

УДК 004.9

Обзорная статья

DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-6-157-171

EDN: EGNVKM

Вопросы функционирования информационных систем для повышения производительности технологических циклов в различных отраслях промышленности

Л. С. Звягин

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации
125167, Россия, Москва, Ленинградский проспект, 49/2

Аннотация. В статье представлен комплексный анализ применения современных информационно-измерительных систем (ИИС) как инструмента для повышения эффективности и надежности технологических процессов в контексте «Индустрии 4.0». Рассмотрены архитектура, компоненты и принципы функционирования ИИС, включая их интеграцию с промышленным интернетом вещей (ПоТ), большими данными и искусственным интеллектом. На основе анализа конкретных примеров из ведущих отраслей промышленности России, таких как нефтегазовая, машиностроение, энергетика, химическая и металлургическая, продемонстрировано значительное влияние ИИС на оптимизацию ресурсов, повышение производительности и обеспечение безопасности. В статье предложена новая интегрированная многоуровневая адаптивная схема использования ИИС, которая объединяет физический, управляющий, производственный и корпоративный уровни в единую систему с аналитическим ядром на базе искусственного интеллекта. Разработанная схема обеспечивает проактивное принятие решений и создание саморегулирующихся производственных циклов.

Выводы. Результаты исследования подтверждают, что внедрение ИИС поможет переходить к предиктивному обслуживанию и повышать качество продукции. В статье обобщен существующий опыт и определены перспективные направления развития ИИС для построения устойчивых и конкурентоспособных промышленных предприятий.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, технологический процесс, эффективность, надежность, промышленная автоматизация, Индустрия 4.0, SCADA, MES, предиктивное обслуживание, промышленный интернет вещей (ПоТ)

Поступила 21.10.2025, одобрена после рецензирования 07.11.2025, принята к публикации 25.11.2025

Для цитирования. Звягин Л. С. Вопросы функционирования информационных систем для повышения производительности технологических циклов в различных отраслях промышленности // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 6. С. 157–171. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-6-157-171

MSC: 90B05, 68T09

Review article

Issues of functioning of information systems for increasing productivity of technological cycles in various industries

L.S. Zvyagin

Financial University under the Government of the Russian Federation,
49/2, Leningradsky Prospekt, Moscow, 125167, Russia

Abstract. The article presents a comprehensive analysis of the application of modern information and measuring systems (IMS) as a tool for improving the efficiency and reliability of technological processes in the context of "Industry 4.0". The architecture, components and principles of IMS operation are considered, including their integration with the Industrial Internet of Things (IIoT), big data and artificial intelligence. Based on the analysis of specific examples from leading Russian industries, such as oil and gas, mechanical engineering, energy, chemical and metallurgical, the significant impact of IMS on resource optimization, increased productivity and security is demonstrated. The article proposes a new integrated multi-level adaptive scheme for using IMS, which combines the physical, control, production and corporate levels into a single system with an analytical core based on artificial intelligence. The developed scheme ensures proactive decision-making and the creation of self-regulating production cycles.

Conclusions. The results of the study confirm that the implementation of the IIS helps to move to predictive maintenance and improve product quality. The article summarizes the existing experience and identifies promising areas for the development of the IIS for building sustainable and competitive industrial enterprises.

Keywords: information and measuring system, technological process, efficiency, reliability, industrial automation, Industry 4.0, SCADA, MES, predictive maintenance, Industrial Internet of Things (IIoT)

Submitted 21.10.2025, approved after reviewing 07.11.2025, accepted for publication 25.11.2025

For citation. Zvyagin L.S. Issues of functioning of information systems for increasing productivity of technological cycles in various industries. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 6. Pp. 157–171. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-6-157-171

ВВЕДЕНИЕ

Современная промышленность функционирует в условиях постоянно ужесточающейся конкуренции и требует от предприятий непрерывного совершенствования производственных процессов. Глобальные вызовы, такие как необходимость снижения углеродного следа, рациональное использование ресурсов и обеспечение высочайших стандартов безопасности, ставят перед инженерами и управленцами сложные задачи. Информационно-измерительные системы (ИИС) перестают быть просто средством контроля и становятся центральным элементом цифровой трансформации производства. Как отмечают Р. И. Набиева и З. А. Муртазалиева, интеграция интеллектуальных датчиков, систем управления и аналитических платформ является фундаментом для построения «умного производства» [10]. Роль ИИС как ключевого фактора в достижении стратегических целей по эффективности, надежности и экологичности становится неоспоримой.

Современные сложные технологические циклы содержат сотни и тысячи взаимосвязанных параметров, которые делают невозможным их эффективное управление без применения автоматизированных систем. Недостаточная информированность о текущем состоянии оборудования и процесса приводит к неоптимальному расходу сырья и энергии, увеличению процента брака, а также к возникновению аварийных ситуаций с тяжелыми экономическими и экологическими последствиями. Проблема заключается в необходимости создания комплексной системы, способной осуществлять непрерывный многопараметрический мониторинг, глубокий анализ данных и проактивное управление технологическими процессами в режиме реального времени для минимизации потерь, предотвращения аварий и оптимизации использования всех видов ресурсов.

Цель исследования – анализ и обобщение теоретических основ и практического опыта применения современных информационно-измерительных систем (ИИС) для повышения эффективности и надежности технологических процессов в различных отраслях промышленности.

Задачи исследования:

1. Определить основные компоненты, архитектуру и принципы функционирования современных ИИС в промышленном секторе.
2. Рассмотреть и систематизировать конкретные примеры применения ИИС для повышения эффективности (оптимизация ресурсов, рост производительности) и надежности (предиктивное обслуживание, предотвращение аварий) в ключевых отраслях промышленности.
3. Разработать концептуальную технологическую схему интегрированного использования ИИС, отражающую современные тенденции развития «Индустриной 4.0».

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методологической основой исследования послужил системный подход, чтобы рассмотреть ИИС как сложную, многокомпонентную систему, неразрывно связанную с объектом управления – технологическим процессом. Проведен систематический обзор литературы, анализ актуальных научных публикаций, монографий, отраслевых отчетов, стандартов и технической документации за последние годы. Особое внимание уделялось работам, посвященным архитектуре ИИС, интеллектуальным датчикам, системам SCADA и MES, а также концепциям «Индустриной 4.0» [14]. Метод помог сформировать теоретическую базу исследования и определить устоявшуюся терминологию. Для иллюстрации практического влияния ИИС на производственные показатели изучены успешные примеры внедрения ИИС на предприятиях различных отраслей, а именно: нефтегазовой, машиностроительной, энергетической и metallurgicheskoy. Анализ кейсов выявил как общие закономерности, так и отраслевую специфику применения ИИС.

В ходе исследования проводилось сопоставление функциональных возможностей и характеристик различных поколений и типов ИИС. Сравнивались централизованные и распределенные архитектуры, проводные и беспроводные технологии передачи данных, а также различные уровни программного обеспечения (от полевого до корпоративного), чтобы оценить их влияние на ключевые показатели эффективности и надежности. Для разработки новой технологической схемы был применен системный анализ, чтобы оценить взаимосвязи между различными элементами ИИС (датчики, контроллеры, сети, ПО) и их комплексное влияние на технологический процесс. Моделирование информационных потоков и контуров обратной связи легло в основу предложенной интегрированной многоуровневой адаптивной схемы управления.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Современные информационно-измерительные системы (ИИС) – основа повышения эффективности и надежности технологических процессов в отраслях промышленности. Понимание их сущности является отправной точкой для всестороннего анализа их применения.

Информационно-измерительная система (ИИС) – совокупность функционально объединенных измерительных, вычислительных и программных компонентов, предназначенных для получения измерительной информации о состоянии физических объектов, ее преобразования, обработки и представления в форме, удобной для принятия решений по управлению [11]. Как отмечает З. М. Селиванова, в отличие от простых измерительных приборов ИИС имеет иерархическую структуру, способную не только измерять, но и анализировать данные, выявлять тенденции и взаимодействовать с системами управления [12, 13]. Современные ИИС строятся по модульному принципу и могут гибко адаптироваться под конкретные задачи производства [2].

В промышленности ИИС выполняют три функции [11]:

- Информационная функция (сбор, обработка и визуализация данных о ходе технологического процесса и состоянии оборудования).
- Диагностическая функция (раннее обнаружение отклонений, диагностика неисправностей и прогнозирование отказов).
- Управляющая функция (формирование управляющих воздействий в автоматическом или автоматизированном режиме на основе анализа полученной информации для поддержания процесса в заданных рамках).

Представленная таблица 1 предлагает систематизированный взгляд на виды современных информационно-измерительных систем (ИИС), классифицируя их по трем признакам – уровню автоматизации, архитектуре и назначению. Такая классификация показывает разнообразие и функциональность ИИС в современной промышленности.

Таблица 1. Виды современных информационно-измерительных систем в отраслях промышленности [10, 11]

Table 1. Types of modern information and measurement systems in industries [10, 11]

Признак классификации	Виды ИИС	Краткая характеристика
1. По уровню автоматизации	Информационно-справочные	Представляют информацию оператору для принятия решений (советчик оператора).
	Информационно-управляющие	Формируют управляющие сигналы и передают их в систему автоматического управления (САУ).
2. По архитектуре	Централизованные	Единый центр сбора и обработки данных.
	Децентрализованные (распределенные)	Несколько локальных центров обработки, объединенных в общую сеть. Характерны для крупных и территориально распределенных объектов
3. По назначению	ИИС контроля технологических параметров	Мониторинг температуры, давления, расхода, уровня, концентрации и т.д.
	ИИС контроля качества продукции	Системы машинного зрения, спектрометры, хроматографы.
	ИИС мониторинга состояния оборудования	Системы вибродиагностики, тепловизионного контроля, акустического мониторинга.
	Системы экологического мониторинга	Контроль выбросов в атмосферу и сбросов в водные объекты.

Начнем с уровня автоматизации, который определяет степень участия человека в процессе управления. Здесь выделяются два основных вида ИИС. Информационно-справочные системы выступают в роли «советчика оператора», предоставляя необходимую информацию для принятия решений. Они являются фундаментом для более сложных систем, поскольку обеспечивают операторов актуальными данными. В отличие от них информационно-управляющие системы идут дальше, не только собирая данные, но и формируя управляющие сигналы, которые затем передаются в систему автоматического управления (САУ). Также демонстрирует их активную роль в непосредственном контроле над технологическими процессами, минимизируя необходимость прямого вмешательства человека.

Следующий важный признак – архитектура, которая характеризует способ организации сбора и обработки данных. Централизованные ИИС представляют классическую модель, где вся информация стекается в единый центр для обработки и анализа. Особенно удобно

для относительно небольших и компактных объектов, где контроль сосредоточен в одном месте. Однако для крупных и территориально распределенных промышленных объектов эффективными оказываются децентрализованные (распределенные) системы. Они состоят из нескольких локальных центров обработки данных, объединенных в общую сеть, чтобы обеспечивать большую гибкость, отказоустойчивость и масштабируемость, для обработки информации ближе к источнику ее возникновения.

В классификации по назначению раскрываются задачи, решаемые ИИС в различных промышленных сценариях. ИИС контроля технологических параметров являются базовым элементом любого производства, осуществляя непрерывный мониторинг таких важных показателей, как температура, давление, расход, уровень и концентрация. Данные системы жизненно важны для поддержания стабильности и безопасности процессов. Для обеспечения высокого качества продукции применяются ИИС контроля качества продукции, имеющие передовые технологии, такие как системы машинного зрения, спектрометры и хроматографы, которые позволяют автоматизировать проверку соответствия стандартам и выявлять дефекты. Чтобы обеспечить бесперебойную работу оборудования и предотвратить дорогостоящие простои, используются ИИС мониторинга состояния оборудования. Они базируются на методах вибродиагностики, тепловизионного и акустического контроля, чтобы прогнозировать поломки и планировать техническое обслуживание. И, наконец, в условиях растущей экологической ответственности системы экологического мониторинга контролируют выбросы в атмосферу и сбросы в водные объекты, помогая предприятиям соответствовать нормативным требованиям и снижать негативное воздействие на окружающую среду.

В совокупности указанная классификация подчеркивает комплексный и многогранный характер современных ИИС, которые становятся неотъемлемой частью промышленной инфраструктуры, не только обеспечивая контроль и управление, но и способствуя повышению эффективности, надежности и экологической безопасности производства.

Современные ИИС имеют иерархическую систему, построенную в соответствии с концепцией «Индустрии 4.0» [14]. Компоненты ИИС:

1. Нижний (полевой) уровень имеет сенсоры и датчики, которые непосредственно контактируют с технологическим процессом. Современные «умные датчики» (Smart Sensors) обладают встроенными микропроцессорами, могут осуществлять первичную обработку сигнала, самодиагностику и передавать данные по цифровым протоколам. Широкое распространение получают беспроводные сенсорные сети (Wireless Sensor Networks), значительно снижающие затраты на монтаж и обслуживание. На этом же уровне находятся исполнительные механизмы (клапаны, приводы, насосы).

2. Средний уровень представлен программируемыми логическими контроллерами (ПЛК) и промышленными компьютерами. Они осуществляют сбор данных с датчиков, реализуют алгоритмы локального управления и противоаварийной защиты (ПАЗ), а также служат шлюзом для передачи данных на верхний уровень.

3. Верхний уровень имеет средства связи (промышленные сети, такие как Ethernet/IP, Profinet, беспроводные технологии LoRaWAN, 5G) и программное обеспечение. Основными программными компонентами являются:

- SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) – системы для диспетчерского управления и сбора данных, обеспечивающие визуализацию процесса, архивирование данных и сигнализацию [3].

- MES (Manufacturing Execution System) – системы управления производственными процессами, которые связывают уровень АСУ ТП с корпоративным уровнем планирования [4].

- ERP (Enterprise Resource Planning) – системы планирования ресурсов предприятия, использующие данные от ИИС для финансового и логистического планирования [15].

Основным принципом ИИС является создание непрерывного информационного потока от датчика до уровня принятия бизнес-решений и обратно. Данные собираются в реальном времени, передаются по сетям связи, обрабатываются и хранятся в базах данных. На основе анализа формируется обратная связь – управляющие воздействия, направленные на оптимизацию или стабилизацию процесса [9].

Современные ИИС неразрывно связаны с технологиями «Индустрии 4.0» [14]. Промышленный интернет вещей (ПоТ) обеспечивает бесшовное подключение огромного количества датчиков и устройств. Облачные вычисления предоставляют практически неограниченные ресурсы для хранения и обработки данных. Технологии Больших данных (Big Data) помогают анализировать гигантские массивы информации для выявления скрытых закономерностей. Искусственный интеллект (ИИ) и машинное обучение (ML) используются для построения предиктивных моделей, оптимизации и создания адаптивных систем управления.

В нефтегазовой промышленности ИИС применяются для телемеханики и мониторинга тысяч километров трубопроводов, чтобы обнаруживать утечки с помощью распределенных оптоволоконных датчиков. На станках с ЧПУ ИИС контролируют точность обработки, износ инструмента и вибрации, напрямую влияя на качество конечных изделий в машиностроении. Роботизированные комплексы, оснащенные системами машинного зрения, автоматизируют сборочные операции [1].

ИИС являются основой систем управления распределенными сетями (Smart Grids), чтобы в реальном времени балансировать выработку и потребление электроэнергии. На электростанциях ведется постоянный мониторинг состояния турбин, генераторов и котлов для предотвращения аварий [6]. В. А. Кузовкин, В. В. Филатов рассматривают основы электротехники и электроники, которые являются базой для работы такого оборудования [7]. Жесткие требования к соблюдению рецептуры и температурных режимов делают ИИС незаменимыми в химической промышленности. Они управляют сложными процессами синтеза в реакторах, обеспечивая стабильное качество и безопасность производства [13]. При этом используются различные измерительные приборы, например, Б. В. Мак описывает цифровой пирометр спектрального отношения для измерения температуры нагретых деталей [8].

В металлургии ИИС контролируют температурные режимы доменных и сталеплавильных печей, управляют подачей шихты и кислорода, анализируют химический состав расплава в реальном времени, чтобы получать металл с заданными свойствами и экономить легирующие материалы [5]. В. И. Киселев, Э. В. Кузнецов, А. И. Копылов, В. П. Лунин описывают электромагнитные устройства и электрические машины, которые являются исполнительными механизмами в таких процессах [6].

В таблице 2 указаны примеры того, как информационно-измерительные системы преобразуют производственные процессы на ведущих российских промышленных предприятиях, значительно повышая их эффективность и надежность.

Таблица 2. Примеры применения информационно-измерительных систем для повышения эффективности и надежности технологических процессов промышленных предприятий России*

Table 2. Examples of how information and measurement systems are used to improve the efficiency and reliability of technological processes in Russian industrial companies.

Отрасль	Предприятие (пример)	Применение ИИС	Достигаемый эффект
Нефтегазовая	ПАО «Газпром нефть»	Система предиктивной аналитики и удаленного мониторинга работы УЭЦН (установок электроцентробежных насосов).	Сокращение отказов оборудования на 22 %, увеличение межремонтного периода, оптимизация режимов добычи.
Металлургия	ПАО «Северсталь»	ИИС на базе ИИ для управления процессом конвертерной плавки стали («советчик сталевара»).	Повышение точности попадания в заданный химический состав и температуру с первого раза, экономия ферросплавов, снижение расхода кислорода.
Машиностроение	ПАО «КАМАЗ»	MES-система для управления сборочным конвейером, интеграция с системами контроля качества (машинное зрение).	Повышение производительности конвейера, обеспечение 100 % прослеживаемости компонентов, снижение уровня брака.
Энергетика	Концерн «Росэнергоатом»	Системы вибродиагностики и онлайн-мониторинга основного оборудования АЭС (турбогенераторы, главные циркуляционные насосы).	Повышение надежности, переход к ремонтам по состоянию, предотвращение серьезных инцидентов.
Химическая	ПАО «СИБУР Холдинг»	Усовершенствованные системы управления технологическими процессами (АРС) на установках пиролиза и полимеризации.	Стабилизация качества продукции, увеличение выхода целевых продуктов на 1–3 %, снижение энергопотребления.

*составлено автором

Анализ данных по различным отраслям наглядно показывает универсальность и многофункциональность ИИС в достижении конкретных экономических и операционных выгод. В нефтегазовой отрасли, в частности на ПАО «Газпром нефть», внедрение систем предиктивной аналитики и удаленного мониторинга работы установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) привело к впечатляющим результатам. ИИС помогли сократить отказы оборудования на 22 %, значительно увеличить межремонтный период и оптимизировать режимы добычи. Такое сокращение отказов критически важно для отрасли, где простой оборудования влечет за собой огромные финансовые потери. Аналогичные успехи наблюдаются и в металлургии. На ПАО «Северсталь» ИИС на базе искусственного интеллекта (ИИ), выполняющие функцию «советчика сталевара» для управления процессом конвертерной плавки стали, обеспечили повышение точности попадания в заданный химический состав и температуру с первого раза. Помимо этого, системы способствовали экономии ферросплавов и снижению расхода кислорода, что напрямую влияет на себестоимость и экологичность производства.

В машиностроительной отрасли, представленной ПАО «КАМАЗ», интеграция MES-системы для управления сборочным конвейером с системами контроля качества на базе машинного зрения привела к заметному скачку в эффективности. Результатом стало повышение производительности конвейера, обеспечение 100 % прослеживаемости компонентов на всех этапах сборки и снижение уровня брака. Для энергетики, особенно атомной, надежность является paramount. Концерн «Росэнергоатом» успешно внедрил системы вибродиагностики и онлайн-мониторинга основного оборудования АЭС, такого как турбогенераторы и главные циркуляционные насосы. ИИС помогли повысить надежность эксплуатации, осуществить переход к ремонтам по фактическому состоянию оборудования и, что

самое главное, предотвратить серьезные инциденты, тем самым обеспечивая безопасность и стабильность энергоснабжения. В химической промышленности, на примере ПАО «СИБУР Холдинг», усовершенствованные системы управления технологическими процессами (АРС) на установках пиролиза и полимеризации продемонстрировали свою эффективность. Применение ИИС привело к стабилизации качества продукции, увеличению выхода целевых продуктов на 1–3 % и заметному снижению энергопотребления. В данном примере подчеркивается способность ИИС оптимизировать сложные химические реакции, делая их более рентабельными и устойчивыми.

Итак, представленные примеры доказывают, что современные информационно-измерительные системы являются необходимым инструментом для модернизации российских промышленных предприятий. Они обеспечивают повышение эффективности за счет оптимизации ресурсов и увеличения производительности, а также гарантируют надежность технологических процессов, минимизируя риски аварий и улучшая качество продукции. Такие достижения свидетельствуют о том, что инвестиции в ИИС являются стратегически важными для повышения конкурентоспособности и устойчивого развития отечественной промышленности. ИИС помогают перейти от нормативного к фактическому учету потребления электроэнергии, воды, пара и сырья. Путем непрерывного мониторинга система выявляет непроизводительные расходы, утечки и неоптимальные режимы работы оборудования. Например, в химической промышленности точное дозирование реагентов на основе данных от поточных анализаторов помогает экономить дорогостоящие компоненты, чтобы снижать количество отходов [10].

Автоматический контроль качества с использованием систем машинного зрения или спектрального анализа дает отбраковывать дефектную продукцию на ранних стадиях, сокращая потери. Анализ данных о прохождении изделий по технологической цепочке (даные от MES) помогает выявлять «узкие места» и оптимизировать производственный поток, сокращая цикл производства. А. В. Анцев, Е. С. Янов, М.С. Воротилин подчеркивают, что внедрение ИИС может повысить пропускную способность линий на 15–20 % без значительных капиталовложений в основное оборудование [1].

Предиктивное обслуживание (Predictive Maintenance) – одна из значимых областей применения ИИС. Вместо планово-предупредительных ремонтов (по расписанию) предприятия переходят к обслуживанию по фактическому состоянию. Датчики вибрации, температуры, акустические сенсоры и анализ потребляемого тока непрерывно отслеживают «здоровье» оборудования. Алгоритмы машинного обучения анализируют данные, выявляют аномалии, характерные для зарождающихся дефектов, и с высокой точностью прогнозируют время до отказа, чтобы планировать ремонты заранее, избегая внезапных остановок производства. Также ИИС обеспечивают непрерывный контроль критически важных параметров процесса. Любое отклонение от нормы немедленно фиксируется, и система оповещает оператора, чтобы принять меры до того, как ситуация перерастет в аварийную.

Современные ИИС интегрированы с системами противоаварийной защиты (ПАЗ). При достижении параметрами предустановочных или аварийных значений система может автоматически остановить агрегат, переключить поток на резервную линию или активировать системы пожаротушения, минимизируя роль человеческого фактора в критических ситуациях. Важнейшим аспектом здесь является кибербезопасность самих ИИС, так как их отказ или взлом могут привести к катастрофическим последствиям [5]. А.С. Бордюг рассматривает проблемы кибербезопасности, в том числе в информационно-измерительных системах [3]. Архитектура ИИС строится с учетом требований надежности. Применяется резервирование контроллеров (горячий резерв), сетей передачи данных (кольцевая топология), серверов (клUSTERизация), которые обеспечивают непрерывность работы системы даже в случае отказа отдельных ее частей.

На основе проведенного анализа предлагается интегрированная многоуровневая адаптивная схема управления на базе ИИС (рис. 1). Ее новизна заключается в создании замкнутого адаптивного контура, охватывающего все уровни производства и использующего ИИ в качестве ядра принятия решений.

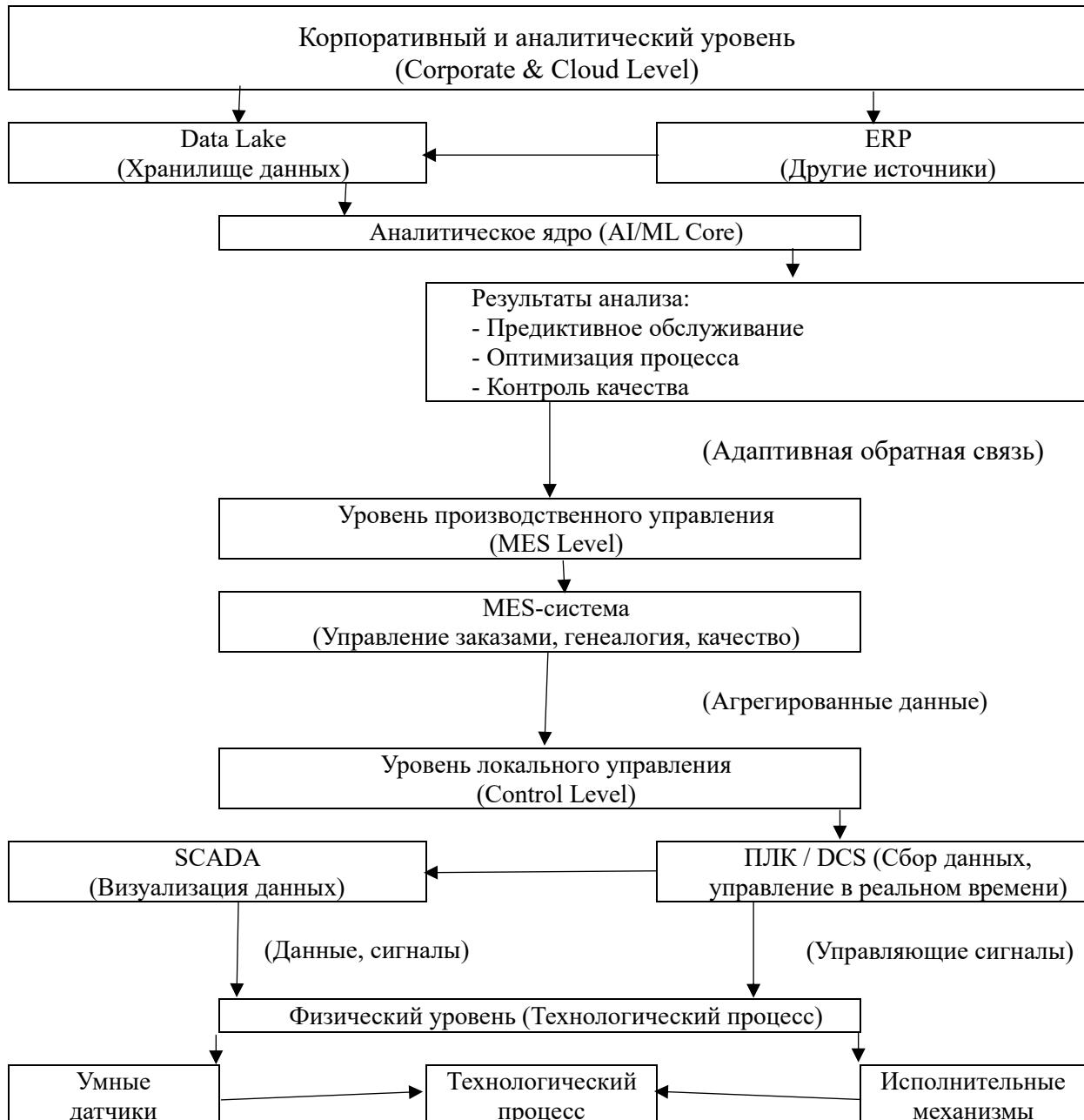


Рис. 1. Блок-схема применения современных информационно-измерительных систем в технологическом процессе промышленных предприятий*

Fig. 1. Block diagram of the application of modern information and measurement systems in the technological process of industrial enterprises

Представленная блок-схема описывает многоуровневую архитектуру применения современных информационно-измерительных систем (ИИС) в промышленных технологических процессах, демонстрируя непрерывный цикл сбора данных, анализа и управляющего воздействия. Система построена по иерархическому принципу, где каждый уровень выполняет свою специфическую роль и взаимодействует с соседними.

В основании всей системы находится «Физический уровень», который содержит «Технологический процесс». На данном уровне умные датчики (Smart Sensors) непрерывно собирают данные о состоянии процесса и поставляют их на следующий, вышестоящий уровень. Одновременно исполнительные механизмы (Actuators), расположенные на этом же уровне, получают управляющие сигналы из системы и непосредственно воздействуют на технологический процесс, внося необходимые изменения.

Умные датчики измеряют различные параметры технологического процесса. Показания датчиков можно представить как временные ряды:

$$D(t) = \{d_1(t), d_3(t), \dots, d_n(t)\}, \quad (1)$$

где $D(t)$ – вектор измеренных параметров в момент времени t , $d(t)$ – значение датчика в момент времени t , n – общее количество датчиков.

Исполнительные механизмы принимают управляющие сигналы и изменяют параметры процесса:

$$U(t) = \{u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)\}, \quad (2)$$

где $U(t)$ – вектор управляющих воздействий в момент времени t , $u(t)$ – значение управляющего сигнала для исполнительного механизма в момент времени t , m – общее количество исполнительных механизмов.

Для глубокого анализа и оптимизации используется модель технологического процесса, которая состоит из дифференциального уравнения, описывающего динамику процесса:

$$\frac{dX}{dt} = F(X, U, P), \quad (3)$$

где X – вектор состояний процесса (температура, давление, концентрация и т.д.), U – вектор управляющих воздействий, P – вектор параметров процесса (константы, коэффициенты), F – функция, описывающая динамику процесса.

Над физическим уровнем располагается «Уровень локального управления». Здесь главными элементами являются программируемые логические контроллеры (ПЛК) и распределенные системы управления (DCS). Именно они собирают и обрабатывают данные, поступающие от умных датчиков.

Данные от датчиков могут быть зашумлены и требуют обработки. Скользящее среднее (для сглаживания шумов):

$$\bar{d}_i(t) = \frac{1}{W} \sum_{k=0}^{W-1} d_i(t - k), \quad (4)$$

где $\bar{d}_i(t)$ – сглаженное значение i -го датчика, W – размер окна усреднения.

Агрегация данных (например, по временным интервалам):

$$D_{agg}(T) = \text{Aggregate}(D(t) \text{ for } t \in [T, T + \Delta T]), \quad (5)$$

где: $D_{agg}(T)$ – агрегированные данные за интервал ΔT , Aggregate – функция агрегации (среднее, сумма, максимум, минимум и т.д.).

На основе данной информации ПЛК/DCS генерируют управляющие сигналы и передают их исполнительным механизмам, обеспечивая базовую автоматизацию и безопасность процесса в реальном времени. ПЛК/DCS часто используют ПИД-регуляторы для поддержания заданных параметров:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (6)$$

где $u(t)$ – управляющий сигнал, $e(t)$ – ошибка регулирования (разность между заданным значением и текущим значением процесса), K_p , K_i , K_d – пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты соответственно.

Кроме того, данные с этого уровня визуализируются через SCADA-системы, которые предоставляют операторам обзор текущего состояния производства. SCADA-системы также агрегируют данные и передают их на следующий уровень.

Далее следует «Уровень производственного управления (MES Level)», центральным элементом которого является MES-система. Она получает агрегированные данные от SCADA-систем и использует их для выполнения ключевых функций, таких как отслеживание производственных заказов, управление генеалогией продукта и контроль качества. Интегрируя данные, MES-система создает комплексную картину текущего состояния производства. Собранная MES-системой информация в свою очередь передается на самый верхний уровень.

MES-система может использовать алгоритмы для оптимизации расписания производства на основе текущей загрузки и доступности ресурсов. Целевая функция (минимизация времени простоя):

$$\min \sum_{j=1}^{N_o} (T_{\text{finish},j} - T_{\text{start},j} - \text{Dur}_j), \quad (7)$$

где N_o – количество заказов, $T_{\text{finish},j}$, $T_{\text{start},j}$ – время завершения и начала j -го заказа, Dur_j – длительность выполнения j -го заказа.

Вершину иерархии занимает «Корпоративный и аналитический уровень». Здесь данные из MES-системы, а также из других корпоративных источников, таких как ERP-системы, поступают в хранилище данных (Data Lake), которое становится централизованным ресурсом для обширного анализа. Роль на таком уровне играет аналитическое ядро (AI/ML Core), которое использует модели машинного обучения и искусственного интеллекта для обработки больших объемов данных. Задачи, решаемые на данном уровне, – предиктивное обслуживание оборудования (прогнозирование отказов), оптимизация процесса (расчет оптимальных уставок для температуры, давления, скорости с целью максимизации выпуска или минимизации энергопотребления) и углубленный контроль качества (выявление аномалий, ведущих к браку).

В блок-схеме «Адаптивная обратная связь (Adaptive Feedback Loop)» имеется непрерывный контур, который замыкает цикл управления, обеспечивая постоянное совершенствование и адаптацию технологического процесса. Результаты глубокого анализа, полученные на корпоративном и аналитическом уровне (например, новые, оптимальные уставки для оборудования или команды на проведение технического обслуживания), не просто отображаются в отчетах. Они автоматически транслируются обратно на нижние уровни, сначала в MES-систему, а затем в SCADA/ПЛК. На этих уровнях корректируются управляющие сигналы, которые в итоге передаются исполнительным механизмам.

Результаты анализа (например, оптимальные уставки U_{opt} или команды на техническое обслуживание) передаются обратно на нижние уровни. Формула корректирующего воздействия:

$$U_{\text{new}} = U_{\text{current}} + \Delta U_{\text{AI}}, \quad (8)$$

где U_{new} – новые управляющие сигналы/уставки, U_{current} – текущие управляющие сигналы/уставки, ΔU_{AI} – корректирующее воздействие, рассчитанное AI/ML ядром.

В результате технологический процесс изменяется в соответствии с полученными аналитическими данными, чтобы системе самооптимизироваться и повышать свою эффективность и надежность в динамическом режиме.

Такая комплексная система иллюстрирует, как современные ИИС, объединяя различные уровни автоматизации и анализа, создают интеллектуальную производственную среду, способную к самокоррекции и постоянному улучшению.

Обсуждение

Внедрение современных ИИС, безусловно, является мощным фактором повышения конкурентоспособности промышленных предприятий. Представленные результаты показывают, что эффект от их применения носит комплексный характер, затрагивая как экономические (эффективность), так и технические (надежность) аспекты производства. Предложенная интегрированная многоуровневая адаптивная схема отражает логический вектор развития промышленных систем управления – переход от пассивного сбора информации к проактивному, самообучающемуся управлению.

Однако на пути к повсеместному внедрению таких систем существует ряд барьеров. Во-первых, высокая стоимость внедрения, затраты на оборудование, программное обеспечение и интеграцию. Во-вторых, проблема кибербезопасности. По мере роста интеграции ИИС с корпоративными и облачными сетями возрастают риски несанкционированного доступа и кибератак, способных парализовать производство. В-третьих, существует дефицит квалифицированных кадров – специалистов, способных проектировать, обслуживать и эффективно использовать сложные ИИС, а также аналитиков данных (Data Scientists) для промышленного сектора.

Будущее развитие ИИС связано с интеграцией искусственного интеллекта, развитием технологий «цифровых двойников» (Digital Twins), которые имеют полную виртуальную копию физического объекта и дают моделировать любые процессы без риска для реального производства, а также с использованием периферийных вычислений (Edge Computing), когда первичная аналитика выполняется непосредственно на уровне контроллеров, что снижает нагрузку на сети и повышает быстродействие.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные информационно-измерительные системы являются неотъемлемой частью любого высокотехнологичного производства. Их применение решает основные задачи по повышению эффективности и надежности технологических процессов. В ходе исследования установлено, что ИИС, интегрированные в рамках концепции «Индустрия 4.0», обеспечивают:

- Повышение эффективности за счет оптимизации потребления ресурсов, роста производительности и внедрения предиктивного обслуживания оборудования.
- Повышение надежности путем непрерывного мониторинга, ранней диагностики неисправностей, предотвращения аварий и минимизации человеческого фактора.

Предложенная интегрированная многоуровневая адаптивная схема управления демонстрирует перспективный подход к построению ИИС, основанный на тесной интеграции всех уровней производства и использовании искусственного интеллекта для создания адаптивной обратной связи. Такая архитектура дает системам реагировать на события и проактивно управлять процессом, постоянно самообучаясь и адаптируясь для достижения оптимальных показателей.

Несмотря на существующие вызовы, связанные со стоимостью, кибербезопасностью и кадровым обеспечением, дальнейшее развитие и внедрение интеллектуальных ИИС является безальтернативным путем для промышленных предприятий, стремящихся к лидерству в условиях глобальной цифровой экономики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анцев А. В., Янов Е. С., Воротилин М. С. Информационно-измерительные системы мониторинга работы станочного парка предприятия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 9. С. 495–498. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-9-490-491
2. Бахтин А. В., Ремизова И. В. Технологические измерения и приборы. Основы измерительной техники и информационно-измерительные системы: учебное пособие. 2-е изд., доп. и перераб. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2024. 66 с.
3. Бордюг А. С. Проблемы кибербезопасности в судовых информационно-измерительных системах // Морские технологии: проблемы и решения – 2021: сборник статей участников Национальной научно-практической конференции / Под общей редакцией Е. П. Масюткина. Керчь, 2021. 2021. С. 111–114.
4. Васильев А. М. Вопросы обработки данных в распределенных информационно-измерительных системах // Вестник Московского государственного университета приборостроения и информатики. Серия: Приборостроение и информационные технологии. 2009. № 19. С. 3–15. EDN: OELBXB
5. Ткачев М. Ю., Еронько С. П., Контрольно-измерительные приборы и автоматизация металлургического производства. М., Изд-во «Инфра-Инженерия», 2023. 257 с.
6. Киселев В. И., Кузнецов Э. В., Копылов А. И., Лунин В. П. Электротехника и электроника в 3 т. Том 2. Электромагнитные устройства и электрические машины: учебник и практикум для СПО; 2-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2017. 184 с.
7. Кузовкин В. А., Филатов В. В. Электротехника и электроника. М.: Юрайт, 2017. 431 с.
8. Мак Б. В. Цифровой пиrometer спектрального отношения для измерения температуры нагретых деталей // XXVII Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области: сборник материалов конференции, Волгоград, 02–15 ноября 2022 года / Редколлегия: С. В. Кузьмин (отв. ред.) и др. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2022. С. 230–231.
9. Мелентьев В. С., Поздеева Е. В. Информационно-измерительная система контроля электрических параметров энергообъектов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2016. № 12(94). С. 254–257. EDN: YFOPFB
10. Набиев Р. И., Муртазалиева З. А. Основные аспекты формирования современных информационно-измерительных систем производства // Наука и образование сегодня. 2018. № 1(24). С. 11–13. EDN: YLVXTC
11. Селиванова З. М. Интеллектуальная информационно-измерительная система для определения теплофизических свойств твердых материалов // Приборы и техника эксперимента. 2006. № 4. С. 153–154. EDN: HUZCMX
12. Селиванова З. М. Интеллектуальные информационно-измерительные системы: учебное пособие. Тамбов: ТГТУ, 2024. 82 с.
13. Селиванова З. М., Самохвалов А. А. Проектирование интеллектуальных информационно-измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2010. Т. 16. № 2. С. 273–283. EDN: MJBYAN
14. Солдатов А. С. Концепция создания перспективной информационно-измерительной системы для летных испытаний авиационной техники с применением технологий индустрии 4.0 // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2021. № 20. С. 167–177.
15. Хоан Т. А., Селиванова З. М. Информационное обеспечение интеллектуальной информационно-измерительной системы параметров экологического контроля теплоизоляционных материалов // Ноосферный вектор устойчивого развития: сб. материалов IV Международной научно-практической конференции-форума им. В. И. Вернадского / под общ. ред. Е. С. Симбирских. Мичуринск: Изд-во Мичуринского ГАУ, 2017. С. 86–89.

REFERENCES

1. Antsev A.V., Yanov E.S., Vorotilin M.S. Information and measuring systems for monitoring the operation of the enterprise's machine tools. *Bulletin of Tula State University. Technical Sciences*. 2023. No. 9. Pp. 495–498. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-9-490-491. (In Russian)
2. Bakhtin A.V., Remizova I.V. *Tekhnologicheskie izmereniya i pribory. Osnovy izmeritel'noy tekhniki i informacionno-izmeritel'nye sistemy* [Technological measurements and devices. fundamentals of measuring equipment and information]. Measuring Systems: textbook. 2nd edition., suppl. and revised. SPb.: VShTE SPbGUPTD, 2024. 66 p. (In Russian)
3. Bordyug A.S. Cybersecurity problems in ship information-measuring systems. *Morskie tekhnologii: problemy i resheniya – 2021: sbornik statey uchastnikov Nacional'noy nauchno-prakticheskoy konferencii. Pod obshchey redakciei E. P. Masyutkina*. [Marine technologies: problems and solutions – 2021. Collection of articles by participants of the National Scientific and Practical Conference. Edited by E. P. Masutkin]. Kerch', 2021. Pp. 111–114. (In Russian)
4. Vasiliev A.M. Data processing issues in distributed information-measuring systems. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta priborostroeniya i informatiki. Seriya: Priborostroenie i informacionnye tekhnologii* [Bulletin of Moscow State University of Instrument Engineering and Informatics. Series: Instrument Engineering and Information Technology]. 2009. No. 19. Pp. 3–15. EDN: OELBXB. (In Russian)
5. Tkachev M.Yu, Eronko S.P. *Kontrol'no-izmeritel'nye pribory i avtomatizaciya metallurgicheskogo proizvodstva* [Control and measuring devices and automation of metallurgical production]. Moscow, Izd-vo “Infra-Inzheneriya”, 2023. 257 p. (In Russian)
6. Kiselev V.I., Kuznetsov E.V., Kopylov A.I., Lunin V.P. *Elektrotehnika i elektronika v 3 t. Tom 2. Elektromagnitnye ustroystva i elektricheskie mashiny* [Electrical engineering and electronics in 3 vol. Vol. 2. Electromagnetic devices and electrical machines]: textbook and practical training for secondary vocational education. 2nd ed., revised. and additional. Moscow: Yurait, 2017. 184 p. (In Russian)
7. Kuzovkin V.A., Filatov V.V. *Elektrotehnika i elektronika* [Electrical engineering and electronics: textbook for secondary vocational education]. Moscow: Yurait, 2017. 431 p. (In Russian)
8. Mak B.V. Digital spectral ratio pyrometer for measuring the temperature of heated parts. *XXVII Regional'naya konferenciya molodyh uchenyh i issledovatelyey Volgogradskoy oblasti: Sbornik materialov konferencii* [XXVII Regional Conference of Young Scientists and Researchers of the Volgograd Region]: Conference Proceedings, Volgograd, November 2–15, 2022. Editorial Board: S.V. Kuzmin (editor-in-chief) [et al.]. Volgograd: Volgograd State Technical University, 2022. Pp. 230–231. (In Russian)
9. Melentyev V.S., Pozdeeva E.V. Information and measuring system for monitoring electrical parameters of power facilities. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyah – MMTT* [Mathematical Methods in Engineering and Technology – MMTT]. 2016. No. 12(94). Pp. 254–257. (In Russian)
10. Nabiev R.I. Murtazalieva Z.A. Main aspects of the formation of modern information-measuring systems of production. *Science and Education Today*. 2018. No. 1(24). Pp. 11–13. (In Russian)
11. Selivanova Z. M. Intelligent information-measuring system for determining the thermophysical properties of solid materials. *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2006. No. 4. Pp. 153–154. EDN: HUZCMX. (In Russian)
12. Selivanova Z.M. *Intellektual'nyye informatsionno-izmeritel'nyye sistemy: uchebnoye posobiye* [Intelligent information-measuring systems: a tutorial]. Tambov: Tambovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2024. 82 p. (In Russian)
13. Selivanova Z.M., Samokhvalov A.A. Design of intelligent information-measuring systems for non-destructive testing of thermal-physical properties of materials. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tambov State Technical University]. 2010. Vol. 16. No. 2. Pp. 273–283. EDN: MJBYAN. (In Russian)

14. Soldatov A.S. The concept of creating a promising information and measuring system for flight tests of aircraft equipment using industry 4.0 technologies. *Air and Space Forces. Theory and Practice*. 2021. No. 20. Pp. 167–177. DOI: 10.24412/2500-4352-2021-20-167-177. (In Russian)
15. Hoan T.A., Selivanova Z.M. Information support for an intelligent information-measuring system of environmental control parameters of thermal insulation materials. *Noosfernyy vektor ustoychivogo razvitiya: Sb. materialov IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii-foruma im. V. I. Vernadskogo; pod obshch. red. E. S. Simbirskikh* [Noospheric vector of sustainable development: collection of materials of the IV Intern. scientific and practical conference-forum named after V.I. Vernadsky; edited by E.S. Simbirskikh]. Michurinsk: Izd-vo Michurinskogo SAU, 2017. Pp. 86–89. (In Russian)

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Звягин Леонид Сергеевич, канд. экон. наук, доцент, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации;
125167, Россия, Москва, Ленинградский проспект, 49/2;
lszvyagin@fa.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4983-6012>, SPIN-код: 9400-1926

Information about the author

Leonid S. Zvyagin, Candidate of Economics, Associate Professor, Financial University under the Government of the Russian Federation;
49/2, Leningradsky Prospect, Moscow, 125167, Russia;
lszvyagin@fa.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4983-6012>, SPIN-code: 9400-1926