Interferences. In: *Proc. Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*. New York City: IEEE; 2018. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/MWENT.2018.8337298>
22. Fedorenko V, Samoylenko I, Samoylenko V. Fragmentation of Data Packets in Wireless Sensor Network with Variable Temperature and Channel Conditions. *Computer Communications.* 2024;214:201–214. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2023.12.001>
23. Fedorenko V, Oleinikov D, Samoylenko I, Samoylenko V. Criteria for the Deployment of a Heterogeneous Linear WSN: Operability vs Energy Efficiency. *Ad Hoc Networks.* 2023;147:103202. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2023.103202>
24. Fedorenko VV, Samoylenko VV, Alduschenko DV, Emelyanenko IV. Methods of Modeling Wireless Sensor Networks Topology Considering Internodal Interference. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics.* 2020;(3):34–44. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2020-3-34-44>
25. Lei Zou, Zidong Wang, Jun Hu, Yurong Liu, Xiaohui Liu. Communication-Protocol-Based Analysis and Synthesis of Networked Systems: Progress, Prospects and Challenges. *International Journal of Systems Science.* 2021;52(14):3013–3034. <https://doi.org/10.1080/00207721.2021.1917721>
26. Buldakova T. Approaches to the Development of Complex Systems Models. In: *Proc. XXI International Conference. Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP)*. New York City: IEEE; 2019. P. 374–378. <https://doi.org/10.1109/CSCMP45713.2019.8976542>

Об авторе:

Владимир Валерьевич Самойленко, кандидат технических наук, доцент кафедры «Инженеринг и ИТ-решения» Ставропольского государственного аграрного университета (355000, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearchGate](#), [ScopusID](#), samoilenko.vv@stgau.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Vladimir V. Samoylenko, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Engineering and IT-Solutions, Stavropol State Agrarian University (12, Zootechnichesky Lane, Stavropol, 355035, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ResearchGate](#), [ScopusID](#), samoilenko.vv@stgau.ru

Conflict of Interest Statement: the author declares no conflict of interest.

The author has read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 15.09.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 01.10.2025

Принята к публикации / Accepted 20.10.2025