

УДК: 330.46: 004.056: 338.24

A.B. Titov, V.N. Khurgina

ARCHITECTURE FOR UNIFICATION OF INDUSTRIAL MONITORING DATA FOR DYNAMIC INTERINDUSTRY BALANCE

The article develops an organizational and economic mechanism for data collection to support a dynamic input-output balance in near real-time mode, based on the principles of open architecture for industrial process control systems. It is demonstrated that the key limitation in implementing the concept of dynamic planning is not the mathematical apparatus, but the infrastructural fragmentation of industrial monitoring systems. An architecture is proposed that relies on standardization of component replacement interfaces, unified feature vectors for describing production processes, and a scalable data aggregation platform. An information exchange protocol is developed that ensures a balance of stakeholder interests through a mechanism of verifiable transactions. Results of simulation modeling confirm that the proposed approach reduces the response time of the planning system from 92 to 3.7 days while maintaining computational complexity and ensures a reduction in total cost of ownership (TCO) by 18-22%. The article contributes to the development of technical foundations for digital planning and can be applied in the creation of national platforms for monitoring industrial production.

Keywords: dynamic input-output balance, open architecture, industrial process control systems, standardization, simulation modeling, digital transformation.

А.Б.Титов¹, В.Н.Хургина²

АРХИТЕКТУРА УНИФИКАЦИИ ДАННЫХ ПРОМЫШЛЕННОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО МЕЖОТРАСЛЕВОГО БАЛАНСА

В статье разработан организационно-экономический механизм обеспечения сбора данных для динамического межотраслевого баланса в режиме, близком к реальному времени, на принципах открытой архитектуры систем управления технологическими процессами. Показано, что ключевым ограничением реализации концепции динамического планирования является не математический аппарат, а инфраструктурная разрозненность промышленных систем мониторинга. Предложена архитектура, основанная на стандартизации интерфейсов замены компонентов, единых векторах признаков для описания производственных процессов и масштабируемой платформе агрегации данных. Разработан протокол информационного обмена, обеспечивающий баланс интересов участников через механизм верифицируемых транзакций. Результаты имитационного моделирования подтверждают, что предложенный подход сокращает время реакции системы планирования с 92 до 3,7 дня при сохранении вычислительной сложности и обеспечивает снижение совокупной стоимости владения на 18-22%. Статья вносит вклад в развитие технических основ цифрового планирования и может быть использована при создании национальных платформ мониторинга промышленного производства.

Ключевые слова: динамический межотраслевой баланс, открытая архитектура, АСУ ТП, стандартизация, имитационное моделирование, цифровая трансформация.

DOI: 10.36807/2411-7269-2026-3-46-64-69

Введение

Межотраслевой баланс (МОБ) представляет собой экономико-математическую модель, описывающую взаимосвязи между отраслями экономики через систему уравнений распределения продукции. Классическая статическая модель В.В. Леонтьева [1], [2] описывается соотношением:

$$X = AX + Y, \tag{1}$$

где

X – вектор валового выпуска по n отраслям,

¹ Титов А.Б., доцент, кандидат экономических наук, доцент; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого", г. Санкт-Петербург

Titov A.B., Associate Professor, PhD in Economics, Associate Professor; Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peter the Great Saint Petersburg State Polytechnic University", Saint Petersburg

E-mail: titov_ab@spbstu.ru

² Хургина В.Н., аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург

Khurgina V.N., Postgraduate; Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg

E-mail: v.khurgina@gmail.com

A – матрица коэффициентов прямых затрат размерности $n \times n$,

Y – вектор конечного спроса.

Технологические коэффициенты (A) предполагаются постоянными, что справедливо лишь для коротких горизонтов планирования, и не учитывают инвестиционные лаги. Динамическое расширение модели, предложенное Н.И. Ведутой [3] и впоследствии Е.Н. Ведутой [4], вводит фактор времени и инвестиционную составляющую через матрицу коэффициентов капитальных затрат, позволяя описывать траекторию развития экономики:

$$X(t) = A(t)X(t) + B(X(t+1) - X(t)) + Y(t), \quad (2)$$

где помимо компонент, рассмотренных в (1) присутствуют:

$B(t)$ – матрица коэффициентов полных затрат с учётом инвестиционной составляющей, t – временной шаг процесса планирования.

Практическая реализация динамического МОБ сталкивается с фундаментальной проблемой: отсутствием унифицированной инфраструктуры сбора данных в режиме, близком к реальному времени. Однако если ранее, при доцифровых технических возможностях, эта проблема не могла быть решена в принципе, то в настоящее время современные цифровые технологии открывают возможность её решения [5]–[7], реализации которой пока препятствует отсутствие единого подхода. Гетерогенность промышленных протоколов, отсутствие единой семантики данных и высокая стоимость интеграции новых компонентов приводят к длительным циклам обновления планов, что делает невозможным оперативное реагирование на изменения спроса и внешние шоки в рамках планирования в экономических системах различного уровня.

В условиях высокой волатильности рынков традиционный приоритет максимальной точности прогноза уступает место требованию минимального запаздывания реакции. Для обоснования данного перехода введём специальный показатель скорости обработки информации для планирования Speed of Information Processing (SIP). С позиций кибернетического управления экономическими системами именно временной лаг контура обратной связи определяет устойчивость траектории развития экономики: если данные о дисбалансе поступают с задержкой, превышающей производственный цикл, корректирующие воздействия запаздывают и усиливают колебания. SIP количественно оценивает этот лаг, смещая фокус с ретроспективного учёта на адаптивное управление. В условиях санкционного давления и разрывов цепочек поставок [8] именно ускорение цикла "обнаружение → анализ → корректировка" становится самостоятельным экономическим фактором, превосходящим по значимости традиционные метрики точности.

Цель исследования – разработка организационно-экономического механизма и архитектуры унифицированного сбора данных, обеспечивающих работу динамического МОБ в режиме, близком к реальному времени, через стандартизацию интерфейсов, единые векторы признаков и масштабируемую платформу агрегации.

Результаты исследования

Для перехода от фрагментированного учёта к сквозному потоку данных необходимо сопоставить физические параметры производства с переменными балансовой модели. В Табл. 1 систематизированы ключевые группы параметров и их экономическая интерпретация для планирования, а также ключевые цифровые технологии, необходимые для сбора этой информации [9], [10] и требования к каналам передачи.

Таблица 1 – Унифицированные параметры производственной среды для системы планирования

Группа параметров	Конкретный параметр	Экономическое значение для планирования	Тип датчика/устройства	Стандарт протокола передачи
Материальные потоки	Остатки сырья на складе	Оценка потребности в закупках, риск остановки производства	Датчики уровня, RFID-метки, весовые платформы	MQTT, OPC UA
Производительность	Скорость работы оборудования	Расчёт фактического выпуска, выявление "узких мест"	Энкодеры, счётчики циклов, контроллеры станков	Modbus TCP, Profinet
Энергоресурсы	Потребление электроэнергии	Планирование затрат, выявление неэффективных режимов	Умные счётчики, датчики тока	M-Bus, LoRaWAN
Качество продукции	Процент брака/дефектов	Корректировка плана выпуска (на компенсацию брака)	Системы машинного зрения, датчики вибрации	HTTP/REST, MQTT
Логистика	Статус отгрузки/местоположение	Синхронизация производства с поставками и сбытом	GPS-трекеры, сканеры штрих-кодов	GSM/LTE, API

Источник: составлено авторами.

Формализация производственных параметров в единой семантической структуре устраняет разрыв между операционным учётом и моделированием в экономической системе целево-

го уровня планирования. Это позволяет автоматически транслировать отклонения на уровне цеха в корректировки матриц прямых и капитальных затрат, исключая ручной ввод и снижая вероятность искажения плановых пропорций.

Архитектурное решение должно гарантировать непрерывность информационного потока даже при плановой или аварийной замене компонентов, согласно требованию соответствующих стандартов в предметной области [11], [12]. На Рис. 1 представлена трёхуровневая структура, обеспечивающая стандартизированную интеграцию оборудования без остановки технологического процесса.

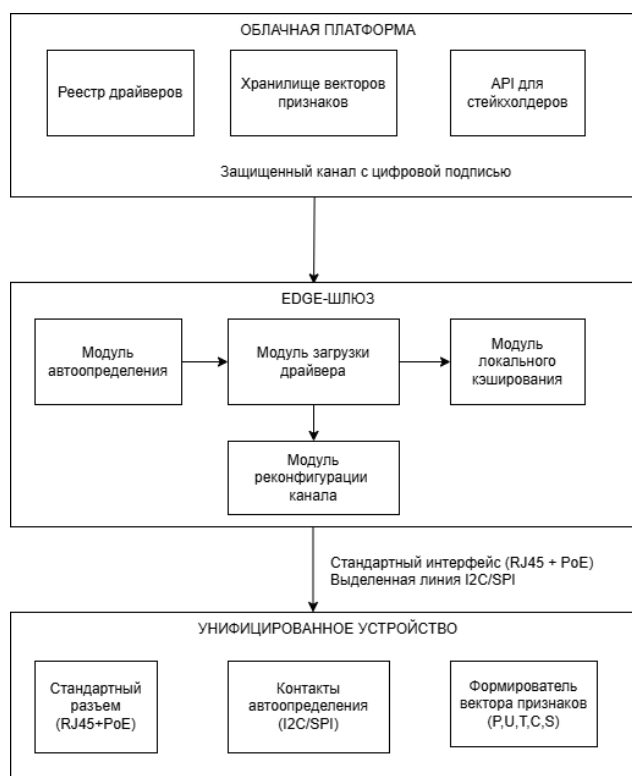


Рисунок 1 – Схема системы стандартизированной замены компонента

Потенциальный экономический эффект достигается за счёт декомпозиции функций: edge-шлюз берёт на себя нормализацию протоколов и первичную валидацию. Унифицированное устройство формирует данные в формате вектора признаков (P, U, T, S, C). При этом P – идентификатор отслеживаемого параметра, U – единица измерения параметра, T – метка времени, S – источник данных (уникальный идентификатор устройства). Важной составляющей является C – коэффициент доверия, который рассчитывается на основе исторических данных.

Разделение функций между уровнями создаёт условия для формирования конкурентного рынка технических решений, совместимых с системой планирования. Производители оборудования конкурируют по надёжности и точности, а не по отношению к определённому вендору (или экосистеме), что напрямую снижает капитальные затраты на модернизацию и ускоряет выполнение требований по импортозамещению.

Непрерывность планирования обеспечивается автоматизированным циклом ввода новых узлов мониторинга в эксплуатацию. Пример возможной реализации алгоритма такой реконфигурации, представленный на Рис. 2, исключает участие наладчика на этапе инициализации.

Перевод процедуры замены оборудования из ручного режима в автоматизированный радикально сокращает операционные издержки. Исключение человеческого фактора при настройке протоколов минимизирует риски ошибок конфигурации, а встроенная верификация подписей обеспечивает соответствие требованиям кибербезопасности для объектов критической инфраструктуры.

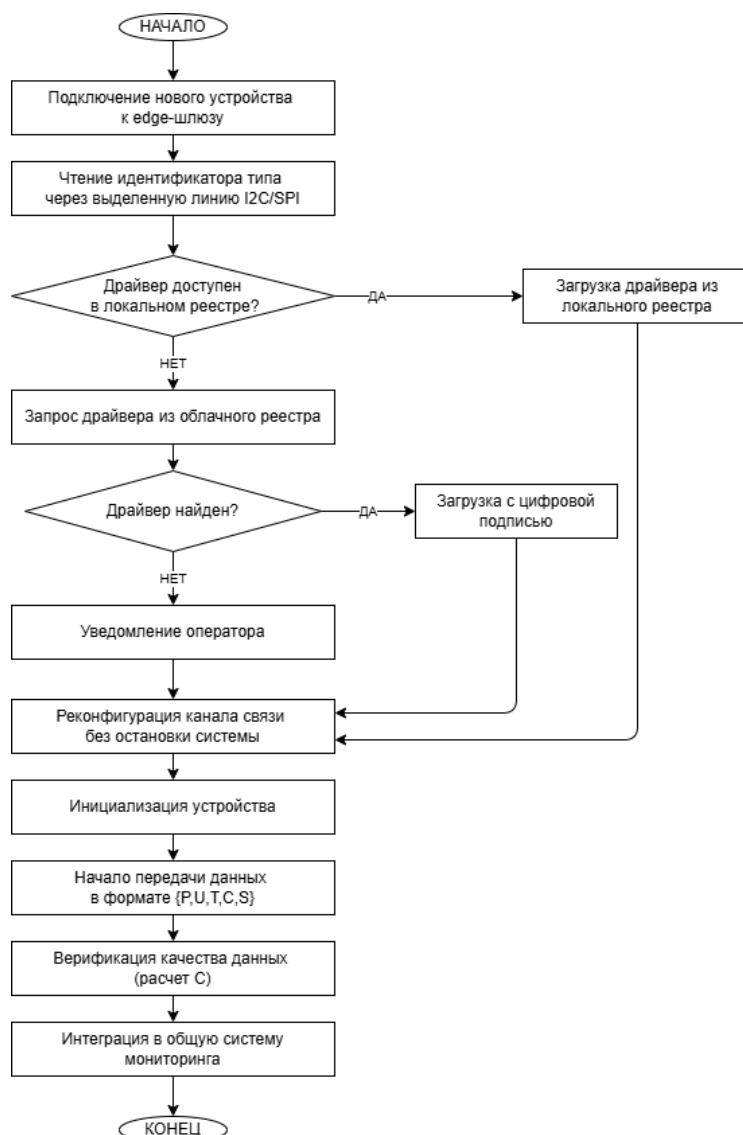


Рисунок 2 – Алгоритм автоматической реконфигурации системы при замене компонента

Экономическая целесообразность перехода на унифицированную архитектуру подтверждается сравнительным анализом ключевых показателей эффективности. В Табл. 2 приведены результаты проведенного авторами компьютерного моделирования двух сценариев сбора данных для динамического МОБ.

Таблица 2 – Сравнительные показатели подходов к сбору данных

Показатель	Традиционный подход	Предложенная архитектура	Эффект
Время интеграции нового устройства	2-4 часа	5-10 минут	×24 ускорение
Задержка передачи данных	1-24 часа	1-5 секунд	×1000 ускорение
Доля успешной автоматической агрегации	35-50%	95-98%	+45–63 п.п.
Время реакции системы планирования (SIP)	~92 дня	~3,7 дня	×25 ускорение
Совокупная стоимость владения (TCO)	Базовая	-18–22%	Экономия
Рентабельность инвестиций (ROI)	Базовая	+12–13 п.п.	Рост
Падение выпуска при шоке (-15% спроса)	-21,4%	-8,2%	+13,2 п.п.
Логистические потери	18,7% от объема	6,9%	-11,8 п.п.
Избыточные запасы	24,1 дня	7,3 дня	-69,7%

Источник: составлено авторами по результатам имитационного моделирования.

Таким образом, значительное ускорение реакции системы планирования должно приводить к следующим экономическим эффектам:

- сокращение страховых запасов и логистических потерь высвобождает временно свободные оборотные средства;
- обеспечение стабильности выпуска промежуточной и готовой продукции в условиях внешних шоков.

Вычислительная сложность алгоритма обращения матрицы определяется как $O(n^3)$, что при использовании современных вычислительных мощностей позволяет решать задачи плани-

рования в экономических системах различного масштаба в режиме, близком к реальному времени.

Обсуждение

Полученные результаты позволяют сделать ряд выводов, значимых для теории и практики цифрового экономического планирования.

1) На компьютерной модели подтверждена трансформационная роль скорости обработки информации как самостоятельного экономического фактора.

2) Сформулирована концепция процесса стандартизации элементной базы. Формализация производственных параметров может обеспечить семантическую совместимость данных, полученных с оборудования независимо от его производителя. Данный подход соответствует современным исследованиям влияния цифровых экосистем на трансформацию экономических систем, где открытость архитектуры выступает ключевым фактором устойчивости [13], [14].

3) Механизм автоматической реконфигурации существенно снижает операционные издержки. Сокращение времени интеграции нового устройства исключает простои производства, а автоматическая верификация гарантирует безопасность системы, что критически важно при выполнении нормативных требований к объектам критической инфраструктуры, таких как сформулированные, например, в [15].

В то же время внедрение предложенного механизма сталкивается с институциональными барьерами, такими как необходимость межведомственной согласованности стандартов. Кроме того, экономическая модель требует эмпирической верификации на реальных пилотных проектах с различным горизонтом планирования. Наконец, реализация наших предложений приведёт к дальнейшему росту технологической зависимости отдельных производств, предприятий и отраслей, что требует разработки стратегии обеспечения устойчивости проектируемой цифровой инфраструктуры [16].

Практическая значимость. Результаты могут быть использованы: предприятиями для выполнения нормативных требований с оптимизацией совокупной стоимости владения; интеграторами для разработки совместимых решений; регуляторами для проектирования программ стимулирования цифровой трансформации; научным сообществом как база для дальнейших исследований в области динамического МОБ и экономики открытых промышленных платформ [5].

Заключение

Разработанный организационно-экономический механизм унифицированного сбора данных демонстрирует, что успешная реализация динамического межотраслевого баланса в современных условиях зависит не только от математического аппарата, но и от качества технической инфраструктуры. Предложенная архитектура на основе открытых стандартов, единых векторов признаков и периферийной платформы агрегации обеспечивает сокращение времени реакции системы планирования в 25 раз и снижение совокупной стоимости владения на 18-22%.

Научный вклад исследования заключается в интеграции динамической модели МОБ с концепцией открытой архитектуры систем управления, формализации унифицированного вектора признаков с автоматической оценкой качества данных и разработке алгоритма реконфигурации системы при замене компонентов без остановки производственного процесса.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на эмпирическую апробацию модели в рамках пилотных проектов топливно-энергетического комплекса и машиностроения, разработку отраслевых спецификаций параметров, а также оценку макроэкономического эффекта масштабирования предложенной архитектуры до уровня национальной платформы промышленной автоматизации.

Список использованных источников

1. Леонтьев В.В. Баланс народного хозяйства СССР // Плановое хозяйство. – 1925. – № 12. – С. 123-145.
2. Leontief W. (1986). Input-Output Economics (2nd edition). Oxford University Press.
3. Ведута Н.И. Цифровизация экономического планирования: кибернетический подход: монография. – М.: Гаудеамус, 2021.
4. Ведута Е.Н. Межотраслевой–межсекторный баланс: механизм стратегического планирования экономики: учебное пособие для вузов. – 2-е изд. – Москва: Академический проект, 2017. – 236 с.
5. Стратегическое управление промышленными экосистемами на основе платформенной концепции / В.В. Глухов, А.В. Бабкин, Е.В. Шкарупета, В.А. Плотников // Экономика и

управление. – 2021. – Т. 27. – № 10(192). – С. 751-765. – DOI: 10.35854/1998-1627-2021-10-751-765. – EDN MMCLZB.

6. Глобальные вызовы цифровой трансформации рынков: теория и практика современного управления, экономики и сферы услуг / В.Э. Щепинин, Е.Е. Абушова, И.Н. Авдеева [и др.]. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2024. – 1028 с. – ISBN 978-5-7422-8831-0. – DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24-559. – EDN WZAWQN.

7. Методические аспекты эффективной цифровизации экономических систем: на примере предприятий оборонно-промышленного комплекса / Е.Е. Дородных, Р.А. Князьнеделин, А.Х. Курбанов, В.А. Плотников. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2022. – 167 с. – ISBN 978-5-907627-77-2. – EDN UYEQOS.

8. Плотников В.А. Внешние санкции и Российская экономика: состояние и перспективы / В.А. Плотников, А.А. Маршанкулова // Деловой вестник предпринимателя. – 2022. – № 10(4). – С. 56-59. – EDN VFHGET.

9. Коновалов В.Б. Направления цифровой трансформации системы материально-технического обеспечения Вооружённых сил Российской Федерации / В.Б. Коновалов, А.Х. Курбанов, А.А. Солодаев // Вестник военной академии материально-технического обеспечения. – 2025. – № 1(41). – С. 61-72. – EDN GEXIOZ.

10. Щирый А.О. Курс по интеллектуальным многоагентным системам в контексте цифровых двойников для промышленности, энергетики и сельского хозяйства / А.О. Щирый // Техничко-технологическое обеспечение инноваций в агропромышленном комплексе: Материалы III Международной научно-практической конференции, Мелитополь, 10–11 декабря 2024 года. – Мелитополь: Мелитопольский государственный университет, 2024. – С. 976-980. – EDN DCRMQU.

11. IEC 61499 Function blocks for industrial process measurement and control systems. – Geneva: IEC, 2020. – 312 p.

12. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288-2008. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем. – М.: Стандартинформ, 2008. – 48 с.

13. Жолобова А.И. Информационные технологии в цифровой экономике / А.И. Жолобова, В.В. Макаров, Е.В. Павлова // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2021. – № 7(77). – С. 59-62. – DOI: 10.24412/2411-0450-2021-7-59-62. – EDN RFJQDX.

14. Макаров В.В. Влияние экосистем на цифровую трансформацию экономики / В.В. Макаров, Е.В. Павлова // Журнал правовых и экономических исследований. – 2024. – № 2. – С. 209-214. – DOI: 10.26163/GIEF.2024.83.47.030. – EDN NYLEVМ.

15. Постановление Правительства РФ от 14.11.2023 № 1912 "Об утверждении требований к обеспечению устойчивого функционирования объектов критической информационной инфраструктуры...".

16. Котляров И.Д. Устойчивость обслуживания потребителей в условиях цифровой экономики / И.Д. Котляров // Экономика и управление: теория и практика. – 2022. – Т. 8. – № 4. – С. 21-29.