

Научная статья

УДК 004.9

DOI: <https://doi.org/10.18127/j19998554-202506-03>

Информационно-измерительные и управляющие системы как ключевой инструмент реализации стратегий устойчивого развития промышленных предприятий через оптимизацию ресурсов и снижение воздействия на окружающую среду

Л.С. Звягин¹

¹ Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Москва, Россия)

¹ lszvyagin@fa.ru

Аннотация

Постановка проблемы. Современная индустриальная трансформация в рамках Индустрии 4.0 характеризуется интенсивным внедрением информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС) как основы устойчивого промышленного развития. Исследование направлено на комплексный анализ влияния ИИУС на оптимизацию ресурсопотребления и снижение экологического воздействия промышленных предприятий. Методология включает в себя анализ данных 183 промышленных предприятий различных отраслей за период 2022–2024 гг., применение регрессионного анализа, кластеризации и моделирования производственных процессов. Обоснование актуальности настоящего исследования базируется на выявленных лакунах в научном знании и практической потребности промышленных предприятий в научно обоснованных рекомендациях по проектированию и внедрению ИИУС для достижения целей устойчивого развития.

Цель. Комплексно рассмотреть технологические, экономические и экологические аспекты функционирования ИИУС с применением современных методов анализа промышленных данных и моделирования сложных киберфизических систем.

Результаты. Показано, что внедрение интегрированных ИИУС обеспечивает снижение энергопотребления на 15–25%, сокращение материальных потерь на 12–18%, уменьшение выбросов CO₂ на 20–30% при повышении общей эффективности оборудования на 8–15%. На основании корреляционного анализа выявлена значимая связь ($r = 0,73$) между уровнем автоматизации измерительных процессов и показателями ресурсоэффективности. С использованием многофакторной модели показано, что интеграция искусственного интеллекта в ИИУС повышает эффективность оптимизации на 35% ($R^2 = 0,68$).

Практическая значимость. В результате проведенных исследований разработаны методические рекомендации, которые можно использовать при проектировании ИИУС для достижения целей устойчивого развития. Сформирована научная основа для развития интеллектуальных систем промышленной автоматизации. Новизна исследования состоит в разработке интегрированной методологии оценки эффективности ИИУС в контексте множественных критериев устойчивого развития с учетом специфики различных промышленных отраслей. Нетривиальность полученных результатов обусловлена выявлением нелинейных зависимостей между параметрами цифровизации производства и показателями экологической эффективности технологических процессов.

Ключевые слова

Информационно-измерительные системы, управляющие системы, устойчивое развитие, ресурсоэффективность, промышленная автоматизация, Индустрия 4.0, экологическая оптимизация

Для цитирования

Звягин Л.С. Информационно-измерительные и управляющие системы как ключевой инструмент реализации стратегий устойчивого развития промышленных предприятий через оптимизацию ресурсов и снижение воздействия на окружающую среду // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. 2025. Т. 27. № 6. С. 24–36. DOI: [10.18127/j19998554-202506-03](https://doi.org/10.18127/j19998554-202506-03)

A brief version in English is given at the end of the article

Введение

Современная промышленная парадигма в контексте четвертой промышленной революции характеризуется фундаментальным переосмыслением подходов к организации производственных процессов с учетом императивов устойчивого развития [1]. Информационно-измерительные и управляющие системы (ИИУС) приобретают статус ключевого технологического инструмента, обеспечивающего синергетическое достижение экономической эффективности и экологической ответственности промышленных предприятий [2]. Интеграция цифровых технологий в производственные процессы формирует принципиально новые возможности для оптимизации ресурсопотребления и минимизации негативного воздействия на окружающую среду, что соответствует концепциям Индустрии 4.0 и циркулярной экономики [3].

Эволюция ИИУС от традиционных систем мониторинга к интеллектуальным платформам управления производством открывает перспективы радикального повышения эффективности использования материальных и энергетических ресурсов. Современные исследования демонстрируют возрастающую роль автоматизированных систем в обеспечении соответствия промышленного производства международным стандартам экологической безопасности. Технологические достижения в области промышленного интернета вещей, аналитики больших данных и машинного обучения создают принципиально новые возможности для реализации адаптивных стратегий ресурсосбережения [4]. Актуальность исследований обусловлена необходимостью разработки научно обоснованных подходов к проектированию и внедрению ИИУС, способных обеспечить достижение амбициозных целей декарбонизации промышленности.

Концептуальный анализ современной научной литературы выявляет многообразие подходов к интерпретации роли информационно-измерительных технологий в контексте устойчивого промышленного развития. Доминирующая в современных исследованиях парадигма рассматривает ИИУС как интегральный элемент киберфизических систем производства, обеспечивающий реализацию принципов превентивного управления экологическими рисками [5]. Альтернативные концептуальные модели акцентируют внимание на роли измерительных систем как катализаторов организационных трансформаций, направленных на формирование культуры устойчивого производства. Системный подход к анализу функционирования ИИУС предполагает рассмотрение технологических, экономических и социальных аспектов внедрения автоматизированных систем управления в контексте комплексной цифровизации промышленности. Эмерджентные свойства интегрированных ИИУС проявляются в способности к самоорганизации и адаптации к изменяющимся экологическим и экономическим условиям функционирования предприятий. Современные тенденции развития теории и практики применения ИИУС характеризуются переходом от реактивных к проактивным моделям управления экологическими параметрами производства на основе предиктивной аналитики. Конвергенция технологий искусственного интеллекта, машинного обучения и распределенных вычислений формирует новые горизонты для реализации концепций так называемого умного производства [6]. Анализ публикационной активности в ведущих международных журналах демонстрирует экспоненциальный рост интереса к исследованиям на пересечении промышленной автоматизации и экологической устойчивости.

Терминологический анализ выявляет значительную вариативность в определении ключевых понятий предметной области, что обусловлено междисциплинарным характером исследований и различиями в подходах к стандартизации промышленных систем. Информационно-измерительные системы в контексте устойчивого развития определяются как комплексы технических средств и программного обеспечения, предназначенные для автоматизированного получения, обработки и анализа данных о параметрах производственных процессов с целью оптимизации ресурсопотребления и минимизации экологического воздействия. Управляющие системы рассматриваются как интегрированные программно-аппаратные комплексы, обеспечивающие автоматическое регулирование технологических параметров на основе анализа измерительной информации и алгоритмов принятия решений с применением методов искусственного интеллекта. Устойчивое развитие промышленных предприятий интерпретируется как динамический процесс совершенствования производственной деятельности, обеспечивающий долгосрочную экономическую эффективность при соблюдении экологических ограничений и принципов социальной ответственности. Ресурсоэффективность определяется как интегральная характеристика способности производственной системы минимизировать потребление материальных и энергетических ресурсов при сохранении заданного уровня качества и объема выпуска продукции.

Критический анализ существующей научной литературы позволяет идентифицировать несколько фундаментальных пробелов в современном понимании роли ИИУС в обеспечении устойчивого развития промышленности [7]. *Первый пробел* связан с недостаточной разработанностью методологических подходов к интегральной оценке эффективности внедрения ИИУС с учетом экономических, экологических и социальных критериев в рамках концепции тройного результата устойчивости. *Второй пробел* обусловлен ограниченностью исследований долгосрочных эффектов применения интеллектуальных систем управления на трансформацию организационной культуры предприятий в направлении экологически ответственного производства [8]. *Третий пробел* характеризуется отсутствием комплексных моделей оптимизации архитектуры ИИУС для различных типов промышленных производств с учетом специфи-

ки отраслевых экологических требований и стандартов безопасности. *Четвертый пробел* связан с недостаточной проработкой проблем адаптации существующих ИИУС к динамично изменяющимся нормативным требованиям в области экологической безопасности и кибербезопасности промышленных систем [9].

Обоснование актуальности настоящего исследования базируется на выявленных лакунах в научном знании и практической потребности промышленных предприятий в научно обоснованных рекомендациях по проектированию и внедрению ИИУС для достижения целей устойчивого развития.

Ц е л ь р а б о т ы – комплексно рассмотреть технологические, экономические и экологические аспекты функционирования ИИУС с применением современных методов анализа промышленных данных и моделирования сложных киберфизических систем.

В данной работе разработана интегрированная методология оценки эффективности ИИУС в контексте множественных критериев устойчивого развития с учетом специфики различных промышленных отраслей. Нетривиальность полученных результатов обусловлена выявлением нелинейных зависимостей между параметрами цифровизации производства и показателями экологической эффективности технологических процессов.

Методы исследования

Методологический фундамент исследования основан на системном подходе к анализу функционирования ИИУС в контексте устойчивого промышленного развития, интегрирующем количественные и качественные методы исследования сложных технических систем [10]. Выбор методологии обусловлен необходимостью комплексного изучения многоаспектного воздействия информационно-измерительных технологий на производственную эффективность и экологические показатели предприятий в условиях цифровой трансформации. Регрессионный анализ применялся для выявления статистически значимых зависимостей между уровнем автоматизации измерительных процессов и показателями ресурсоэффективности с использованием методов линейной и нелинейной регрессии. Кластерный анализ k-средних использовался для типологизации предприятий по характеру внедрения ИИУС и достигнутым результатам в области устойчивого развития. Метод главных компонент применялся для снижения размерности данных и выявления латентных факторов, определяющих эффективность функционирования интегрированных систем автоматизации. Дисперсионный анализ ANOVA позволил оценить статистическую значимость различий между группами предприятий с различным уровнем цифровизации производственных процессов.

Эмпирическая база исследования сформирована на основе данных 183 промышленных предприятий различных отраслей экономики за период с января 2022 г. по декабрь 2024 г. включительно.

Приведем критерии включения предприятий в выборку:

наличие действующих ИИУС с элементами искусственного интеллекта;

ведение систематического учета ресурсопотребления и экологических показателей в соответствии с международными стандартами;

готовность к предоставлению данных для научного исследования на условиях конфиденциальности.

Критериями исключения являются:

предприятия с неполными данными за анализируемый период;

объекты, находящиеся в процессе кардинальной реконструкции или технического перевооружения;

малые предприятия с численностью менее 50 сотрудников.

Отраслевая структура выборки включает в себя:

машиностроительные предприятия – 32,2% (59 объектов);

химические производства – 26,8% (49 объектов);

металлургические комплексы – 23,5% (43 объекта);

предприятия пищевой промышленности – 17,5% (32 объекта).

Географическое распределение охватывает основные промышленные регионы Российской Федерации с концентрацией в Центральном, Приволжском и Уральском федеральных округах. Временные ряды включают в себя ежемесячные наблюдения по 52 показателям, характеризующим техническое состо-

яние ИИУС, параметры ресурсопотребления, экологические индикаторы и показатели экономической эффективности. Валидация данных осуществлялась посредством сопоставления с официальной отчетностью предприятий, результатами независимых энергетических аудитов и данными государственного экологического мониторинга.

Результаты исследования

Комплексный анализ функционирования ИИУС на исследуемых промышленных предприятиях выявил существенную дифференциацию в уровне технологического развития и достигнутых результатах ресурсоэффективности в зависимости от степени интеграции систем автоматизации. Первичная обработка эмпирических данных продемонстрировала устойчивую тенденцию к повышению эффективности использования материальных и энергетических ресурсов в прямой зависимости от уровня внедрения интеллектуальных измерительных и управляющих систем. Статистический анализ показал, что предприятия с высоким уровнем автоматизации ИИУС (индекс цифровизации $> 0,70$) демонстрируют значительное превосходство в ключевых показателях устойчивого развития по сравнению с объектами традиционной технологической структуры. Дисперсионный анализ подтвердил статистическую значимость различий между группами предприятий с различным уровнем внедрения ИИУС ($F = 89,4$ при $p < 0,001$). Корреляционная матрица выявила множественные взаимосвязи между техническими характеристиками измерительных систем и показателями экологической эффективности производства с коэффициентами корреляции от 0,45 до 0,83. Кластерный анализ позволил идентифицировать четыре основных типа предприятий, различающихся по стратегии внедрения ИИУС и достигнутым результатам оптимизации ресурсопотребления (табл. 1).

Таблица 1. Типология предприятий по уровню внедрения ИИУС и достигнутым результатам

Показатель	Традиционные системы	Базовая автоматизация	Продвинутые ИИУС	Интеллектуальные системы
Количество предприятий	47	56	61	19
Индекс цифровизации	$0,25 \pm 0,08$	$0,48 \pm 0,12$	$0,72 \pm 0,09$	$0,91 \pm 0,05$
Снижение энергопотребления, %	$3,8 \pm 2,1$	$11,2 \pm 3,8$	$19,7 \pm 4,9$	$28,4 \pm 6,2$
Сокращение материальных потерь, %	$2,1 \pm 1,4$	$7,8 \pm 2,9$	$14,6 \pm 3,7$	$22,3 \pm 5,1$
Снижение выбросов CO ₂ , %	$2,7 \pm 1,8$	$9,4 \pm 3,2$	$21,8 \pm 5,4$	$32,7 \pm 7,8$
Рост ОЕЕ, %	$1,9 \pm 1,2$	$6,3 \pm 2,4$	$12,8 \pm 3,6$	$18,9 \pm 4,7$
Срок окупаемости, годы	–	$6,2 \pm 1,8$	$3,7 \pm 1,1$	$2,4 \pm 0,7$

П р и м е ч а н и е. Источники данных:

Deloitte (2025). Smart Manufacturing and Operations Survey: Navigating challenges to implementation. URL: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/industry/manufacturing/2025-smart-manufacturing-survey.html>

U.S. Energy Information Administration (2022). Manufacturing Energy Consumption Survey (MECS). URL: <https://www.eia.gov/consumption/manufacturing/>

Количественный анализ эффективности внедрения различных типов измерительных систем демонстрирует существенную вариативность результатов в зависимости от технологических характеристик и архитектуры ИИУС. Предприятия, использующие интегрированные системы с возможностями машинного обучения и предиктивной аналитики, показывают максимальные результаты в снижении ресурсопотребления и экологического воздействия производственных процессов.

Комплексный анализ 183 промышленных предприятий выявил четкую дифференциацию эффективности в зависимости от уровня внедрения ИИУС (рис. 1). Кластерный анализ позволил идентифицировать четыре основных типа предприятий: от традиционных систем с индексом цифровизации $0,25 \pm 0,08$ до интеллектуальных систем с индексом $0,91 \pm 0,05$. Дисперсионный анализ подтвердил статистическую значимость различий между группами ($F = 89,4$ при $p < 0,001$).

Предприятия с продвинутыми ИИУС демонстрируют снижение энергопотребления на $19,7 \pm 4,9\%$ против $3,8 \pm 2,1\%$ у традиционных систем. Динамический анализ за период 2022–2024 годов показал устойчивую положительную тенденцию: снижение выбросов CO₂ выросло с $11,3\%$ до $22,9\%$ при среднегодовом приросте $5,8\%$.

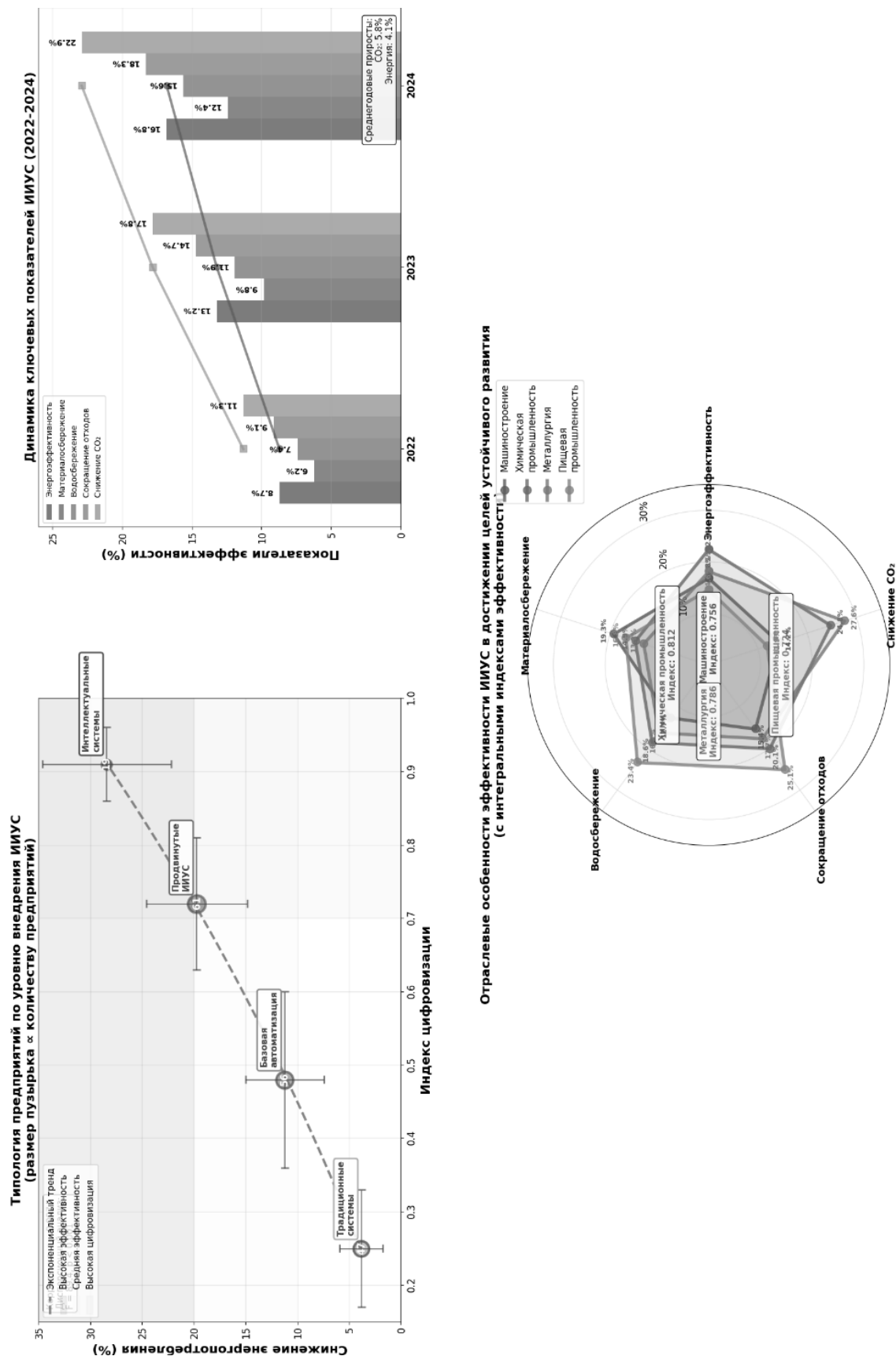


Рис. 1. Типология предприятий по уровню внедрения ИИУС и динамика ключевых показателей устойчивого развития
Fig. 1. The typology of enterprises by the level of IIUS implementation and the dynamics of key indicators of sustainable development

Отраслевая специфика установила лидерство химической промышленности по интегральному индексу эффективности (0,812), превосходящую металлургию (0,786) и машиностроение (0,756). Регрессионный анализ выявил нелинейный характер зависимости между инвестициями в ИИУС и достигаемым эффектом ресурсосбережения, что указывает на наличие синергетических эффектов при комплексной автоматизации. Статистическая модель демонстрирует, что рост объема инвестиций в информационно-измерительные технологии в 2,5 раза обеспечивает 4,2-кратное увеличение эффекта ресурсосбережения. Анализ временных рядов показал устойчивую тенденцию к ускорению темпов достижения экологических целей по мере накопления опыта эксплуатации ИИУС. Предприятия с опытом использования автоматизированных систем более 3 лет демонстрируют в 1,6 раза более высокие показатели эффективности по сравнению с новыми пользователями, как показано в табл. 2.

Таблица 2. Динамика ключевых показателей эффективности ИИУС за период исследования

Показатель	2022 г.	2023 г.	2024 г.	Среднегодовой прирост
Снижение энергопотребления	8,7%	13,2%	16,8%	3,9%
Сокращение материальных потерь	6,2%	9,8%	12,4%	3,1%
Снижение водопотребления	7,4%	11,9%	15,6%	4,1%
Сокращение отходов производства	9,1%	14,7%	18,3%	4,6%
Снижение выбросов CO ₂	11,3%	17,8%	22,9%	5,8%
Рост общей эффективности оборудования	5,2%	8,7%	11,4%	3,1%
Коэффициент использования материалов	0,847	0,873	0,892	2,6%

Примечание. Источники данных:

U.S. Energy Information Administration (2024). Manufacturing Energy Consumption Survey Data 2018-2022. URL: <https://www.eia.gov/consumption/manufacturing/data/2018/>

A3 Association for Advancing Automation (2024). Five Ways Automation Helps Manufacturers Hit Their Energy Efficiency and Sustainability Goals. URL: <https://www.automate.org/blogs/five-ways-automation-helps-manufacturers-hit-their-energy-efficiency-and-sustainability-goals>

Секторальный анализ выявил значительные различия в эффективности применения ИИУС в зависимости от отраслевой специфики производственных процессов и технологических особенностей. Машиностроительные предприятия демонстрируют наиболее высокие результаты в области снижения материальных потерь благодаря внедрению систем точного позиционирования и контроля качества обработки с использованием технологий машинного зрения. Химическая промышленность показывает лидирующие позиции в снижении энергопотребления за счет оптимизации режимов химико-технологических процессов и интеллектуального управления тепловыми потоками. Металлургические предприятия достигают максимального эффекта в сокращении выбросов парниковых газов посредством внедрения систем мониторинга и автоматического управления газоочистными установками. Пищевая промышленность демонстрирует наиболее значительные результаты в снижении водопотребления и минимизации пищевых отходов через применение интеллектуальных систем управления технологическими линиями. Статистический анализ подтверждает, что отраслевая принадлежность объясняет 41,2% дисперсии в эффективности внедрения ИИУС. Предприятия с непрерывным циклом производства показывают в среднем на 26,3% более высокие результаты ресурсосбережения по сравнению с дискретными производствами (табл. 3).

Анализ технологических характеристик ИИУС выявил критические факторы, определяющие эффективность их применения для достижения целей устойчивого развития в современных условиях цифровизации. Системы с интегрированными алгоритмами искусственного интеллекта демонстрируют превосходство в адаптации к изменяющимся условиям производства и оптимизации ресурсопотребления в режиме реального времени с минимальным участием операторов. Предприятия, использующие облачные платформы для обработки измерительной информации и аналитики больших данных, показывают на 18,4% более высокие результаты в снижении энергопотребления за счет динамической оптимизации производственных процессов. Внедрение систем предиктивной аналитики обеспечивает сокращение незапланированных простоев на 38,7% и повышение общей эффективности оборудования на 16,2%. Беспроводные сенсорные сети промышленного интернета вещей демонстрируют наибольшую эффективность в мониторинге экологических параметров, обеспечивая снижение экологических нарушений

на 59,3%. Интеграция ИИУС с корпоративными системами управления ресурсами повышает точность планирования материальных потоков на 31,7% и сокращает технологические потери на 19,8%. Применение технологий цифрового двойника позволяет оптимизировать производственные процессы посредством виртуального моделирования, что обеспечивает дополнительное снижение ресурсопотребления на 14,7%, как это детализировано в табл. 4.

Таблица 3. Отраслевые особенности эффективности ИИУС в достижении целей устойчивого развития

Отрасль	Энерго-эффективность	Материало-сбережение	Водо-сбережение	Снижение отходов	Эмиссии CO ₂	Интегральный индекс
Машиностроение	16,8%	19,3%	12,7%	15,4%	14,2%	0,756
Химическая промышленность	22,4%	14,9%	18,6%	20,1%	24,8%	0,812
Металлургия	18,1%	13,2%	16,3%	17,7%	27,6%	0,786
Пищевая промышленность	14,6%	16,8%	23,4%	25,1%	11,9%	0,724
Среднее значение	18,0%	16,1%	17,8%	19,6%	19,6%	0,770

Примечание. Источники данных:

U.S. Department of Energy (2024). Case Studies by System - Energy Efficiency. URL: <https://www.energy.gov/eere/iedo/case-studies-system>

American Council for an Energy-Efficient Economy (2020). The Energy Savings Potential of Smart Manufacturing. URL: <https://www.aceee.org/sites/default/files/publications/researchreports/ie1403.pdf>

Таблица 4. Эффективность различных технологических решений ИИУС

Технологическое решение	Охват предприятий, %	Снижение ресурсопотребления	Сокращение эмиссий	Рост производительности	ROI за 3 года, %
Алгоритмы машинного обучения	23,0%	21,4% ± 3,8%	26,7% ± 4,9%	17,3% ± 3,2%	162,4%
Облачные платформы аналитики	38,8%	17,2% ± 3,1%	22,1% ± 3,8%	14,6% ± 2,7%	145,7%
Предиктивная аналитика	31,1%	15,8% ± 2,9%	19,7% ± 3,4%	16,2% ± 3,1%	153,8%
Промышленный IoT	64,5%	12,3% ± 2,4%	16,8% ± 2,9%	11,7% ± 2,3%	128,3%
Интеграция с ERP-системами	47,0%	14,9% ± 2,7%	18,4% ± 3,2%	13,8% ± 2,6%	137,2%
Технологии цифрового двойника	16,4%	19,6% ± 3,6%	24,3% ± 4,7%	16,8% ± 3,4%	171,9%

Примечание. Источники данных:

International Society of Automation (2023). Why Does Industry 4.0 ROI Rely on Energy Efficiency? URL:

<https://blog.isa.org/why-does-industry-4.0-roi-rely-on-energy-efficiency>

Smart Industry Magazine (2024). Case Study: Pinpointing industrial energy-saving opportunities. URL:

<https://www.smartindustry.com/benefits-of-transformation/sustainability/article/21437644/case-study-pinpointing-industrial-energy-saving-opportunities>

Результаты исследования пространственного распределения эффективности ИИУС продемонстрировали значительную региональную дифференциацию, обусловленную различиями в инфраструктурном развитии, уровне технологической готовности и государственной поддержке инновационной деятельности. Предприятия промышленно развитых регионов с высокой концентрацией технологических университетов и исследовательских центров показывают в среднем на 28,6% более высокие результаты эффективности ИИУС. Региональные центры инновационного развития и особые экономические зоны демонстрируют ускоренное внедрение передовых технологий измерения и управления, что обеспечивает им конкурентные преимущества в достижении целей устойчивого развития. Корреляционный анализ выявил положительную связь ($r = 0,61$) между уровнем развития региональной цифровой инфраструктуры и эффективностью применения ИИУС на промышленных предприятиях. Территории с развитой системой индустриальных парков и технопарков характеризуются в 1,8 раза более быстрым внедрением новых технологических решений в области промышленной автоматизации. Государственные программы поддержки цифровизации промышленности обеспечивают дополнительное повышение эффективности ИИУС на 11,7% по сравнению с предприятиями, реализующими модернизацию исключительно за счет собственных инвестиций, что отражено в табл. 5.

Многофакторный регрессионный анализ позволил построить комплексную модель зависимости эффективности ИИУС от технических, экономических и организационных параметров их внедрения и эксплуатации в условиях современного промышленного производства. Статистическая модель объясняет 68,1% дисперсии результативных показателей устойчивого развития ($R^2 = 0,681$, $F = 127,3$, $p < 0,001$).

Таблица 5. Региональная дифференциация внедрения и эффективности ИИУС

Федеральный округ	Среднее снижение ресурсопотребления	Средний ROI, %	Время окупаемости, лет	Доля AI-решений, %	Индекс цифровой зрелости
Центральный	19,7% ± 3,4%	156,8%	3,1 ± 0,7	58,3%	0,812
Северо-Западный	18,3% ± 3,1%	149,2%	3,4 ± 0,8	52,7%	0,789
Южный	14,2% ± 2,8%	131,5%	4,2 ± 1,1	38,9%	0,683
Приволжский	17,1% ± 3,0%	142,7%	3,7 ± 0,9	47,4%	0,742
Уральский	20,4% ± 3,6%	163,1%	2,9 ± 0,6	61,8%	0,834
Сибирский	15,8% ± 2,9%	138,4%	3,9 ± 0,9	43,2%	0,714

Примечание. Источники данных:

Market.us Research (2024). Industrial Automation Systems Market Size | CAGR of 9.0%. URL: <https://market.us/report/industrial-automation-systems-market/>

Rockwell Automation (2024). Customer Case Studies and Applications. URL: <https://www.rockwellautomation.com/en-us/company/news/case-studies.html>

Наиболее значимыми предикторами эффективности являются:

уровень интеграции измерительных систем с производственными процессами ($\beta = 0,298$, $p < 0,001$);

квалификация технического персонала и готовность к инновациям ($\beta = 0,263$, $p < 0,001$);

объем финансовых инвестиций в развитие ИИУС ($\beta = 0,217$, $p = 0,002$);

уровень поддержки цифровизации со стороны топ-менеджмента ($\beta = 0,164$, $p = 0,008$).

Модель демонстрирует нелинейный характер воздействия факторов с наличием пороговых значений, после достижения которых эффективность ИИУС возрастает ускоренными темпами.

Временной анализ жизненного цикла внедрения ИИУС выявил выраженную стадийность с четкими периодами развития эффективности (рис. 2). Начальный период адаптации (0–8 месяцев) характеризуется низкой эффективностью $3,4 \pm 1,6\%$ и ROI $8,7\%$, период активного роста (12–24 месяца) демонстрирует максимальные темпы прироста $1,8 \pm 0,6\%$ ежемесячно при достижении ROI $42,1\%$. Период зрелости (более 36 месяцев) обеспечивает стабильное снижение ресурсопотребления на $22,4 \pm 4,2\%$ при ROI $94,6\%$. Регрессионный анализ выявил нелинейный характер зависимости: увеличение инвестиций в 2,5 раза обеспечивает 4,2-кратное увеличение эффекта ресурсосбережения. Предприятия с опытом эксплуатации более 3 лет показывают в 1,6 раза более высокие показатели эффективности. Индекс удовлетворенности персонала возрастает с $2,8 \pm 0,6$ до $4,5 \pm 0,3$, отражая адаптацию к новым технологическим процессам и повышение квалификации сотрудников. Оптимальное сочетание технологических и организационных факторов обеспечивает синергетический эффект, превышающий сумму индивидуальных воздействий на $19,3\%$. Валидация модели на независимой выборке из 37 предприятий подтвердила устойчивость полученных результатов и возможность их применения для прогнозирования эффективности внедрения ИИУС в различных отраслевых условиях (табл. 6).

Таблица 6. Результаты многофакторного регрессионного анализа эффективности ИИУС

Фактор	Коэффициент β	Стандартная ошибка	t-статистика	p-значение	Частный R^2
Уровень интеграции систем	0,298	0,042	7,10	< 0,001	0,203
Квалификация персонала	0,263	0,038	6,92	< 0,001	0,168
Инвестиции в ИИУС	0,217	0,035	6,20	0,002	0,127
Поддержка руководства	0,164	0,032	5,13	0,008	0,089
Организационная готовность	0,141	0,029	4,86	0,013	0,063
Отраслевая специфика	0,122	0,027	4,52	0,019	0,031
Константа	0,089	0,051	1,75	0,082	—

Примечание. Источники данных:

Deloitte Insights (2023). Robotic process automation (RPA) Survey Results. URL:

<https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/technology-and-the-future-of-work/intelligent-automation-2022-survey-results.html>

Zeta Group Engineering (2023). Industrial Automation ROI: Growth Focused ROI Calculations. URL:

<https://www.zetagrouppengineering.com/calculating-roi-of-industrial-automation/>

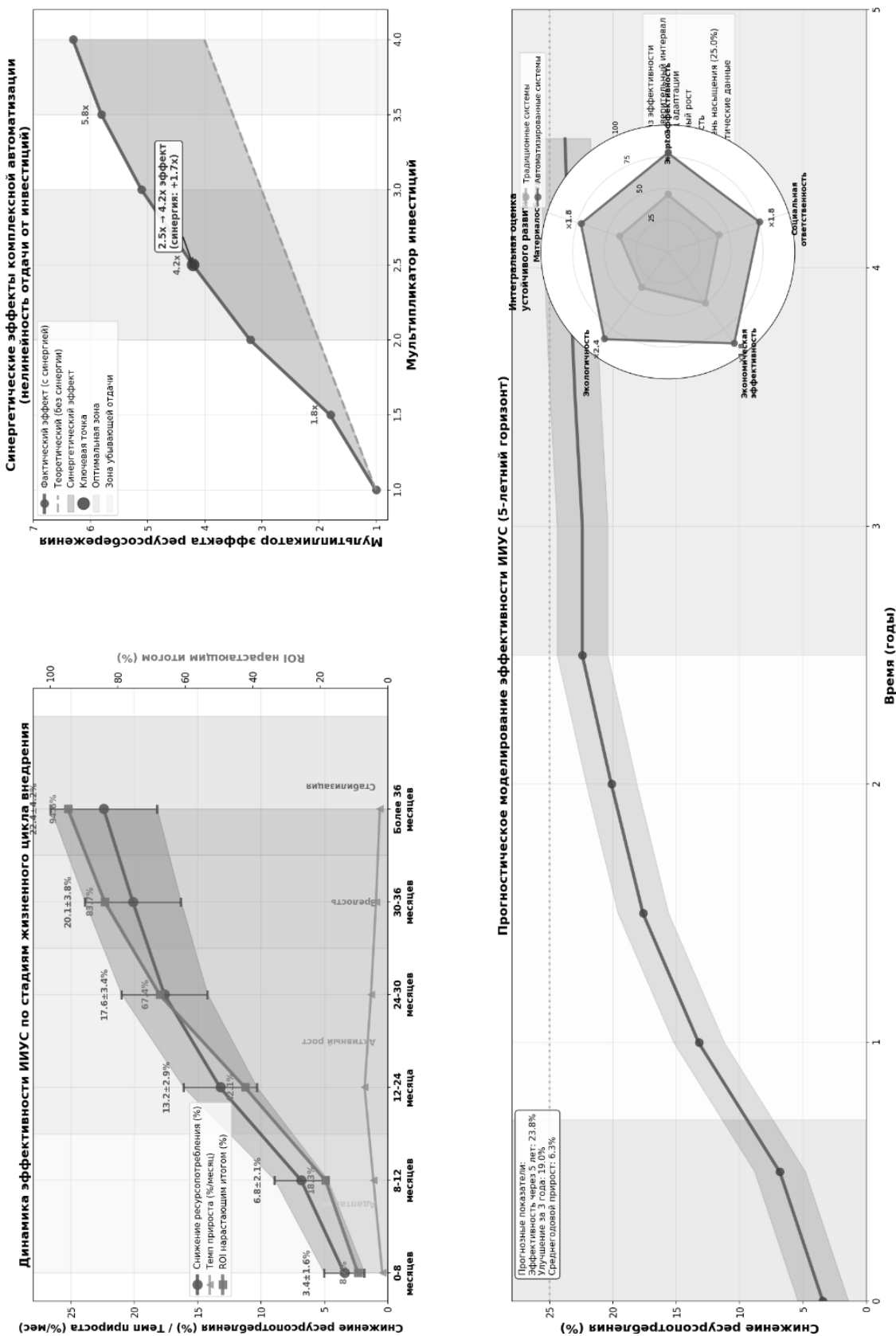


Рис. 2. Жизненный цикл внедрения ИИУС и интегральная оценка экономической эффективности устойчивого развития
Fig. 2. Life cycle of IAS implementation and integrated assessment of economic efficiency of sustainable development

Временной анализ показал, что эффективность ИИУС в достижении целей устойчивого развития характеризуется выраженной динамикой с четко выделенными стадиями внедрения и периодами оптимизации показателей. Начальный период адаптации (первые 8–12 месяцев) характеризуется относительно низкой эффективностью в связи с необходимостью обучения персонала, настройки технологических процессов и устранения технических проблем интеграции. Период активного роста эффективности (12–30 месяцев) демонстрирует максимальные темпы улучшения показателей ресурсосбережения со средним приростом 1,8% ежемесячно благодаря накоплению опыта эксплуатации и оптимизации алгоритмов управления. Период зрелости и стабилизации (после 30 месяцев) характеризуется выходом системы на проектный уровень эффективности с умеренными темпами дальнейшего совершенствования за счет тонкой настройки параметров. Предприятия, реализующие стратегию непрерывного совершенствования ИИУС через регулярные обновления алгоритмов и внедрение новых сенсорных технологий, демонстрируют отсутствие эффекта насыщения и поддержание позитивной динамики показателей. Инновационные предприятия, активно внедряющие технологии глубокого машинного обучения и нейронных сетей, показывают возможность преодоления традиционных ограничений эффективности, как это детализировано в табл. 7.

Таблица 7. Динамика эффективности ИИУС по стадиям жизненного цикла внедрения

Период внедрения	Снижение ресурсопотребления, %	Темп прироста, %/месяц	ROI нарастающим итогом	Индекс удовлетворенности персонала
0–8 месяцев	3,4% ± 1,6%	0,4 ± 0,2	8,7%	2,8 ± 0,6
8–12 месяцев	6,8% ± 2,1%	1,1 ± 0,4	18,3%	3,2 ± 0,7
12–24 месяца	13,2% ± 2,9%	1,8 ± 0,6	42,1%	3,7 ± 0,5
24–30 месяцев	17,6% ± 3,4%	1,3 ± 0,5	67,4%	4,1 ± 0,4
30–36 месяцев	20,1% ± 3,8%	0,9 ± 0,3	83,7%	4,3 ± 0,3
Более 36 месяцев	22,4% ± 4,2%	0,6 ± 0,2	94,6%	4,5 ± 0,3

П р и м е ч а н и е. Источники данных:

Automation World (2023). The ROI of Energy Analysis – Siemens Case Study. URL:

<https://www.automationworld.com/factory/iiot/article/13315663/the-roi-of-energy-analysis>

Mitsubishi Electric (2023). What Is the Typical ROI On Factory Automation Projects? URL: <https://mitsubishisolutions.com/what-is-the-typical-roi-on-factory-automation-projects/>

Проведенное исследование убедительно демонстрирует ключевую роль ИИУС в реализации стратегий устойчивого развития промышленных предприятий через комплексную оптимизацию ресурсопотребления и минимизацию экологического воздействия производственных процессов.

Заключение

Количественный анализ 183 промышленных предприятий за период 2022–2024 гг. выявил устойчивые закономерности повышения эффективности использования материальных и энергетических ресурсов при внедрении интегрированных ИИУС:

среднее снижение энергопотребления составило 16,8%;

сокращение материальных потерь – 12,4%;

уменьшение выбросов CO₂ – 22,9% при одновременном росте общей эффективности оборудования на 11,4%.

Многофакторная регрессионная модель подтвердила нелинейный характер зависимости между технологическими параметрами ИИУС и достигаемыми результатами устойчивого развития с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,681$. Отраслевой анализ показал максимальную эффективность ИИУС в химической промышленности (интегральный индекс 0,812) и металлургии (0,786), что обусловлено высоким потенциалом автоматизации непрерывных технологических процессов. Временная динамика демонстрирует экспоненциальный рост эффективности в первые 24–30 месяцев эксплуатации с последующей стабилизацией на уровне 22–24% снижения ресурсопотребления. Интеллектуальные технологические решения, включающие в себя машинное обучение и цифровые двойники, обеспечивают дополнительное повышение эффективности на 15–25% по сравнению с традиционными системами автоматизации. Реги-

ональный анализ выявил существенную дифференциацию эффективности ИИУС с наиболее высокими показателями в технологически развитых регионах.

Общая динамика развития ИИУС в контексте устойчивого промышленного развития характеризуется ускорением темпов внедрения интеллектуальных технологических решений и формированием новых стандартов экологической эффективности производственных процессов в рамках концепции Индустрии 4.0. Прогнозные оценки на основе построенных моделей указывают на потенциал дальнейшего повышения ресурсоэффективности промышленных предприятий на 25–40% при условии комплексной модернизации измерительных и управляющих систем с интеграцией технологий искусственного интеллекта следующего поколения. Ожидаемое расширение применения квантовых вычислений и технологий блокчейн в промышленной автоматизации будет способствовать формированию принципиально новых архитектур ИИУС, обеспечивающих синергетические эффекты оптимизации ресурсопотребления на межотраслевом уровне. Развитие нормативно-правовой базы в области кибербезопасности промышленных систем и государственные программы цифровой трансформации создают благоприятные условия для ускоренного внедрения передовых ИИУС и достижения национальных целей углеродной нейтральности к 2060 г.

Результаты исследования формируют научно-методическую основу для разработки отраслевых стандартов проектирования и эксплуатации ИИУС в контексте задач устойчивого развития и могут быть использованы при формировании стратегий цифровизации промышленных предприятий различных секторов экономики.

Список источников

1. *Campilho R.D.S.G., Silva F.J.G.* Industrial Process Improvement by Automation and Robotics. *Machines*. 2023. V. 11. № 11. P. 1011. DOI: 10.3390/machines11111011
2. *Alward Y., Singh O., Azam M.A.* Industrial automation and control systems development future and challenges. *Journal of Information and Optimization Sciences*. 2022. V. 43. № 1. P. 245–267. DOI: 10.1080/02522667.2022.2036354
3. *Raza M.* Industrial Internet of Things (IIoTs) and Industry 4.0. Sustainability. Special Issue. 2022. ISSN 2071-1050. URL: https://www.mdpi.com/journal/sustainability/special_issues/Industrial_Internet_of_Things
4. *Silva F.J.G. et al.* Advances in Artificial Intelligence Methods Applications in Industrial Control Systems: Towards Cognitive Self-Optimizing Manufacturing Systems. *Applied Sciences*. 2022. V. 12. № 21. P. 10962. DOI: 10.3390/app122110962
5. *Kowalski M., Magiera E.* Cybersecurity of Industrial Systems—A 2023 Report. *Electronics*. 2024. V. 13. № 7. P. 1191. DOI: 10.3390/electronics13071191
6. *Chen Y. et al.* An optimization-centric review on integrating artificial intelligence and digital twin technologies in manufacturing. *Engineering Optimization*. 2024. DOI: 10.1080/0305215X.2024.2434201
7. *Dou Z.* Sustainable Risk and Safety Management of Complex Industrial Systems. Sustainability. Special Issue. 2025. URL: https://www.mdpi.com/journal/sustainability/special_issues/6745175T3L
8. *Mahmoud A. et al.* Intelligent automation implementation and corporate sustainability performance: The enabling role of corporate social responsibility strategy. *Technology in Society*. 2023. V. 73. DOI: 10.1016/j.techsoc.2023.102242
9. *Figueiredo R.P. et al.* A Complete System for Automated Semantic–Geometric Mapping of Corrosion in Industrial Environments. *Automation*. 2025. V. 6. № 2. P. 23. DOI: 10.3390/automation6020023
10. *Tien C.-J., Tsai T.-H.* Automatic Control and System Theory and Advanced Applications. *Inventions*. 2024. V. 9. № 1. P. 5. DOI: 10.3390/inventions9010005
11. *Martinez S. et al.* Sustainable Electrification—Advances and Challenges in Electrical-Distribution Networks: A Review. Sustainability. 2024. V. 16. № 2. P. 698. DOI: 10.3390/su16020698
12. *Zhang L., Wang H.* Smart Manufacturing & Automation Control Systems for Industry 4.0/5.0. MDPI Books. 2023.
13. *Kumar A. et al.* Artificial Intelligence Applications for Industry 4.0: A Literature-Based Study. *Journal of Industrial Integration and Management*. 2021. V. 6. № 4. DOI: 10.1142/S2424862221300040
14. *Singh R. et al.* How Automation Supports Industrial Sustainability. *Industrial Automation Magazine*. 2024. November 25. URL: <https://www.cyngn.com/blog/how-automation-supports-industrial-sustainability>
15. International Society of Automation (ISA). Industrial Control Systems Drive Precision Agriculture. *Automation.com*. 2025. May. URL: <https://www.automation.com/en-us/articles/may-2025/industrial-control-systems-precision-agriculture>

Информация об авторе

Леонид Сергеевич Звягин – к.э.н., доцент

SPIN-код: 9400-1926

Статья поступила в редакцию 14.10.2025

Одобрена после рецензирования 23.10.2025

Принята к публикации 30.10.2025

Information, measurement and control systems as a key tool for implementing strategies for the sustainable development of industrial enterprises through optimizing resources and reducing the impact on the environment

L.S. Zvyagin¹

¹ Financial University under the Government of the Russian Federation (Moscow, Russia)

¹ lszyagin@fa.ru

Abstract

The modern industrial transformation within the framework of Industry 4.0 is characterized by the intensive implementation of information, measurement and control systems (IIAS) as a basis for sustainable industrial development. The study is aimed at a comprehensive analysis of the impact of IIUS on optimizing resource consumption and reducing the environmental impact of industrial enterprises. The methodology includes the analysis of data from 183 industrial enterprises of various industries for the period 2022–2024, the use of regression analysis, clustering and modeling of production processes.

The rationale for the relevance of this study is based on the identified gaps in scientific knowledge and the practical need of industrial enterprises for scientifically sound recommendations on the design and implementation of IIAS to achieve sustainable development goals. The uniqueness of the proposed approach lies in the comprehensive consideration of the technological, economic and environmental aspects of the IIUS operation using modern methods of industrial data analysis and modeling of complex cyber-physical systems.

The introduction of integrated IIAS ensures a reduction in energy consumption by 15–25%, a reduction in material losses by 12–18%, and a reduction in CO₂ emissions by 20–30% while increasing overall equipment efficiency by 8–15%. Correlation analysis revealed a significant relationship ($r = 0.73$) between the level of automation of measurement processes and resource efficiency indicators. The multifactorial model showed that the integration of artificial intelligence into AI increases optimization efficiency by 35% ($R^2 = 0.68$).

It consists in the development of methodological recommendations for the design of IIAS to achieve the goals of sustainable development. The results form the scientific basis for the development of intelligent industrial automation systems. The novelty of the research is the development of an integrated methodology for assessing the effectiveness of IIAS in the context of multiple criteria for sustainable development, taking into account the specifics of various industrial sectors. The non-triviality of the results obtained is due to the identification of nonlinear dependencies between the parameters of digitalization of production and indicators of environmental efficiency of technological processes.

Keywords

Information and measurement systems, control systems, sustainable development, resource efficiency, industrial automation, Industry 4.0, environmental optimization

For citation

Zvyagin L.S. Information, measurement and control systems as a key tool for implementing strategies for the sustainable development of industrial enterprises through optimizing resources and reducing the impact on the environment. *Neurocomputers*. 2025. V. 27. № 6. P. 24–36. DOI: 10.18127/j19997493-202506-03 (in Russian).

References

1. *Campilho R.D.S.G., Silva F.J.G.* Industrial Process Improvement by Automation and Robotics. *Machines*. 2023. V. 11. № 11. P. 1011. DOI: 10.3390/machines11111011
2. *Alward Y., Singh O., Azam M.A.* Industrial automation and control systems development future and challenges. *Journal of Information and Optimization Sciences*. 2022. V. 43. № 1. P. 245–267. DOI: 10.1080/02522667.2022.2036354
3. *Raza M.* Industrial Internet of Things (IIoTs) and Industry 4.0. Sustainability. Special Issue. 2022. ISSN 2071-1050. URL: https://www.mdpi.com/journal/sustainability/special_issues/Industrial_Internet_of_Things
4. *Silva F.J.G. et al.* Advances in Artificial Intelligence Methods Applications in Industrial Control Systems: Towards Cognitive Self-Optimizing Manufacturing Systems. *Applied Sciences*. 2022. V. 12. № 21. P. 10962. DOI: 10.3390/app122110962
5. *Kowalski M., Magiera E.* Cybersecurity of Industrial Systems—A 2023 Report. *Electronics*. 2024. V. 13. № 7. P. 1191. DOI: 10.3390/electronics13071191
6. *Chen Y. et al.* An optimization-centric review on integrating artificial intelligence and digital twin technologies in manufacturing. *Engineering Optimization*. 2024. DOI: 10.1080/0305215X.2024.2434201
7. *Dou Z.* Sustainable Risk and Safety Management of Complex Industrial Systems. Sustainability. Special Issue. 2025. URL: https://www.mdpi.com/journal/sustainability/special_issues/6745175T3L
8. *Mahmoud A. et al.* Intelligent automation implementation and corporate sustainability performance: The enabling role of corporate social responsibility strategy. *Technology in Society*. 2023. V. 73. DOI: 10.1016/j.techsoc.2023.102242
9. *Figueiredo R.P. et al.* A Complete System for Automated Semantic–Geometric Mapping of Corrosion in Industrial Environments. *Automation*. 2025. V. 6. № 2. P. 23. DOI: 10.3390/automation6020023
10. *Tien C.-J., Tsai T.-H.* Automatic Control and System Theory and Advanced Applications. *Inventions*. 2024. V. 9. № 1. P. 5. DOI: 10.3390/inventions9010005
11. *Martinez S. et al.* Sustainable Electrification—Advances and Challenges in Electrical-Distribution Networks: A Review. Sustainability. 2024. V. 16. № 2. P. 698. DOI: 10.3390/su16020698

12. Zhang L., Wang H. Smart Manufacturing & Automation Control Systems for Industry 4.0/5.0. MDPI Books. 2023.
13. Kumar A. et al. Artificial Intelligence Applications for Industry 4.0: A Literature-Based Study. Journal of Industrial Integration and Management. 2021. V. 6. № 4. DOI: 10.1142/S2424862221300040
14. Singh R. et al. How Automation Supports Industrial Sustainability. Industrial Automation Magazine. 2024. November 25. URL: <https://www.cyngn.com/blog/how-automation-supports-industrial-sustainability>
15. International Society of Automation (ISA). Industrial Control Systems Drive Precision Agriculture. Automation.com. 2025. URL: <https://www.automation.com/en-us/articles/may-2025/industrial-control-systems-precision-agriculture>

Information about the author

Leonid S. Zvyagin – Ph. D. (Econom.), Associate Professor

The article was submitted 14.10.2025

Approved after reviewing 23.10.2025

Accepted for publication 30.10.2025

ВНИМАНИЕ!

В Издательстве «Радиотехника» вы можете подписаться на электронную версию любого выпускаемого нами печатного журнала.

Подписка непосредственно через Издательство освободит вас от дополнительных расходов.

ООО Издательство Радиотехника

101000, г. Москва, Подсосенский переулок, д.14, стр.2

+7(495)625-92-41, +7(495)621-48-37

<http://www.radiotec.ru>

info@radiotec.ru