

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2\(22\)-23](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-23)



МРНТИ: 50.43.15

А.Б. Абдыхамидова*, Е.Ж. Сарсикеев¹, П.Ш. Мәди¹, Ә.Ж. Қалиқан¹, О.В. Гальцева²

¹Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, 010011, Республика Казахстан, г. Астана, пр. Женис, 62,

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634034, Российская Федерация, г.Томск, пр.Ленина,30.

*e-mail: abdykhamidovaa@gmail.com

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ИОТ-МОНИТОРИНГА В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ

Аннотация: В настоящей работе приводятся результаты сравнительного анализа архитектуры системы IoT-мониторинга в горнодобывающей отрасли. Анализируется внедрение технологий интернета вещей в целях повышения эффективности мониторинга и управления в промышленной среде. Акцентируется внимание на выполнение функции по обеспечению безопасных условий труда, повышению производительности и экологической устойчивости, а также соблюдению нормативных требований. Кроме того, в данной статье изучается текущее состояние информационных технологий в горнодобывающей промышленности с акцентом на риски и последствия, вызванные устаревшим оборудованием, ненадежным программным обеспечением, степенью цифровизации. В этом исследовании обсуждается интеграция технологий IoT в существующие информационные системы горнодобывающей отрасли, усиливая их уровень безопасности, эффективности и устойчивости. Научная новизна исследования заключается в создании феноменологической модели архитектуры IoT системы, подходящей для широкого спектра операций в горнодобывающей промышленности. В работе при анализе детально рассматриваются оптимизация процессов, функционирование распределенных сенсорных систем, осуществляющих сбор критически важных данных, их обратотку и анализ в режиме реального времени. На основе полученной информации формируются обоснованные решения для внедрения интеллектуальных систем мониторинга и управления, ориентированных на функционирования устойчивого процесса.

Ключевые слова: машинное зрение, системы мониторинга, раннее предупреждение, моделирование, методы прогнозирования, карьеры.

Введение

В настоящее время в горнодобывающей промышленности особое внимание уделяется безопасности. Этому есть множество причин и факторов. К ним относятся

- жизнь и здоровье рабочих на горнодобывающем предприятии;
- экономические аспекты, такие как временные остановки работы, простои, износ оборудования, поломки техники и транспорта;
- экологические факторы.

В научной отрасли представлен значительный массив работ, посвящённых решению ряда актуальных задач. К ним можно отнести:

1. разработка систем мониторинга и контроля,
2. моделирование процессов и проведение испытаний,...
3. создание методов оценки и прогнозирования состояния,
4. внедрение IoT-систем.

Традиционными системами мониторинга, которые используются до сегодняшнего дня, являются приборы Minimate Pro, Micromate, которые соответствуют требованиям нормативных документов и демонстрируют высокую надежность и стабильность работы. Однако, они имеют ряд недостатков, такие как, невозможность работать в режиме реального времени, не интегрируются с IoT, облаком, Machine Learning-анализом, а также сбор данных осуществляется вручную, что требует физическое присутствие устройства. На рисунке 1 показана концептуальная схема применения промышленного интернета вещей для обеспечения безопасности и мониторинга в горнодобывающей отрасли.



Рисунок 1 – Концептуальная схема применения IoT

Основными проблемами являются отсутствие надежных систем, которые предоставляют точные прогнозы в режиме реального времени, а также отсутствие методик с интеграциями операционной системы мониторинга для безопасности горных работ. Исследование состоит из нескольких новых областей, которые требуют детального рассмотрения и практических испытаний.

В работе [1] рассматриваются возможности IoT-систем и обсуждаются некоторые преимущества использования технологии в горнодобывающей промышленности. Датчики IoT используют радиочастотное определение местоположения, радар и технологии глобальной системы позиционирования, чтобы определить местонахождение техники или транспортных средств с целью предотвращения несчастных случаев в шахтах. Основной проблемой подобных комплексов является интеграция технологий IoT с существующими системами и обеспечение совместимости между различными устройствами и платформами. Для полноценного функционирования требуются значительные инвестиции в обновление устаревших систем и обеспечение взаимодействия между компонентами системы без отрицательного влияния друг на друга.

Целью работы [2] является создание беспроводной IoT-системы мониторинга сейсмических колебаний грунта в режиме реального времени при взрывных работах на карьерах. В качестве решаемых задач ставятся непредсказуемые вибрации от взрывов, а также обеспечение нормативных требований и снижение рисков аварийных ситуаций. В качестве результата предлагается модель RF, которая наиболее точно прогнозирует уровень вибраций и интегрируется с системой IoT-мониторинга, а также комплексная сеть для минимизации рисков аварийных ситуаций, в конечном итоге, что позволяет выполнять требования нормативных документов безопасности и повышать общую устойчивость операций.

В работе [3] предлагается система на базе интернета вещей, использующая датчики для обнаружения концентрации газов, определения температуры воздуха и влажности в подземных шахтах. Для оценки состояния шахтёров во время работы в подземных шахтах контролируется концентрация токсичных и горючих газов, что является важной задачей обеспечения безопасности подземных работ. Разработанная система мониторинга состоит из четырех блоков, а именно: блока измерения параметров, блока анализа данных, блока передачи информации и блока автоматического управления. В исследовании в качестве микроконтроллера используется элементная база Arduino UNO, которая обеспечивает

промежуточное взаимодействие между измерительными органами и устройствами передачи данных в режиме реального времени.

Для раннего выявления трещин в работе [4] предлагается мониторинговая система на базе цифрового двойника. На основе концептуальных моделей или данных геосканирования создаются визуализации физических объектов. Цифровым двойником прогнозируются производительность, оцениваются данные диспетчеризации, для этого используются информации полученные через IoT-датчики. Измерительная система с реальных открытых угольных шахт передает цифровые данные режима реального времени в виртуальную платформу через фреймворк (движения грунта, деформации, температура, итд), как показано на рисунке 2.

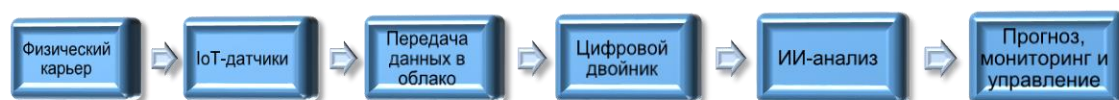


Рисунок 2 – Алгоритм структуры работы цифрового двойника

Методы исследования

Использованы системный и сравнительный анализ для выявления основных идей, методов и средств достижения цели с последующей группировкой по заданным критериям сравнения технологий, архитектуры, методов измерения и обработки данных [5]. В конечном итоге что позволяет определить единство и различие предлагаемых технологий, наличие проблемных вопросов и сформировать возможные пути решения.

При сравнительном анализе IoT-мониторинг систем безопасности основывается на применении комплекса общенаучных и инженерных методов исследования. Методы математического моделирования и компьютерной симуляции позволяют исследовать поведение IoT-систем. Для обобщения результатов исследований используются методы анализа и синтеза, а также индуктивно-дедуктивный подход. Основную роль играет сравнительный анализ, для оценки различных протоколов передачи данных (LoRa, ZigBee, цифровой двойник) [6], типы датчиков и архитектурные решения.

Результаты исследования

С учетом вышеизложенного, в результате анализа в таблице ниже подводятся следующие систематизированные результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Систематизированные результаты анализа системы мониторинга

Системы мониторинга	Преимущества	Недостатки
1	2	3
Zigbee	– низкое энергопотребление; – подходит для беспроводной сети; – для шахт, где невозможно тянуть кабели; – поддерживает mesh-топологию;	– дальность ограничена; – чувствительность к экранированию породами;
LoRa	– большая дальность; – подходит для распределенных датчиков; – для больших карьеров;	– низкая скорость передачи; – задержки передачи данных; – в подземных условиях сигнал может не ловить;
Xbee	– простое подключение к Arduino; – готовый модуль; – поддерживает Zigbee-mesh;	– высокая стоимость; – ограниченная дальность; – требует конфигурации;
Цифровой двойник	– можно отслеживать состояние объекта; – цифровая модель постоянно обновляется; – большие данные+анализ; – возможность прогнозировать; – поддерживает промышленные платформы;	– пока остаются коцепцией; – нет единых стандартов; – технологии еще формируются; – мало разработанных систем мониторинга для открытых угольных карьеров; – требуются объединения датчиков, сети, моделей;

1	2	3
Arduino Uno (микроконтроллер)	– получает сигналы от датчиков; – обрабатывает аналоговые сигналы; – передает данные через Xbee, Zigbee, USB, WSN; – запускает аварийные сигналы; – рабочее напряжение 7-12В; – низкая стоимость	– слабая производительность (8-бит, 16МГц); – малый объем памяти; – отсутствие встроенных функции Wi-fi/Bluetooth; – ограничение по напряжению и току пинов; – невысокая надежность;
Raspberry Pi (мини ПК)	– высокая вычислительная мощность; – поддержка полноценной операционной системы; – встроенные Wi-fi, Bluetooth, LAN; – поддержка Python; – есть видеомодуль; – возможность работы с обалком напрямую	– не взрывозащищен; – высокое энергопотребление; – требует операционной системы; – сложность системы

Обсуждение научных результатов

Безопасность горнодобывающей промышленности требует комплексного подхода, базирующегося на принципах систематизации и непрерывности, включающего мониторинг состояния, оценку и контроль риска, разработку новых методов для выявления аварий.

Целью научных работ является создание интеллектуальной и масштабируемой модели, за счет интеграции современных технологий: IoT, обеспечивающая точность прогнозирования деформаций. Таким образом, научные и производственные работы в области создания систем мониторинга направляются на контроль динамических явлений в горных массивах, достижение высокоточных прогнозировании на основе статических данных в результате длительного мониторинга, создание новой программно-аппаратной элементной базы. Констатируются недостатки интегрированного анализа: системы мониторинга не объединяют физические и управленческие данные; фиксируется теоретический пробел: отсутствуют детальные модели, показывающие, как потеря информации ведёт к увеличению риска.

На основании сетевой модели идентифицируются ключевые факторы риска и критические пути эволюции аварии, что служит основой для управления.

Заключение

Таким образом, предлагаемая архитектура интернет вещей для системы мониторинга в открытых угольных шахтах будет представлять комплексное многоуровневое решение и включают в себя:

- уровень датчиков и устройств (датчики газа, пыли, вибраций, температуры, геолокации техники);
- уровень связи (беспроводные сети, mesh-сети);
- платформенный уровень (облачные или локальные серверы для хранения и обработки данных);
- прикладной уровень (интерфейсы мониторинга, аналитика, системы оповещения и поддержки принятия решений).

Феноменологическая модель архитектуры системы IoT-мониторинга состоит от 3 до 6 уровней, где каждый уровень будет отвечать за определенный аспект в цифровом формате. Уровень измерителей предполагает мониторинг массива, где каждый датчик фиксирует микросейсмическую активность, сдвигание бортов карьера или кровли выработок. Уровень связи описывает технологию сетевого взаимодействия, то есть передачу данных. Платформенный уровень обрабатывает данные с датчиков, преобразуя их в поведенческие модели. Например, виртуальный мониторинг позволяет предсказывать обрушения или аварий. Прикладной уровень визуализирует на мониторе диспетчера автоматические оповещения об аварийных ситуациях.

Внедряемые мониторинговые системы обеспечивают более раннее обнаружение угроз, высокую точность измерений и снижение затрат, формируя основу для интеллектуальных систем безопасности. Современные интеллектуальные системы безопасности должны основываться на принципе от точечных и контактных измерений к комплексным, бесконтактным и непрерывным системам. Для этого необходимо широкое

применение технологии IoT, дистанционного зондирования, геофизических методов и интегрированных сенсорных сетей для мониторинга в реальном времени деформаций, напряжений, сейсмической активности и гидрогеологических условий.

Список литературы

1. On the impact of Industrial Internet of Things (IIoT): mining sector perspectives / T. Zvarivadza et al // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2024. – Vol. 38, № 10. – P. 771-809. <https://doi.org/10.1080/17480930.2024.2347131>.
2. Enhancing safety in surface mine blasting operations with IoT-based ground vibration monitoring and prediction system integrated with machine learning / A. Singh et al // Scientific Reports. – 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86827-w>.
3. New approach for monitoring the underground coal mines atmosphere using IoT technology / A.K. Tripathi et al // Instrumentation Mesure Métrologie. – 2023. – Vol. 22, № 1. – P. 29-34. <https://doi.org/10.18280/im.220104>.
4. Yu R. Deep learning and IoT enabled digital twin framework for monitoring open-pit coal mines / R. Yu, X. Yang, K. Cheng // Frontiers in Energy Research. – 2023. – Vol. 11. – Art. № 1265111. – <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1265111>
5. Monitoring, warning, and control of rockburst in deep metal mines / H. Zhou et al // Engineering. – 2017. – Vol. 3, № 4. – P. 538-545. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.04.013>.
6. Rockburst in underground excavations: A review of mechanism, classification, and prediction methods / X. Feng et al // Underground Space. – 2021. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2021.11.008>.
7. Rockburst prediction and prevention in underground space excavation / Z. Li, et al // Underground Space. – 2023. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2023.05.009>.
8. Rockburst risk control and mitigation in deep mining / Q. Zhang et al // Deep Underground Science and Engineering. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.deepr.2024.100019>.
9. Advanced risk assessment in coal mines: Integrating fuzzy logic and linguistic variables for enhanced hazard management / A. Khosravi et al // International Journal of Engineering. – 2025. – Vol. 38, № 12. <https://doi.org/10.5829/ije.2025.38.12c.04>.
10. Rock mass condition control by the method of predicting of water-conducting fracture zone parameters for the deposits of polymetallic ores / M. Rahimi et al // International Journal of Engineering. – 2026. – Vol. 39, № 6. <https://doi.org/10.5829/ije.2026.39.06c.02>.

Благодарность. Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (AP26103403 «Разработка прототипа устройства для контроля состояния устойчивости бортов карьера на базе волоконно-оптических датчиков»)

А.Б. Абдыхамидова*, **Е.Ж. Сарсикеев¹**, **П.Ш. Мәди¹**, **Ә.Ж. Қалиқан¹**, **О.В. Гальцева²**

¹С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
01001, Қазақстан Республикасы, Астана қаласы, Жеңіс 62,

²Томск политехникалық Ұлттық зерттеу университеті,
634034, Ресей Федерациясы, Томск қаласы, Ленин 30.

*e-mail: abdykhamidovaa@gmail.com

ТАУ-КЕН ӨНЕРКӘСІБІНДЕГІ ИОТ-МОНИТОРИНГ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫНЫҢ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУЫ

Бұл мақала тау-кен өнеркәсібіндегі IoT мониторинг жүйелерінің архитектурасын салыстырмалы талдау нәтижелерін ұсынады. Бұл өнеркәсіптік ортада бақылау мен басқару тиімділігін арттыру үшін Заттар интернеті технологияларын енгізуді қарастырады. Негізгі назар қауіпсіз жұмыс жағдайларын қамтамасыз етуге, өнімділікті арттыруға, экологиялық тұрақтылықты нығайтуға және нормативтік талаптарға сәйкестікке аударылады. Сонымен қатар, мақала тау-кен өнеркәсібіндегі ақпараттық технологиялардың қазіргі жағдайын қарастырады, ескірген жабдықтар мен сенімсіз бағдарламалық қамтамасыз етудің қауіптері мен салдарына, сондай-ақ цифрландыру деңгейіне назар аударады. Бұл зерттеу тау-кен өнеркәсібіндегі қолданыстағы ақпараттық жүйелерге IoT технологияларын интеграциялауды, олардың қауіпсіздік, тиімділік және тұрақтылық деңгейлерін арттыруды қарастырады. Зерттеудің ғылыми жаңалығы

– тау-кен өнеркәсібіндегі әртүрлі операцияларға жарамды IoT жүйесінің архитектурасының феноменологиялық моделін жасау. Зерттеу нақты уақыт режимінде маңызды деректерді жинап, өңдеп, талдайтын таратылған сенсорлық жүйелердің жұмысы мен процестерді оңтайландыру бойынша егжей-тегжейлі талдауды ұсынады. Алынған ақпарат негізінде тұрақты жұмыс істеуді қамтамасыз етуге арналған интеллектуалды мониторинг және басқару жүйелерін енгізу жөніндегі негізделген шешімдер қабылданады.

Түйін сөздер: машиналық көру, мониторинг жүйелері, ерте ескерту, модельдеу, болжау әдістері, карьерлер.

A.B. Abdykhamidova*, Y.Zh. Sarsikeev¹, P.Sh. Madi¹, A.Zh. Kalikhan¹, O.V. Galtseva²

¹S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,
010011, Republic of Kazakhstan, Astana, Zhenis Ave., 62,

²National Research Tomsk Polytechnic University,
634034, Russian Federation, Tomsk city, Lenin 30.

*e-mail: abdykhamidovaa@gmail.com

COMPARATIVE ANALYSIS OF IOT MONITORING TECHNOLOGIES IN THE MINING INDUSTRY

This paper presents the results of a comparative analysis of the architecture of IoT monitoring systems in the mining industry. It examines the implementation of Internet of Things technologies to improve the efficiency of monitoring and control in an industrial environment. The focus is on ensuring safe working conditions, increasing productivity and environmental sustainability, as well as compliance with regulatory requirements. Furthermore, this article examines the current state of information technology in the mining industry, with a focus on the risks and consequences caused by outdated equipment, unreliable software, and the degree of digitalisation. This study discusses the integration of IoT technologies into existing information systems in the mining industry, enhancing their levels of security, efficiency and sustainability. The scientific novelty of the research lies in the creation of a phenomenological model of an IoT system architecture suitable for a wide range of operations in the mining industry. The study provides a detailed analysis of process optimisation and the operation of distributed sensor systems that collect, process and analyse critical data in real time. Based on the information obtained, well-founded decisions are made regarding the implementation of intelligent monitoring and control systems designed to ensure sustainable operations.

Key words: machine vision, monitoring systems, early warning, modeling, predictive methods, quarries.

Сведения об авторах

Айым Бахтығалиқызы Абдыхамидова – докторант 2 курса специальности «Управление техническими системами», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина; e-mail: abdykhamidovaa@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3782-6668>.

Ермек Жасланович Сарсикеев – PhD, ассоциированный профессор, ассоциированный профессор группы образовательных программ «Электротехника и автоматизация», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина; e-mail: e.sarsikeev@kazatu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7209-5024>.

Перизат Шаймуратқызы Мәди – PhD, и.о. ассоциированного профессора группы образовательных программ «Электротехника и автоматизация», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина; e-mail: peri@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5930-8112>.

Әділ Жандосұлы Қалиқан – студент 1 курса по специальности 6B07108 «Автоматизация и энергетическая эффективность процессов и производств», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина; e-mail: adilespolov@gmail.com.

Ольга Валерьевна Гальцева – кандидат технических наук, доцент, отделение контроля и диагностики (ИШНКБ): доцент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет; e-mail: tpuolga@tpu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6919-4833>.

Авторлар туралы мәліметтер

Айым Бахтығалиқызы Абдыхамидова* – «Техникалық жүйелерді басқару» мамандығының 2-курс докторанты, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті; e-mail: abdykhamidovaa@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3782-6668>.

Ермек Жасланович Сарсикеев – PhD, қауымдастырылған профессор, «Электротехника және автоматтандыру» білім беру бағдарламалары тобының қауымдастырылған профессоры, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті; e-mail: e.sarsikeev@kazatu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7209-5024>.

Перизат Шаймуратқызы Мәди – PhD докторы, «Электротехника және автоматтандыру» білім беру бағдарламалары тобының қауымдастырылған профессорының м.а., С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті; e-mail: peri@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5930-8112>.

Әділ Жандосұлы Қалиқан – 6B07108 «Процестер мен өндірістің автоматтандырылуы және энергия тиімділігі» мамандығы бойынша 1 курс студенті, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті; e-mail: adilespolov@gmail.com.

Ольга Валерьевна Гальцева – техникалық ғылымдар кандидаты, доцент, Бақылау және диагностика бөлімі: доцент, Томск политехникалық университеті; e-mail: tpuolga@tpu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6919-4833>.

Information about the authors

Aiym Bakhtygalikzy Abdykhamidova* – 2nd-year PhD student in «Control of Technical Systems», S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University; e-mail: abdykhamidovaa@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3782-6668>.

Yermek Zhaslanovich Sarsikeev – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Educational Programs Group «Electrical Engineering and Automation», S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University; e-mail: e.sarsikeev@kazatu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7209-5024>.

Perizat Shaimuratkyzy Madi – PhD, Acting Associate Professor of the Educational Programs Group «Electrical Engineering and Automation», S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University; e-mail: peri@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5930-8112>.

Adil Zhandosuly Kalikhan – 1st-year student on the 6B07108 course 'Automation and Energy Efficiency of Processes and Production', S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University; e-mail: adilespolov@gmail.com.

Olga Valeryevna Galtseva – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Control and Diagnostics: Associate Professor, Tomsk Polytechnic University; e-mail: tpuolga@tpu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6919-4833>.

Поступила в редакцию 06.04.2026
Поступила после доработки 20.05.2026
Принята к публикации 25.05.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2\(22\)-24](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-24)



IRSTI: 20.01.45

R.K. Kusainov¹, A.N. Aitkazin², D.B. Nurakhmetov³, A.A. Aniyarov³, A.K. Kenzhe*

¹Shakarim University, 071404, Republic of Kazakhstan, Semey, st. Glinki, 20a

²College of Radio Engineering and Communications,
071401, Republic of Kazakhstan, Semey, Abay Street, 76

³Astana International University, 010000, Kazakhstan, Astana, Kabanbay Batyr Avenue, 8

*e-mail: yidgelek@gmail.com

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF THE KEIT TRAINING STAND FOR PROGRAMMING ESP32 MICROCONTROLLERS IN PYTHON IN ENGINEERING EDUCATION

Abstract: This paper presents a tutorial on programming the ESP32 microcontroller using MicroPython firmware and the Thonny development environment on the KEIT (Knowledge ESP32 Integration Trainer) training rig. The designed and manufactured rig, its operating principles, and a schematic diagram and printed circuit board (PCB) are provided. The MicroPython programming curriculum includes 12 lab sessions, ranging from basic GPIO control (LEDs, buttons, and buzzer) to integration with cloud services via the MQTT protocol. Sequentially completing the tasks allows students to master the fundamentals of working with digital and analog interfaces, learn to interact with sensors, displays, and actuators, and become familiar with the networking capabilities of the ESP32. Particular attention is paid to practical aspects, such as button debounce, working with interrupts, generating PWM signals, and measuring time intervals. The authors also present the specialized control software «KEIT Master Control», which complements the entire hardware and software

©R.K. Kusainov, A.N. Aitkazin, D.B. Nurakhmetov, A.A. Aniyarov, A.K. Kenzhe, 2026