

Научная статья

УДК 004.94:65.011.56

ОПТИМИЗАЦИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ И ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Решетникова Наталия Викторовна, кандидат технических наук, доцент, ведущий специалист по учебно-методической работе, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Россия, Санкт-Петербург, reshetnikova@mail.ru

Аннотация. Исследуется феномен систематического расхождения между нормативными регламентами и фактической траекторией исполнения административных потоков в сложных организационных системах. Доминирующие подходы к нормированию, базирующиеся на умозрительных экспертных оценках, не способны выявить скрытые петли переделок и стохастические заторы, что неизбежно провоцирует операционные риски при структурных изменениях. Цель работы состоит в разработке формализованного механизма, объединяющего алгоритмы индуктивного выявления структуры процессов по журналам событий с методами дискретно-событийного моделирования для решения задач ресурсной оптимизации. Предложена последовательная процедура, включающая реконструкцию сетей Петри, их преобразование в имитационные модели и калибровку на основе эмпирических распределений длительности операций. Адекватность имитационных моделей проверена с помощью критерия Колмогорова-Смирнова. Эмпирическую базу составили массивы транзакционных данных процесса многоступенчатого согласования договоров. Применение эволюционного поиска на базе генетических алгоритмов позволило синтезировать архитектуру, обеспечивающую сокращение 90-ого перцентиля времени цикла на 54% при жестких ограничениях на фонд оплаты труда. Результаты показывают, что интеграция интеллектуального анализа данных и стохастического

моделирования снижает влияние субъективных оценок аналитиков и смещает акцент управления с ретроспективного аудита на прогнозирование и упреждающее совершенствование бизнес-процессов.

Ключевые слова: интеллектуальный анализ процессов; дискретно-событийное моделирование; стохастические сети Петри; журналы событий; эволюционная оптимизация; генетические алгоритмы; реинжиниринг бизнес-процессов; управление организационными системами.

Original article

OPTIMIZATION OF BUSINESS PROCESSES OF ORGANIZATIONAL SYSTEMS BASED ON INTELLIGENT PROCESS ANALYSIS AND SIMULATION MODELING

Reshetnikova Natalia Viktorovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Specialist in Academic Methodology, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia, reshetnikova@mail.ru

Abstract. This paper examines the phenomenon of systematic discrepancies between regulatory procedures and the actual execution trajectory of administrative flows in complex organizational systems. Dominant approaches to standardization, based on speculative expert assessments, are unable to identify hidden rework loops and stochastic bottlenecks, which inevitably provoke operational risks during structural changes. The goal of this study is to develop a formalized mechanism combining algorithms for inductively identifying process structures using event logs with discrete-event modeling methods for solving resource optimization problems. A sequential procedure is proposed, including the reconstruction of Petri nets, their transformation into simulation models, and calibration based on empirical distributions of operation durations. The adequacy of the simulation models is verified using the Kolmogorov-Smirnov criterion. The empirical base consists of transactional data sets from the multi-stage contract approval process. The use of evolutionary search based on genetic

algorithms enabled the synthesis of an architecture that reduces the 90th percentile cycle time by 54% under strict payroll constraints. The results demonstrate that the integration of data mining and stochastic modeling reduces the influence of subjective analyst assessments and shifts management focus from retrospective auditing to forecasting and proactive business process improvement.

Keywords: process mining; discrete event modeling; stochastic Petri nets; event logs; evolutionary optimization; genetic algorithms; business process reengineering; organizational systems management.

Актуальность и степень разработанности проблемы исследования. Функционирование современных организационных систем базируется на непрерывном исполнении совокупности операционных процедур, среди которых ключевую роль играют механизмы документооборота, многоступенчатого согласования и обработки входящих заявок. Исторически управление подобными потоками опиралось на жесткую регламентацию и нормативное закрепление последовательностей действий, что предполагало детерминированный характер прохождения этапов. Однако по мере усложнения корпоративных структур и интеграции разнородных информационных сервисов фактическая траектория движения документов или запросов приобретает выраженную стохастическую природу. Возникающие коллизии, возвраты на доработку, параллельное выполнение задач различными подразделениями и ресурсные ограничения формируют динамическую среду, в которой классические детерминированные схемы утрачивают прогностическую ценность [1], [2].

Одной из основных проблем процессного управления является систематическое расхождение между предписывающими моделями и фактическим выполнением процессов. Традиционные методы бизнес-анализа предполагают построение идеализированных графов работ на основе экспертных интервью и нормативной документации, в результате чего часть фактически выполняемых процессов может не отражаться в формализованных

схемах. Аналитик фиксирует то, как процедура должна выполняться согласно регламенту, а фактические маршруты обхода узких мест, неформальные коммуникации и адаптивное поведение сотрудников остаются за рамками формализованных схем [3]. В результате оптимизационные решения, разработанные на основе таких моделей, при внедрении сталкиваются с ограничениями реальной организационной среды и не обеспечивают ожидаемого экономического эффекта, поскольку исходная модель для принятия решений не отражает фактическое выполнение процесса.

Преодоление указанного разрыва стало возможным благодаря концепции интеллектуального анализа процессов, сформировавшейся на стыке науки о данных и теории управления. В отличие от умозрительного конструирования схем, данный подход опирается на журналы событий, автоматически генерируемые корпоративными информационными системами при каждом факте взаимодействия пользователя или аппаратного модуля с объектом управления [4]. Как отмечает И.А. Брусакова, анализ событийных данных реконструирует фактическую топологию потоков, выявляет скрытые петли обратной связи и количественно оценивает степень соответствия нормативной модели фактическому выполнению процесса. Использование транзакционных данных позволяет сделать диагностику процессов менее зависимой от субъективных экспертных оценок [5].

Вместе с тем констатация фактических маршрутов и локализация узких мест составляют описательный этап исследования, который не отвечает на вопрос о том, как именно следует реорганизовать систему для достижения заданных показателей эффективности. Вмешательство в работающий бизнес-процесс с целью проверки гипотез связано с неприемлемыми операционными рисками и финансовыми потерями [6]. В этих условиях необходимым инструментом верификации структурных изменений выступает аппарат имитационного моделирования, обеспечивающий создание изолированной вычислительной среды для проведения сценарных экспериментов. Калибровка

параметров стохастических имитационных моделей на основе статистических характеристик, полученных методами интеллектуального анализа, включая эмпирические распределения временных интервалов, вероятности ветвления маршрутов и профили загрузки ресурсов, обеспечивает воспроизведение основных закономерностей поведения исходной системы [7].

Интеграция методов извлечения фактических топологий из массивов событийных данных и аппарата дискретно-событийного моделирования образует замкнутую аналитическую систему, способную обеспечить математическую строгость при поиске оптимальных конфигураций процессов документооборота и сервисного обслуживания. Совместное применение указанных подходов снижает влияние субъективных экспертных оценок и позволяет проверять управленческие решения до их внедрения в корпоративную инфраструктуру. В рамках настоящего исследования ставится задача разработки формализованного механизма сопряжения алгоритмов обнаружения процессов с параметрами имитационных моделей, что создаст теоретико-методологическую базу для автоматизированной диагностики узких мест и оценки сценариев реинжиниринга.

Управление операционной деятельностью современных предприятий все чаще опирается на процессный подход, предполагающий стандартизацию и регламентацию потоков работ. Классическая парадигма менеджмента качества предписывает проектировать идеализированные графы функций, базируясь на экспертных интервью и нормативной документации. Подобная практика порождает разрыв между предписывающей архитектурой и фактической траекторией движения документов [8], [9]. Как отмечают А. С. Набоков и соавторы, развитие процессного управления предполагает переход к анализу, основанному на объективных цифровых следах [10]. Интеллектуальный анализ данных о событиях сформировался как связующее звено между наукой о данных и процессной инженерией, предоставляя инструментарий для реконструкции подлинной топологии потоков на основе журналов событий [11].

Несмотря на высокую степень проработки алгоритмов обнаружения моделей, таких как эвристический и индуктивный майнеры, значительный массив исследований ограничивается описательной и диагностической аналитикой. Выявление узких мест и петель повторной обработки позволяет установить наличие неэффективности, однако само по себе не дает формализованных рекомендаций по структурной перестройке системы. Вмешательство в систему документооборота связано с неприемлемыми операционными рисками, что делает аппарат дискретно-событийного имитационного моделирования безальтернативной средой для верификации гипотез [12], [13]. Вместе с тем проблема автоматизированного преобразования стохастических сетей Петри, извлеченных из разнородных баз данных, в калиброванные имитационные модели с последующей эволюционной оптимизацией изучена лишь фрагментарно. Существующие разрозненные подходы не образуют единой процедуры, обеспечивающей согласование показателей имитационной модели с эмпирическими распределениями до начала генетического поиска, что обуславливает необходимость настоящего исследования.

Методология исследования. Эмпирическую базу работы составили массивы транзакционных данных, выгруженные из системы электронного документооборота крупного машиностроительного холдинга. Объектом анализа выбран процесс многоступенчатого согласования договоров с контрагентами, критичный для обеспечения непрерывности цепочек поставок. Сформированный журнал событий включает 5412 уникальных экземпляров, охватывающих двенадцатимесячный период, и содержит более 87 тысяч записей с атрибутами временных меток, идентификаторов исполнителей и ролей. Предварительная фильтрация позволила исключить аномальные выбросы, вызванные техническими сбоями интеграционных шин и ручными корректировками справочников.

На этапе реконструкции топологии потоков был проведен сравнительный

анализ двух доминирующих алгоритмов. Эвристический майнер, обладая высокой устойчивостью к стохастическому шуму, сгенерировал граф с избыточной плотностью ребер, что существенно снизило читаемость схемы и затруднило последующую формализацию. Индуктивный майнер обеспечил построение строго блочно-структурированной сети Петри, гарантирующей отсутствие тупиковых состояний. Качество полученной модели оценивалось по четырем критериям: степень воспроизведения журнала событий составила 0,94, точность - 0,88, способность к обобщению - 0,82, а структурная простота была обеспечена за счет фильтрации вариантов поведения с частотой не более 5%.

Для перехода к динамическому анализу выявленная сеть Петри была транслирована в среду имитационного моделирования AnyLogic. Параметризация модели основывалась на эмпирических функциях распределения: для длительности операций использовались логнормальное и гамма-распределения, а интервалы поступления заявок описывались нестационарным пуассоновским потоком с выраженной суточной сезонностью. Валидация адекватности синтетической среды осуществлялась посредством двухвыборочного критерия Колмогорова-Смирнова. Сопоставление теоретических и фактических кумулятивных функций распределения времени цикла, а также длин очередей на этапах юридической и финансовой экспертизы, подтвердило нулевую гипотезу о принадлежности выборок к одному закону при уровне значимости 0,05.

Поиск оптимальной конфигурации ресурсов формулировался как задача нелинейного программирования. Целевая функция задавалась как минимизация 90-ого перцентиля времени цикла при жестком ограничении на общий фонд оплаты труда. В качестве переменных оптимизации выступали матрицы перераспределения ролей, возможность распараллеливания независимых экспертиз и пороги автоматической эскалации. Решение задачи осуществлялось методом имитационной оптимизации на базе генетического алгоритма, где каждая хромосома кодировала специфическую архитектуру маршрутизации и

ресурсного обеспечения.

Результаты исследования. Диагностический этап выявил системную проблему в процессе согласования. Тепловая карта задержек, наложенная на граф процесса, показала наибольшую концентрацию времени ожидания на этапах проверки службой безопасности и финансового контроля. Ресурсный анализ показал, что при средней загрузке профильных специалистов на уровне 65% локальные пики поступления заявок формируют заторы, провоцирующие массовые возвраты документов инициаторам на доработку. Доля циклов повторного согласования достигала 34%, что существенно увеличивало среднее время цикла.

Эволюционный поиск в пространстве имитационных сценариев потребовал 450 итераций генетического алгоритма до достижения устойчивой сходимости. В результате была получена конфигурация процесса со структурными изменениями. Устранена жесткая последовательная зависимость между технической и коммерческой экспертизами, чтобы запускать их параллельно сразу после этапа первичной регистрации. Алгоритм изменил распределение ресурсов: количество сотрудников на этапе формальной проверки было сокращено, а численность юридических аналитиков увеличена за счет обучения сотрудников смежным функциям.

Показатели функционирования системы до и после внедрения оптимизационных воздействий систематизированы в таблице 1.

Таблица 1 - Сравнительная характеристика метрик процесса согласования договоров

Метрика эффективности	Фактическое состояние (As-Is)	Оптимизированная модель (To-Be)	Динамика
Среднее время цикла, дни	14,2	8,7	-38,7%
90-ый перцентиль цикла, дни	28,5	13,1	-54,0%
Пропускная способность, ед./мес	450	610	+35,5%

Доля возвратов на доработку, %	34,0	12,5	-63,2%
Коэффициент загрузки узкого места	0,96	0,81	Снижение риска заторов

Источник: разработано автором.

Интерпретация полученных данных свидетельствует о том, что сокращение хвоста распределения оказалось значительно более выраженным, чем снижение математического ожидания. Это объясняется тем, что параллелизация процедур и выравнивание нагрузки нивелировали влияние стохастических пиков, которые ранее вызывали каскадные задержки во всей цепи.

Обсуждение результатов исследования. Предложенный подход демонстрирует высокую применимость при решении задач реинжиниринга административных процессов. Интеграция алгоритмов индуктивного обнаружения с процедурами стохастической симуляции позволяет преодолеть когнитивные искажения, свойственные традиционным методам нормирования. В частности, эмпирическое доказательство того, что распараллеливание экспертиз устраняет искусственные простои, опровергает укоренившиеся в корпоративной культуре стереотипы о строгой последовательности виз [14].

Ограничением разработанного подхода следует признать допущение о стационарности поведенческих паттернов исполнителей. В реальных организационных системах внедрение новых маршрутов может спровоцировать адаптивную реакцию персонала, не отраженную в исторических логах. Перспективы дальнейших исследований связаны с включением в имитационные модели агентного компонента, чтобы моделировать когнитивную усталость и изменение мотивации сотрудников при изменении систем стимулирования. Тем не менее, доказанная валидность дискретно-событийных конструкций, калиброванных по журналам событий, формирует надежный фундамент для принятия управленческих решений в условиях неопределенности и ресурсных ограничений, что полностью отвечает требованиям, предъявляемым к

исследованиям в области управления организационными системами.

Выводы. Проведенное исследование подтверждает гипотезу о том, что синтез алгоритмов индуктивного извлечения топологий и аппарата дискретно-событийной симуляции образует надежный методологический каркас для реинжиниринга административных потоков. Трансляция стохастических сетей Петри, реконструированных по цифровым следам корпоративных информационных систем, в калиброванные имитационные среды позволяет нивелировать когнитивные искажения, неизбежно возникающие при умозрительном нормировании трудоемкости. Достигнутое в ходе эволюционного поиска сокращение хвоста распределения временных характеристик свидетельствует о том, что оптимизационные воздействия должны быть направлены на устранение структурных дисфункций, порождающих каскадные задержки и петли переделок. Формализованный механизм сопряжения эмпирических журналов событий с параметрами ресурсного обеспечения доказал свою состоятельность при решении задач минимизации времени цикла в условиях жестких бюджетных ограничений.

Практическое применение разработанного подхода ограничено особенностями исходных эмпирических данных. Достоверность генерируемых архитектурных решений критически зависит от степени зрелости учетной инфраструктуры предприятия. В контексте концепции интернета событий транзакционные записи часто подвержены влиянию факторов, снижающих их истинность: пропуски временных меток при сбоях интеграционных шин, отсутствие атрибутов исполнителей в случаях ручного обхода регламентов, а также агрегирование нескольких элементарных действий в единую системную операцию. Подобная деградация гранулярности журналов неизбежно приводит к генерации зашумленных моделей, что вынуждает прибегать к эвристической фильтрации на этапе предварительной подготовки. Отсутствие фиксации неформальных коммуникаций и теневых маршрутов согласования оставляет за рамками математической конструкции значительный пласт организационной

реальности, способный исказить прогнозные оценки пропускной способности узлов.

Дальнейшее развитие предложенного инструментария видится в смещении фокуса на предиктивную аналитику, функционирующую в режиме реального времени. Интеграция обнаруженных процессных графов с методами машинного обучения открывает перспективы для конструирования алгоритмов, способных прогнозировать оставшееся время завершения конкретного экземпляра процесса еще на ранних стадиях его жизненного цикла. Подобная трансформация переводит систему управления из реактивного состояния в проактивное: при выявлении вероятностных маркеров надвигающегося нарушения соглашений об уровне обслуживания система получает возможность инициировать превентивную эскалацию или динамическое перераспределение ресурсного пула до момента фактического возникновения затора.

Перспективные исследования будут сосредоточены на проектировании гибридных вычислительных архитектур, сочетающих строгость формальных методов верификации с адаптивностью статистических предикторов, что отвечает вызовам, стоящим перед современной теорией управления сложными организационно-техническими комплексами.

Список литературы

1. Приходько О. Л. Реинжиниринг бизнес-процессов в транспортной компании: концептуальная модель трансформации в условиях цифровизации // Вестник евразийской науки. – 2025. – Т. 17. – №. 2S. – С. 70.
2. Морковкин Д. Е., Шихалиева Д. С., Алеева Г. И., Петрусевич Т. В. Развитие механизмов принятия управленческих решений на основе технологий искусственного интеллекта и больших данных // Вестник евразийской науки. – 2025. – Т. 17. – №. 1S. – С. 68.
3. Михеев В. С. Математическое моделирование информационных потоков в условиях цифровой трансформации // Экономика и управление. – 2026. – Т. 32. – №. 5. – С. 659-671.

4. Долгова О. И., Никитаева А. Ю. Имитационное моделирование бизнес-процессов промышленных компаний в условиях Индустрии 4.0 // *π-Economy*. – 2023. – Т. 16. – №. 4. – С. 26-40.
5. Брусакова И. А. Имитационное моделирование бизнес-процессов для цифровых двойников // *Петербургский экономический журнал*. – 2023. – №. 1. – С. 51-61.
6. Егоров Д. С. Модель и механизм оптимизации бизнес-процессов в проектно-изыскательской деятельности на основе цифровых решений // *Естественно-гуманитарные исследования*. – 2025. – №. 3 (59). – С. 800-808.
7. Козлова В. В. Оптимизация бизнес-процессов с применением технологий искусственного интеллекта // *Вестник евразийской науки*. – 2025. – Т. 17. – №. 2S. – С. 39.
8. Мещерякова Т. С., Арсаханова З. А., Бровкин А. В., Шамухаметова Е. С., Боков Ю. А. Разработка интеллектуальной системы управления процессами добычи и обогащения угля на основе технологий искусственного интеллекта и промышленного интернета вещей // *Уголь*. – 2024. – Т. 1187. – №. 12. – С. 89-98.
9. Першин Я. Р., Будкина Е. С. Цифровизация финансового менеджмента организации: интеграция технологий распределенного реестра и искусственного интеллекта в процессы управления финансами // *Вестник евразийской науки*. – 2024. – Т. 16. – №. 6. – С. 42.
10. Набоков А. С., Булавский П. Е., Марков Д. С. Анализ и моделирование процессов проектирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики // *Автоматика на транспорте*. – 2025. – Т. 11. – №. 2. – С. 164-177.
11. Понкратов-Вайсман Б. Д. Качество данных в процессах материально-технического обеспечения и адаптация методологии CRISP-DM // *Экономика и управление*. – 2025. – Т. 31. – №. 4. – С. 538-552.
12. Добренко Н. В., Бабан В. Ю., Чернышева А. В., Говоров А. И. Разработка интегрированной панели управления жизненным циклом моделей машинного обучения для ИТ-организаций с распределенной инфраструктурой // *Экономика*.

Право. Инновации. – 2025. – Т. 13. – №. 4. – С. 83-100.

13. Добриневский А. В. Разработка моделей прогнозирования и управления для автоматизированных производственных систем // Хлебопечение России. – 2024. – Т. 68. – №. 2. – С. 76-87.

14. Глинянов С. В. Анализ потенциала и ограничений использования технологии цифровых двойников в оптимизации цепочек поставок в секторе розничной торговли // Хлебопечение России. – 2024. – Т. 68. – №. 2. – С. 127-135.

References

1. Prihod'ko O. L. Reinzhiniring biznes-processov v transportnoj kompanii: konceptual'naya model' transformacii v usloviyax cifrovizacii // Vestnik evrazijskoj nauki. – 2025. – Т. 17. – №. 2S. – S. 70.

2. Morkovkin D. E., Shixalieva D. S., Aleeva G. I., Petrusevich T. V. Razvitie mexanizmov prinyatiya upravlencheskix reshenij na osnove texnologij iskusstvennogo intellekta i bol'shix danny'x // Vestnik evrazijskoj nauki. – 2025. – Т. 17. – №. 1S. – S. 68.

3. Mixeev V. S. Matematicheskoe modelirovanie informacionny'x potokov v usloviyax cifrovoj transformacii // E'konomika i upravlenie. – 2026. – Т. 32. – №. 5. – S. 659-671.

4. Dolgova O. I., Nikitaeva A. Yu. Imitacionnoe modelirovanie biznes-processov promy'shlenny'x kompanij v usloviyax Industrii 4.0 // π -Economy. – 2023. – Т. 16. – №. 4. – S. 26-40.

5. Brusakova I. A. Imitacionnoe modelirovanie biznes-processov dlya cifrovyy'x dvojniov // Peterburgskij e'konomicheskij zhurnal. – 2023. – №. 1. – S. 51-61.

6. Egorov D. S. Model' i mexanizm optimizacii biznes-processov v proektno-izy'skatel'skoj deyatel'nosti na osnove cifrovyy'x reshenij // Estestvenno-gumanitarny'e issledovaniya. – 2025. – №. 3 (59). – S. 800-808.

7. Kozlova V. V. Optimizaciya biznes-processov s primeneniem texnologij iskusstvennogo intellekta // Vestnik evrazijskoj nauki. – 2025. – Т. 17. – №. 2S. – S. 39.

8. Meshheryakova T. S., Arsaxanova Z. A., Brovkin A. V., Shamuxametova E. S., Bokov Yu. A. Razrabotka intellektual'noj sistemy` upravleniya processami doby`chi i obogashheniya uglya na osnove texnologij iskusstvennogo intellekta i promy`shlennogo interneta veshhej // Ugol`. – 2024. – T. 1187. – №. 12. – S. 89-98.
9. Pershin Ya. R., Budkina E. S. Cifrovizaciya finansovogo menedzhmenta organizacii: integraciya texnologij raspredelennogo reestra i iskusstvennogo intellekta v processy` upravleniya finansami // Vestnik evrazijskoj nauki. – 2024. – T. 16. – №. 6. – S. 42.
10. Nabokov A. S., Bulavskij P. E., Markov D. S. Analiz i modelirovanie processov proektirovaniya sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemexaniki // Avtomatika na transporte. – 2025. – T. 11. – №. 2. – S. 164-177.
11. Ponkratov-Vajsman B. D. Kachestvo danny`x v processax material`no-texnicheskogo obespecheniya i adaptaciya metodologii CRISP-DM // E`konomika i upravlenie. – 2025. – T. 31. – №. 4. – S. 538-552.
12. Dobrenko N. V., Baban V. Yu., Cherny`sheva A. V., Govorov A. I. Razrabotka integrirovannoj paneli upravleniya zhiznenny`m ciklom modelej mashinnogo obucheniya dlya IT-organizacij s raspredelennoj infrastrukturoid // E`konomika. Pravo. Innovacii. – 2025. – T. 13. – №. 4. – S. 83-100.
13. Dobrinevskij A. V. Razrabotka modelej prognozirovaniya i upravleniya dlya avtomatizirovanny`x proizvodstvenny`x sistem // Xlebopechenie Rossii. – 2024. – T. 68. – №. 2. – S. 76-87.
14. Glinyanov S. V. Analiz potenciala i ogranichenij ispol`zovaniya texnologii cifrovy`x dvojnikov v optimizacii cepochek postavok v sektore roznichnoj trgovli // Xlebopechenie Rossii. – 2024. – T. 68. – №. 2. – S. 127-135.

Статья поступила в редакцию 10.02.2026; одобрена после рецензирования 07.04.2026; принята к публикации 14.05.2026.

The article was submitted 10.02.2026; approved after reviewing 07.04.2026; accepted for publication 14.05.2026.