

Количественная оценка вариантов реинжиниринга процесса управления задачами разработки программного обеспечения на основе поглощающих цепей Маркова

А. И. Шамсеев • А. М. Сулейманова

Уфимский университет науки и технологий

Рассматривается задача количественного обоснования проектных решений при реинжиниринге межфункционального процесса управления задачами разработки программного обеспечения в небольшой ИТ-организации, где постановка, передача и приёмка задач выполняются по неформальным каналам. Модели процесса «как есть» и «как должно быть» предложено представлять вероятностно-взвешенными графами, интерпретируемыми как поглощающие цепи Маркова с двумя матрицами ресурсных весов — календарного времени и трудозатрат на координацию. С использованием фундаментальной матрицы цепи получены аналитические выражения для вероятности доведения задачи до результата, условного ожидаемого времени выполнения заказа, трудозатрат на координацию и коэффициента эффективности цикла, а также эластичности времени выполнения по параметрам этапов. Длительности базовых операций откалиброваны по данным 556 запросов на изменение и 400 задач двух открытых репозиториях, развиваемых командами сопоставимого масштаба. Анализ сценариев поэтапного применения эвристик перепроектирования показал сокращение ожидаемого времени выполнения заказа с 190,6 до 140,5 ч (на 26,3 %), трудозатрат на координацию — с 2,67 до 0,44 чел.-ч на задачу и устранение потерь задач, составлявших 7 %. Показано, что полное устранение возвратов и уточнений без изменения структуры процесса не обеспечивает показателей перепроектированного варианта, а его преимущество сохраняется при вероятности возврата на доработку до 0,63. Предложен замкнутый контур уточнения модели, в котором множество допустимых переходов конечного автомата статусов веб-системы совпадает с множеством дуг графа, а журнал переходов служит источником оценок параметров.

Реинжиниринг бизнес-процессов; управление задачами; разработка программного обеспечения; поглощающая цепь Маркова; вероятностно-взвешенный граф; анализ чувствительности; открытые репозитории; конечный автомат.

ВВЕДЕНИЕ

В организациях, разрабатывающих и сопровождающих программное обеспечение (ПО) на заказ, единица работы — задача разработки — последовательно проходит через несколько подразделений: приём обращений, службу поддержки, руководителей направлений и группу разработчиков. Если средства учёта задач применяются нерегулярно, путь задачи складывается из цепочки сообщений в мессенджере и электронной почте, сведения о её текущем состоянии известны главным образом исполнителю, а ожидания заказчика относительно результата выясняются лишь при сдаче. Возникающие при этом потери сосредоточены на стыках ролей и носят организационный характер, поэтому их устранение относится к предмету реинжиниринга бизнес-процессов, который предполагает не ускорение существующих операций, а пересмотр структуры процесса с использованием информационных технологий как средства, делающего новую структуру осуществимой [Ham90, Dav93, Xam11].

Шамсеев А. И., Сулейманова А. М. Количественная оценка вариантов реинжиниринга процесса управления задачами разработки программного обеспечения на основе поглощающих цепей Маркова // СИИТ. 2026. Т. 8, № 5(29). С. 43-56. DOI: 10.54708/SIIT-2026-no5-p25. EDN: RYTMCE.

Shamseev A. I., Suleymanova A. M. "Quantitative evaluation of software development task management process reengineering alternatives based on absorbing Markov chains" // SIIT. 2026. Vol. 8, no. 5(29), pp. 43-56. DOI: 10.54708/SIIT-2026-no5-p25. EDN: RYTMCE. (In Russian).

Типовая последовательность работ по реинжинирингу включает построение модели «как есть» (AS-IS), выявление узких мест, разработку модели «как должно быть» (TO-BE) и создание информационной системы, поддерживающей новый процесс [Реп13, Dum18]. Решению об автоматизации при этом должно предшествовать исследование предметной области, ограниченное той подсистемой организации, которая нуждается в реинжиниринге [Мои26]. Слабым звеном этой последовательности остаётся выбор между вариантами перепроектирования: он часто обосновывается качественно, поскольку графические нотации BPMN и UML фиксируют структуру процесса, но не содержат оценок вероятностей прохождения маршрутов и затрачиваемых ресурсов. На рассогласование структурного и параметрического описаний указано в работе [Жап26], где предложена трансляция диаграмм в вероятностно-взвешенные графы с матрицами вероятностей и весов и их последующей символьной и численной обработкой; близкий подход к оценке эффективности процессов разработки ПО на основе вероятностных причинно-следственных моделей развивается в [Нас21].

Для процессов разработки характерны циклы «проверка — доработка», повторяющиеся до принятия результата [Bac13, Rig13], а также исходы, при которых задача не доводится до конца. Обе особенности естественно описываются поглощающей цепью Маркова, для которой хорошо разработан аппарат вычисления вероятностей поглощения и ожидаемых накопленных величин [Кем70]. Практическим препятствием служит отсутствие статистики: в организации с неформализованным процессом журнал событий отсутствует по определению. В настоящей работе этот пробел восполняется двумя источниками — данными открытых репозиторий, где цикл «задача — запрос на изменение — проверка» протоколируется платформой [Gou14, Kal14], и априорными оценками параметров неформальных этапов, которые впоследствии уточняются по журналу внедряемой системы.

Цель работы — разработка методики количественной оценки вариантов реинжиниринга процесса управления задачами разработки ПО, позволяющей ранжировать проектные решения по их вкладу в показатели процесса, выявлять узкие места и определять границы устойчивости сделанных выводов.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объектом исследования является процесс управления задачами разработки в ИТ-подразделении организации, выполняющей разработку и сопровождение ПО на заказ. Участниками процесса выступают оператор приёма заявок, руководитель отдела заявок или службы поддержки, технический директор и разработчик. В исходном варианте заявка фиксируется оператором и пересылается руководителю отдела; руководитель в устной форме или в переписке согласует с техническим директором необходимость и приоритет доработки; технический директор ставит задачу разработчику сообщением в мессенджере. Разработчик выполняет работу, при необходимости уточняя требования в переписке, и сообщает о готовности; руководитель проверяет результат и либо возвращает его на доработку, либо уведомляет оператора, который информирует заказчика.

С позиции бережливого подхода в описанном процессе присутствуют потери трёх видов [Geo02]: ожидание и повторные обращения при передачах задачи между ролями; дефекты — уточнения требований и возвраты на доработку, обусловленные отсутствием зафиксированных критериев приёмки; избыточная координация — выяснение текущего состояния задачи и ручное информирование заказчика. Кроме того, при передаче по неформальному каналу задача может быть утрачена.

Задача исследования формулируется следующим образом. Для упорядоченного множества вариантов процесса $\{S_0, \dots, S_4\}$, где S_0 — исходный процесс, а S_4 — перепроектированный, требуется вычислить вектор показателей

$$y(S) = (P_G, E[T | G], E[C | G], K_{\text{ц}}), \quad (1)$$

где P_G — вероятность доведения задачи до целевого состояния G (результат передан заказчику); $E[T | G]$ — условное ожидаемое время выполнения заказа (lead time) при достижении цели, ч; $E[C | G]$ — ожидаемые трудозатраты участников на координацию в расчёте на одну задачу, чел.-ч; K_{π} — коэффициент эффективности цикла. Требуется также определить эластичности $E[T | G]$ по параметрам этапов и пороговые значения параметров, при которых вывод о предпочтительности перепроектированного варианта перестаёт выполняться.

МЕТОДИКА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ

Методика развивает архитектуру адаптивного цикла анализа с вычислительным и валидационным контурами [Жар26] применительно к задаче реинжиниринга (рис. 1). В проектном контуре по результатам обследования строится модель AS-IS, которая транслируется в вероятностно-взвешенный граф; по графу вычисляются показатели (1) и эластичности, на основании которых выбираются эвристики перепроектирования и строится модель TO-BE. В эксплуатационном контуре граф TO-BE реализуется в веб-системе в виде конечного автомата статусов задачи, а журнал переходов автомата служит источником оценок параметров, возвращаемых в проектный контур. Тем самым априорные оценки, неизбежные на этапе проектирования, по мере эксплуатации системы заменяются наблюдаемыми значениями.

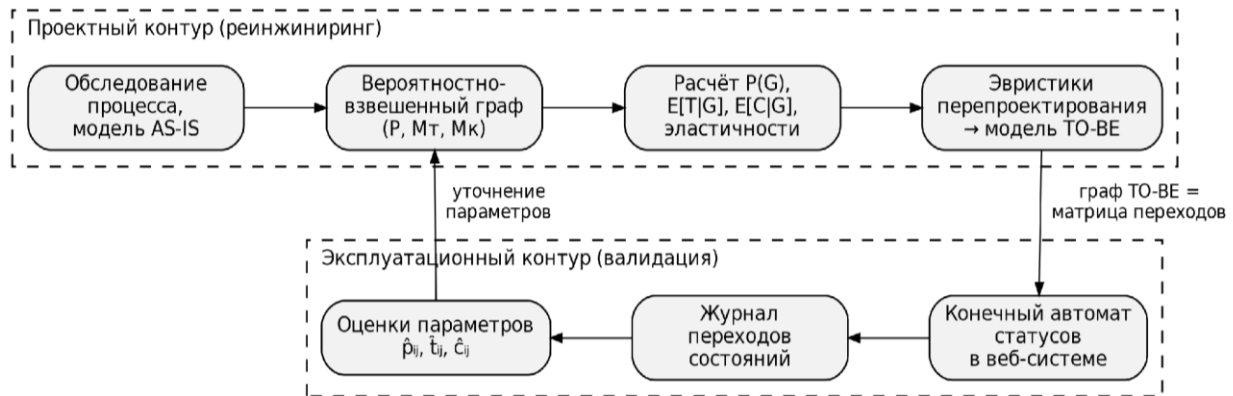


Рис. 1. Контуры методики количественной оценки реинжиниринга

ВЕРОЯТНОСТНО-ВЗВЕШЕННЫЙ ГРАФ ПРОЦЕССА КАК ПОГЛОЩАЮЩАЯ ЦЕПЬ МАРКОВА

Вариант процесса представляется ориентированным графом $\Gamma = (S, D)$, вершины которого соответствуют этапам (состояниям задачи), а дуги — допустимым переходам. Множество состояний разбивается на невозвратные S_T и поглощающие $S_A = \{G, L\}$, где L — нецелевое состояние «задача утрачена». Каждой дуге $(i, j) \in D$ сопоставляются вероятность перехода p_{ij} и два ресурсных веса: t_{ij} — календарное время пребывания в состоянии i перед переходом в j , ч, и c_{ij} — трудозатраты на координацию, сопровождающие переход, чел.-ч. Тройка матриц $\mathbf{P} = \|p_{ij}\|$, $\mathbf{M}^T = \|t_{ij}\|$, $\mathbf{M}^C = \|c_{ij}\|$ образует параметрическое описание варианта. В отличие от [Жар26], где используется одна матрица весов, два ресурсных измерения позволяют раздельно оценить эффект реинжиниринга для заказчика (время) и для организации (трудозатраты).

Если упорядочить состояния так, чтобы невозвратные предшествовали поглощающим, в матрице $\mathbf{P}$ выделяются подматрица $\mathbf{Q}$ переходов между невозвратными состояниями и подматрица $\mathbf{R}$ переходов из невозвратных состояний в поглощающие. Фундаментальная матрица цепи и матрица вероятностей поглощения определяются как

$$\mathbf{N} = (\mathbf{I} - \mathbf{Q})^{-1}, \quad \mathbf{B} = \mathbf{NR}, \quad (2)$$

где элемент n_{sk} равен ожидаемому числу посещений состояния k при старте из s [Кем70]. Обозначим через h_j вероятность достижения G из состояния j ($h_G = 1$, $h_L = 0$). Тогда $P_G = h_s$,

где s — начальное состояние, а условное математическое ожидание накопленного времени при достижении цели равно

$$E[T | G] = \frac{1}{h_s} \sum_{k \in S_T} n_{sk} \sum_{j \in S} p_{kj} t_{kj} h_j. \quad (3)$$

Выражение для $E[C | G]$ получается заменой t_{kj} на c_{kj} . Множитель h_j отбирает траектории, завершающиеся в G : без него оценка смешивала бы длительности успешных траекторий и траекторий, окончившихся утратой задачи. Коэффициент эффективности цикла определяется как доля времени базовых операций — однократного выполнения t_b и однократной проверки $t_{пр}$ — в ожидаемом времени выполнения заказа:

$$K_{\text{ц}} = \frac{t_b + t_{\text{пр}}}{E[T | G]}, \quad (4)$$

что является аналогом показателя эффективности цикла процесса (process cycle efficiency), характеризующего долю времени, добавляющего ценность [Geo02].

Выражение (3) применимо к графу произвольной структуры. Для процессов, составленных из типовых фрагментов, символьное обращение матрицы $\mathbf{I} - \mathbf{Q}$ фрагмента даёт замкнутые выражения. Для неформальной передачи с временем ожидания t , вероятностью повторного обращения e (сообщение не прочитано или неполно, требуется напоминание с задержкой r) и вероятностью утраты λ вероятность прохождения фрагмента π и условное ожидаемое время τ равны

$$\pi = \frac{1-e-\lambda}{1-e}, \quad \tau = t + \frac{er}{1-e}. \quad (5)$$

Для выполнения с возможными уточнениями требований (вероятность p_y , длительность t_y) и цикла «проверка — доработка» (вероятность возврата q , длительность доработки t_d)

$$\tau_b = t_b + \frac{p_y t_y}{1-p_y}, \quad \tau_{\text{пр}} = \frac{t_{\text{пр}} + q t_d}{1-q}. \quad (6)$$

Ожидаемое число возвратов на доработку равно $q/(1-q)$, и при $q \rightarrow 1$ время цикла проверки неограниченно возрастает. Численные расчёты по формуле (3) и по выражениям (5), (6) совпадают.

Графы вариантов AS-IS и TO-BE, построенные по диаграммам процессов, приведены на рис. 2 и 3. Для исходного варианта из (5), (6) следует

$$E[T | G]_{AS} = t_p + \sum_{k \in \{п1, с, п3\}} \tau_k + \tau_b + \tau_{\text{пр}} + \tau_{\text{и}}, \quad P_G = \prod_k \pi_k, \quad (7)$$

где индексы п1, с, п3 обозначают передачу руководителю отдела, согласование с техническим директором и постановку задачи разработчику; $\tau_{\text{и}} = t_{\text{и}} + e_{\text{и}} r_{\text{и}} / (1 - e_{\text{и}})$ — время информирования заказчика с учётом вероятности $e_{\text{и}}$ его пропуска и задержки $r_{\text{и}}$ до повторного обращения.

В перепроектированном варианте задача с момента регистрации существует как запись единой системы, поэтому дуги в состояние L отсутствуют и

$$E[T | G]_{TB} = t'_p + t_{\text{н}} + p_{\text{э}} t_{\text{э}} + \tau'_b + \tau'_{\text{пр}}, \quad P_G = 1, \quad (8)$$

где $t_{\text{н}}$ — время назначения исполнителя (предложение кандидата алгоритмом с учётом компетенций, текущей загрузки и приоритета задачи и подтверждение руководителем); $p_{\text{э}}$, $t_{\text{э}}$ — вероятность и длительность эскалации на ручное назначение при отсутствии кандидата с достаточным уровнем компетенций; штрихом отмечены значения параметров перепроектированного процесса.

КАЛИБРОВКА ПАРАМЕТРОВ ПО ДАННЫМ ОТКРЫТЫХ РЕПОЗИТОРИЕВ

Параметры модели разделены на две группы. Первую составляют длительности операций, сохраняющихся в любом варианте процесса, — выполнения задачи и проверки результата; они оцениваются по данным открытых репозиторий.

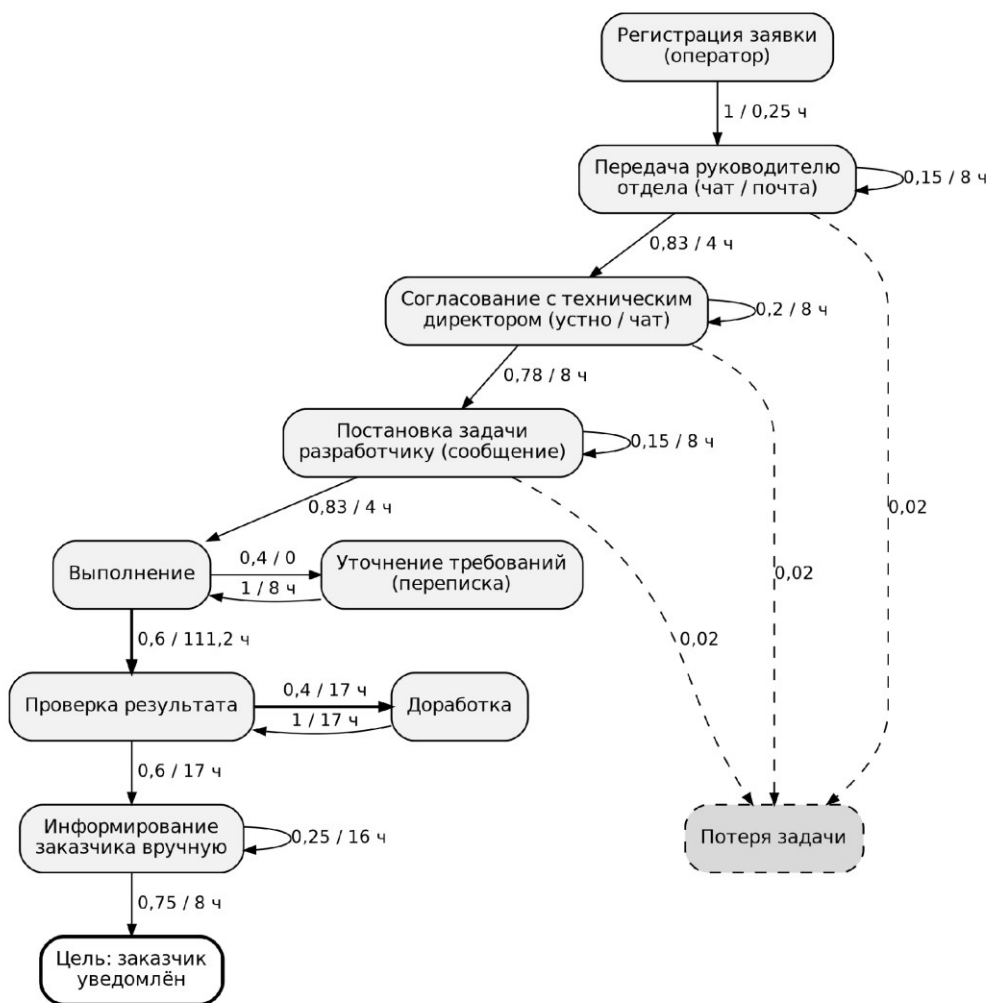


Рис. 2. Вероятностно-взвешенный граф процесса AS-IS
(подписи дуг: вероятность перехода / время)



Рис. 3. Вероятностно-взвешенный граф процесса ТО-ВЕ
(подписи дуг: вероятность перехода / время)

В проектах на платформе GitHub цикл «задача (issue) — запрос на изменение (pull request) — проверка — принятие» протоколируется с отметками времени [Gou14], а сам процесс обладает свойствами, которые в рассматриваемой организации появляются только после реинжиниринга: единым реестром задач, наблюдаемым статусом, обязательной проверкой и автоматическими уведомлениями. Поэтому открытые данные используются для калибровки модели ТО-ВЕ, а не AS-IS, что исключает перенос показателей формализованного процесса на неформальный.

Сопоставимость команд обеспечивалась критериями отбора: за период наблюдения не более 20 авторов принятых изменений, из них не менее пяти активных (три и более принятых изменения), доля изменений, созданных ботами, менее 50 %. Из пяти рассмотренных проектов с открытым исходным кодом критериям удовлетворили два, развиваемые штатными командами компаний, — NetBox¹ и sentry-python². Проекты wagtail и pydantic исключены из-за большого числа эпизодических участников (67 и 73 автора), mealie — из-за преобладания автоматических обновлений зависимостей (53 % изменений), что соответствует известным рискам анализа данных GitHub [Kal14]. Данные получены через поисковый интерфейс GitHub REST API³: для каждого репозитория выгружены 300 последних принятых запросов на изменение и 200 последних задач, закрытых как выполненные, в пределах периода с 01.07.2025 по 30.06.2026. Для запроса на изменение вычислялась длительность фазы проверки — от создания до слияния, для задачи — время выполнения заказа от создания до закрытия. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Эмпирические оценки длительностей по данным открытых репозиторийев

Показатель	NetBox	sentry-python	Сводная выборка
Фактический период слияния запросов	01.04–30.06.2026	29.04–30.06.2026	—
Принятых запросов на изменение (без ботов)	300	256	556
Авторов / активных авторов	18 / 6	17 / 5	—
Фаза проверки, ч: медиана (Q1–Q3)	13,0 (1,6–52,9)	16,9 (1,6–43,8)	16,4 (1,6–47,9)
Фаза проверки, ч: усечённое среднее (10 %)	25,6	25,4	25,5
Закрытых задач	200	200	400
Время выполнения заказа, ч: медиана (Q1–Q3)	92,0 (20,5–283,0)	21,4 (5,2–312,1)	48,5 (6,0–285,0)
Время выполнения заказа, ч: усечённое среднее (10 %)	137,3	163,6	140,5

Распределения длительностей имеют выраженную правостороннюю асимметрию: медианы в 1,5–3 раза меньше усечённых средних, а межквартильный размах охватывает более порядка величины. Поскольку модель оперирует математическими ожиданиями, а выборки содержат выбросы (запросы и задачи, остававшиеся открытыми месяцами), в качестве оценок приняты усечённые средние сводной выборки: $\bar{D} = 25,5$ ч для фазы проверки и $\bar{T} = 140,5$ ч для времени выполнения заказа. Фаза проверки в модели ТО-ВЕ соответствует циклу (6), поэтому из условия $\tau'_{\text{пр}} = \bar{D}$ при $q' = 0,2$ и допущении $t_{\text{д}} = t_{\text{пр}}$ следует

$$t_{\text{пр}} = \bar{D} \frac{1-q'}{1+q'} = 17,0 \text{ ч.} \quad (9)$$

¹NetBox: The premier source of truth powering network automation. URL: <https://github.com/netbox-community/netbox> (дата обращения: 16.09.2026).

²Sentry SDK for Python. URL: <https://github.com/getsentry/sentry-python> (дата обращения: 16.09.2026).

³GitHub REST API: Search. URL: <https://docs.github.com/en/rest/search/search> (дата обращения: 16.09.2026).

Длительность выполнения $t_b = 111,2$ ч найдена из условия $E[T | G]_{TB} = \bar{T}$ при значениях остальных параметров, приведённых в табл. 2. Тем самым модель ТО-ВЕ воспроизводит уровень времени выполнения заказа, наблюдаемый в формализованном процессе, а различия вариантов определяются параметрами второй группы.

Вторую группу образуют параметры неформальных этапов: ожидания и повторные обращения при передачах, вероятности утраты задачи, уточнений и возвратов, а также трудозатраты на координацию. При отсутствии журнала событий они заданы априорно (табл. 2), исследуются на чувствительность и подлежат уточнению в эксплуатационном контуре. Длительность выполнения принята одинаковой в обоих вариантах, т. е. возможное увеличение ожидания в очереди из-за неравномерной загрузки исполнителей при субъективном распределении задач не учитывается; это делает оценку эффекта реинжиниринга консервативной.

Таблица 2

Параметры моделей процессов AS-IS и ТО-ВЕ

Параметр	Обозначение	AS-IS	ТО-ВЕ	Источник
Регистрация задачи, ч	t_p	0,25	0,5	априорно
Ожидание при передаче руководителю отдела / при постановке задачи, ч	$t_{п1}, t_{п3}$	4	—	априорно
Ожидание согласования с техническим директором, ч	t_c	8	—	априорно
Вероятность повторного обращения при передаче	$e_{п1}, e_c, e_{п3}$	0,15; 0,20; 0,15	—	априорно
Задержка до напоминания, ч	r	8	—	априорно
Вероятность утраты задачи при передаче	λ	0,02	—	априорно
Назначение исполнителя, ч	t_n	—	2	априорно
Вероятность эскалации / ручное назначение, ч	p_3 / t_3	—	0,10 / 8	априорно
Выполнение задачи, ч	t_b	111,2	111,2	калибровка по $\bar{T}$
Вероятность уточнения / длительность уточнения, ч	p_y / t_y	0,40 / 8	0,15 / 3	априорно
Проверка результата, ч	$t_{пр}$	17,0	17,0	калибровка (9)
Вероятность возврата на доработку	q	0,40	0,20	априорно
Доработка, ч	t_d	17,0	17,0	допущение
Информирование заказчика: ожидание, ч / вероятность пропуска / задержка, ч	$t_n / e_n / r_n$	8 / 0,25 / 16	—	априорно
Координация при передаче / согласовании / напоминании, чел.-ч	$c_n / c_c / c_r$	0,25 / 0,50 / 0,25	—	априорно
Координация при регистрации (с критериями приёмки в ТО-ВЕ), чел.-ч	c_p	0,10	0,25	априорно
Выяснение статуса за цикл выполнения, чел.-ч	$c_{ст}$	0,50	0	априорно
Координация при уточнении / доработке, чел.-ч	c_y / c_d	0,50 / 0,25	0,10 / 0,10	априорно
Координация при информировании / при пропуске, чел.-ч	$c_n / c_{ри}$	0,25 / 0,50	—	априорно
Координация при назначении / эскалации, чел.-ч	c_n / c_3	—	0,10 / 0,50	априорно

ПЕРЕПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА И СЦЕНАРНЫЙ АНАЛИЗ

Переход от исходного процесса к перепроектированному выполнен с применением эвристик перепроектирования бизнес-процессов [Rei05]: интеграции и сокращения числа контактов (единый реестр задач как канал всех передач), формализации входа этапа (фиксация критериев приёмки при регистрации задачи), автоматизации решения (предложение исполнителя алгоритмом при сохранении подтверждения руководителем) и устранения ручных операций (автоматическое уведомление участников при смене состояния и доступ к статусу задачи без обращения к исполнителю). Для оценки вклада каждой эвристики варианты упорядочены по мере накопления изменений:

- S_0 — исходный процесс (см. рис. 2);
- S_1 — задача регистрируется в системе (0,5 ч; 0,10 чел.-ч), передачи выполняются системными уведомлениями (ожидание 1 ч; 0,05 чел.-ч), повторные обращения и утрата задачи исключены, согласование с техническим директором сохраняется;
- S_2 — дополнительно при регистрации фиксируются критерии приёмки, уточнения ведутся в карточке задачи, а вероятности уточнения и возврата, длительность уточнения и связанные трудозатраты принимают значения ТО-ВЕ;
- S_3 — дополнительно согласование и постановка задачи заменяются автоматизированным назначением исполнителя с эскалацией;
- S_4 — дополнительно исключаются ручное информирование заказчика и выяснение статуса задачи (вариант ТО-ВЕ, см. рис. 3).

Таблица 3

Показатели вариантов процесса

Вариант	P_G	$E[T G], \text{ч}$	Изменение $E[T G], \%$	$E[C G], \text{чел.-ч}$	K_d
S_0 — исходный (AS-IS)	0,930	190,6	—	2,67	0,67
S_1 — единый реестр	1,000	180,0	-5,5	2,12	0,71
S_2 — критерии приёмки	1,000	161,0	-15,5	1,81	0,80
S_3 — автоназначение	1,000	153,8	-19,3	1,36	0,83
S_4 — ТО-ВЕ	1,000	140,5	-26,3	0,44	0,91

Результаты расчёта приведены в табл. 3, декомпозиция ожидаемого времени выполнения заказа по группам этапов — на рис. 4. Перепроектированный вариант сокращает $E[T | G]$ на 50,1 ч (26,3 %), трудозатраты на координацию — в 6,0 раза и повышает коэффициент эффективности цикла с 0,67 до 0,91. Вклады эвристик неравноценны: наибольшее сокращение времени даёт формализация критериев приёмки (19,0 ч, переход $S_1 \rightarrow S_2$), затем автоматическое информирование (13,3 ч), перевод передач в систему (10,6 ч) и автоматизированное назначение (7,2 ч). По трудозатратам на координацию порядок иной: наибольший эффект дают автоматическое информирование и прозрачность статусов (0,92 чел.-ч на задачу), затем перевод передач в систему (0,55 чел.-ч) и автоматизированное назначение (0,45 чел.-ч). Утрата задач (7,0 % в исходном варианте) устраняется уже на шаге S_1 . Различие порядков по двум ресурсным измерениям подтверждает целесообразность их отдельного учёта.

Показательно сравнение с локальным улучшением. Если в исходном процессе полностью устранить уточнения и возвраты ($p_y = q = 0$), сохранив его структуру, то $E[T | G] = 162,6$ ч, что больше, чем у варианта S_2 (161,0 ч), где вероятность возврата остаётся равной 0,2. Дополнительное исключение повторных обращений при передачах даёт 152,4 ч, что по-прежнему на 8,5 % превышает показатель варианта S_4 . Даже идеальное качество выполнения отдельных

этапов не компенсирует потерь, заложенных в структуре процесса; этот результат количественно подтверждает исходный тезис реинжиниринга о том, что эффект достигается исключением этапов, а не их ускорением [Ham90].

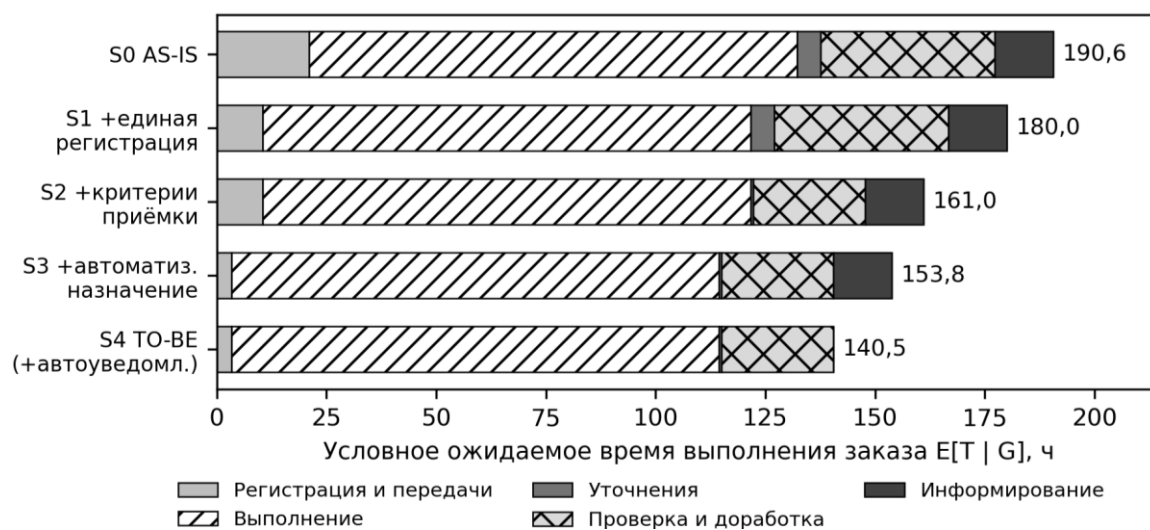


Рис. 4. Декомпозиция условного ожидаемого времени выполнения заказа по вариантам процесса

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ВЫЯВЛЕНИЕ УЗКИХ МЕСТ

Наибольшая неопределённость априорных оценок связана с вероятностью возврата на доработку, поэтому она выбрана в качестве исследуемого параметра при фиксированных значениях остальных (табл. 4, рис. 5) — аналогично параметрическому анализу критического элемента процесса в [Жап26].

Таблица 4

Зависимость показателей от вероятности возврата на доработку

q	Ожидаемое число доработок	$E[T G]$ AS-IS, ч	K_n AS-IS	$E[T G]$ TO-BE, ч	K_n TO-BE
0,1	0,11	171,7	0,75	135,8	0,94
0,2	0,25	176,4	0,73	140,5	0,91
0,3	0,43	182,5	0,70	146,6	0,87
0,4	0,67	190,6	0,67	154,7	0,83
0,5	1,00	201,9	0,63	166,0	0,77
0,6	1,50	218,9	0,59	183,0	0,70
0,7	2,33	247,2	0,52	211,3	0,61
0,8	4,00	303,8	0,42	267,9	0,48
0,9	9,00	473,7	0,27	437,8	0,29

Зависимость $E[T | G]$ от q гиперболическая, что следует из (6): при $q \geq 0,7$ приращение вероятности возврата на 0,1 увеличивает время выполнения заказа исходного процесса сильнее, чем все его потери на передачах, уточнениях и информировании вместе взятые (39,7 ч). При одинаковых значениях q разность показателей вариантов постоянна и составляет 35,9 ч — это вклад структурных изменений, не зависящий от качества постановки задач. Порог q^* ,

при котором перепроектированный процесс утрачивает преимущество над исходным в базовом состоянии, определяется из условия $E[T | G]_{\text{ТВ}}(q^*) = E[T | G]_{\text{АС}}$ и составляет $q^* \approx 0,63$. Следовательно, вывод о предпочтительности варианта ТО-ВЕ устойчив: даже если фиксация критериев приёмки не снизит долю возвратов ($q' = q = 0,4$), время выполнения заказа сократится на 18,8 %.

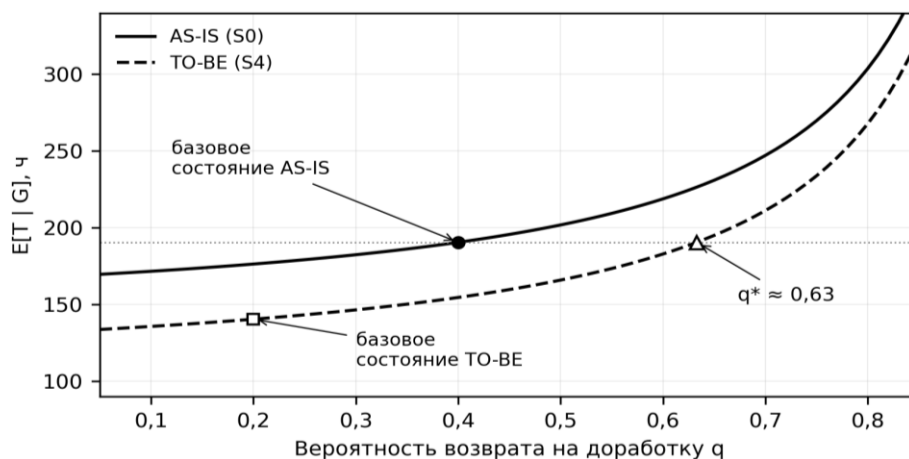


Рис. 5. Зависимость условного ожидаемого времени выполнения заказа от вероятности возврата на доработку

Для ранжирования этапов по влиянию на результат вычислены эластичности

$$\varepsilon_x = \frac{\partial E[T | G]}{\partial x} \cdot \frac{x}{E[T | G]}, \quad (10)$$

где x — параметр этапа. Эластичность показывает, на сколько процентов изменится время выполнения заказа при изменении параметра на 1 %. Производные вычислялись численно центральными разностями; для параметров цикла проверки они согласуются с аналитическим выражением $\partial \tau_{\text{пр}} / \partial q = (t_{\text{пр}} + t_{\text{д}}) / (1 - q)^2$, следующим из (6).

Эластичность времени выполнения заказа проиллюстрирована на рис. 6.

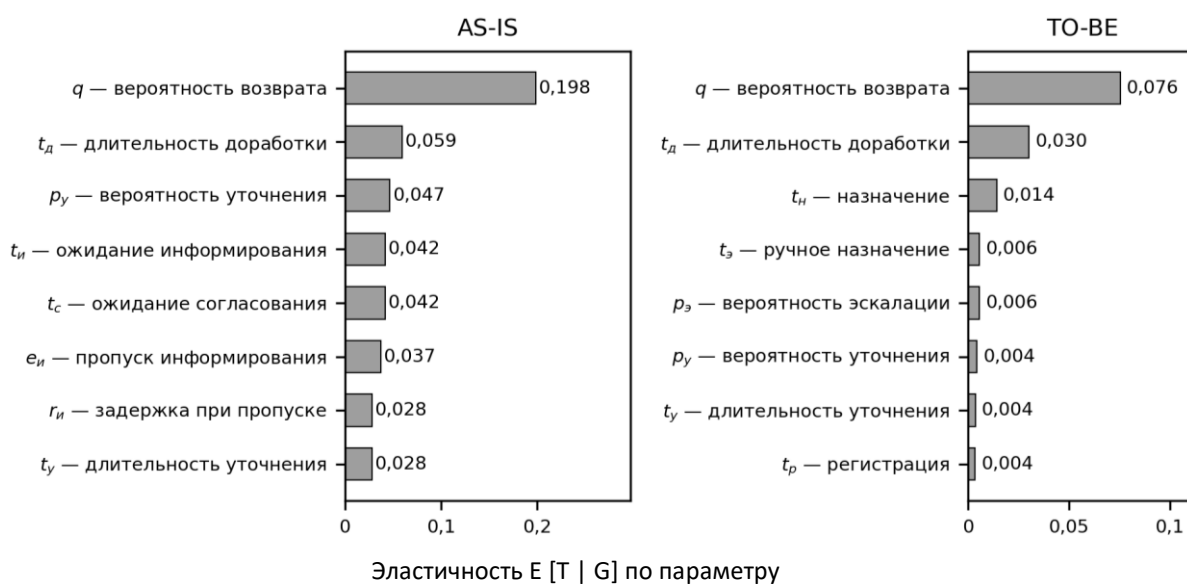


Рис. 6. Эластичность условного ожидаемого времени выполнения заказа по параметрам потерь

Среди параметров потерь исходного процесса (см. рис. 6) наибольшую эластичность имеет вероятность возврата (0,198), далее следуют длительность доработки (0,059), вероятность уточнения требований (0,047), ожидание информирования и ожидание согласования (по 0,042). Суммарные эластичности групп параметров составляют: цикл «проверка — доработка» — 0,258, неформальные передачи — 0,140, информирование — 0,107, уточнения — 0,075. Таким образом, узким местом исходного процесса является цикл возвратов, обусловленный отсутствием зафиксированных критериев приёма, а вторым по значимости — цепочка неформальных передач. В перепроектированном процессе эластичности по параметрам потерь снижаются (для q — до 0,076), тогда как эластичность по длительности выполнения t_b возрастает с 0,58 до 0,79. Это означает, что резерв сокращения времени за счёт организации процесса в значительной мере исчерпан и узкое место смещается в собственно выполнение задач, где дальнейший эффект требует иных средств — декомпозиции задач и ограничения объёма незавершённой работы [And10].

ЗАМЫКАНИЕ КОНТУРА: ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ПО ЖУРНАЛУ ВЕБ-СИСТЕМЫ

Априорный характер параметров второй группы — основное ограничение проектного контура. Для его преодоления граф ТО-ВЕ реализован в веб-системе управления задачами (Python, Flask, PostgreSQL) в виде конечного автомата статусов. Множество допустимых переходов автомата задано декларативной таблицей с указанием ролей, имеющих право на переход, и совпадает с множеством дуг графа $\Gamma_{ТВ}$. Каждая смена статуса, рассматриваемая как событие, изменяющее ситуацию управления задачами [Кан26], фиксируется в журнале с указанием задачи, исходного и нового статусов, автора и момента перехода. Совпадение структуры автомата и графа модели означает, что журнал содержит полные траектории цепи, и параметры могут быть оценены непосредственно по нему [Aal16]:

$$\hat{p}_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_k n_{ik}}, \quad \hat{t}_{ij} = \frac{1}{n_{ij}} \sum_{m=1}^{n_{ij}} \theta_m, \quad (11)$$

где n_{ij} — число наблюдавшихся переходов из i в j ; θ_m — длительность пребывания в состоянии i перед m -м таким переходом. Оценка $\hat{p}_{ij}$ является оценкой максимального правдоподобия вероятности перехода однородной цепи Маркова; оценки $\hat{t}_{ij}$ строятся аналогично по данным учёта трудозатрат. Запрос к журналу, реализующий (11) с использованием оконных функций, приведён в листинге.

Листинг

Оценка параметров графа по журналу переходов (PostgreSQL)

```
WITH seq AS (
  SELECT task_id, to_status AS state, changed_at AS t_in,
         LEAD(to_status) OVER w AS next_state,
         LEAD(changed_at) OVER w AS t_out
  FROM task_status_history
  WINDOW w AS (PARTITION BY task_id ORDER BY changed_at))
SELECT state, next_state,
       COUNT(*)::float / SUM(COUNT(*)) OVER (PARTITION BY state) AS p_hat,
       AVG(EXTRACT(EPOCH FROM t_out - t_in)) / 3600 AS t_hat_hours
FROM seq WHERE next_state IS NOT NULL
GROUP BY state, next_state;
```

Длительность периода наблюдения, достаточного для уточнения параметров, определяется требуемой точностью. Для оценки вероятности возврата с полушириной доверительного интервала δ при доверительной вероятности, соответствующей квантилю z нормального распределения, необходимо число выходов из состояния «На проверке»

$$n \geq \frac{z^2 q(1-q)}{\delta^2}. \quad (12)$$

При $q = 0,2$, $\delta = 0,05$ и $z = 1,96$ получаем $n \geq 246$. С учётом того, что задача в среднем проходит проверку $1/(1 - q) = 1,25$ раза, требуется около 197 завершённых задач; при потоке 20 задач в неделю это соответствует примерно десяти неделям опытной эксплуатации.

Журнал позволяет также проверить допущения модели. Если, например, доля возвратов при повторной проверке существенно отличается от доли при первой, состояние «На проверке» разделяется на два и структура графа уточняется, что соответствует обратной связи валидационного контура по структуре модели [Жар26].

ОБСУЖДЕНИЕ И ОГРАНИЧЕНИЯ

Полученные оценки следует интерпретировать с учётом принятых допущений. Во-первых, для вычисления математических ожиданий по формуле (3) достаточно независимости вероятностей переходов от предыстории и конечности средних длительностей пребывания в состояниях; вид распределений длительностей при этом не существен (модель допускает полумарковскую интерпретацию). Однако для оценки квантилей времени выполнения заказа, важных при согласовании сроков с заказчиком, требуется имитационное моделирование. Во-вторых, данные открытых проектов отличаются от данных коммерческой разработки асинхронностью и распределённостью участников; это частично компенсировано отбором проектов со штатными командами. Длительности проверки и доработки по данным платформы отдельно не идентифицируются, что потребовало допущения $t_d = t_{пр}$. В-третьих, абсолютная величина эффекта зависит от априорных параметров неформальных этапов; ранжирование эвристик и вывод о предпочтительности варианта ТО-ВЕ, как показал анализ чувствительности, к ним устойчивы, а уточнение абсолютных значений обеспечивается эксплуатационным контуром. Наконец, отмена задач по решению заказчика возможна в обоих вариантах одинаково и в модели не рассматривалась.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена методика количественной оценки вариантов реинжиниринга процесса управления задачами разработки программного обеспечения, объединяющая структурное моделирование процесса, аппарат поглощающих цепей Маркова и данные о фактическом исполнении формализованных процессов. Получены следующие основные результаты.

1. Вариант процесса представлен вероятностно-взвешенным графом с двумя матрицами ресурсных весов — календарного времени и трудозатрат на координацию. Получены выражения для вероятности доведения задачи до результата, условного ожидаемого времени выполнения заказа, трудозатрат и коэффициента эффективности цикла, а также замкнутые выражения для типовых фрагментов: неформальной передачи, выполнения с уточнениями и цикла «проверка–доработка».

2. Предложен способ калибровки модели перепроектированного процесса по данным открытых репозиторий, развиваемых командами сопоставимого масштаба, с разделением параметров на наблюдаемые и априорные.

3. Сценарный анализ показал, что перепроектированный процесс сокращает ожидаемое время выполнения заказа на 26,3 %, трудозатраты на координацию — в 6 раз и исключает утрату задач. Установлено, что устранение возвратов и уточнений без изменения структуры процесса не обеспечивает сопоставимого результата, а преимущество перепроектированного варианта сохраняется при вероятности возврата до 0,63.

4. Анализ эластичностей выявил узкое место исходного процесса — цикл возвратов на доработку — и показал смещение узкого места в операцию выполнения задачи после реинжиниринга.

5. Предложен замкнутый контур уточнения модели, в котором конечный автомат статусов веб-системы структурно совпадает с графом модели, а журнал переходов служит источником оценок параметров; определён объём наблюдений, необходимый для их уточнения.

Дальнейшие исследования предполагается направить на оценку влияния алгоритма распределения задач с учётом компетенций и загрузки исполнителей на вероятность возврата и длительность выполнения, а также на уточнение параметров модели по данным опытной эксплуатации системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- [Aal16] van der Aalst W. M. P. Process Mining: Data Science in Action. 2nd ed. Berlin; Heidelberg: Springer, 2016. 467 p. DOI: 10.1007/978-3-662-49851-4. DOI: [10.1007/978-3-662-49851-4](https://doi.org/10.1007/978-3-662-49851-4). EDN: [ULBQLE](#).
- [And10] Anderson D. J. Kanban: Successful Evolutionary Change for Your Technology Business. Sequim: Blue Hole Press, 2010. 262 p.
- [Bac13] Bacchelli A., Bird C. Expectations, outcomes, and challenges of modern code review // Proc. 35th Int. Conf. on Software Engineering (ICSE). San Francisco, 2013. P. 712–721. DOI: [10.1109/ICSE.2013.6606617](https://doi.org/10.1109/ICSE.2013.6606617).
- [Dav93] Davenport T. H. Process Innovation: Reengineering Work through Information Technology. Boston: Harvard Business School Press, 1993. 337 p.
- [Dum18] Dumas M., La Rosa M., Mendling J., Reijers H. A. Fundamentals of Business Process Management. 2nd ed. Berlin: Springer, 2018. 527 p. DOI: [10.1007/978-3-662-56509-4](https://doi.org/10.1007/978-3-662-56509-4). EDN: [VFXQHL](#).
- [Geo02] George M. L. Lean Six Sigma: Combining Six Sigma Quality with Lean Production Speed. New York: McGraw-Hill, 2002. 300 p.
- [Gou14] Gousios G., Pinzger M., van Deursen A. An exploratory study of the pull-based software development model // Proc. 36th Int. Conf. on Software Engineering (ICSE). Hyderabad, 2014. P. 345–355. DOI: [10.1145/2568225.2568260](https://doi.org/10.1145/2568225.2568260).
- [Ham90] Hammer M. Reengineering work: don't automate, obliterate // Harvard Business Review. 1990. Vol. 68, No. 4. P. 104–112. EDN: [BIAPWD](#).
- [Kal14] Kalliamvakou E., Gousios G., Blincoe K., Singer L., German D. M., Damian D. The promises and perils of mining GitHub // Proc. 11th Working Conf. on Mining Software Repositories (MSR). Hyderabad, 2014. P. 92–101. DOI: [10.1145/2597073.2597074](https://doi.org/10.1145/2597073.2597074).
- [Rei05] Reijers H. A., Liman Mansar S. Best practices in business process redesign: an overview and qualitative evaluation of successful redesign heuristics // Omega. 2005. Vol. 33, No. 4. P. 283–306. DOI: [10.1016/j.omega.2004.04.012](https://doi.org/10.1016/j.omega.2004.04.012).
- [Rig13] Rigby P. C., Bird C. Convergent contemporary software peer review practices // Proc. 9th Joint Meeting on Foundations of Software Engineering (ESEC/FSE). Saint Petersburg, 2013. P. 202–212. DOI: [10.1145/2491411.2491444](https://doi.org/10.1145/2491411.2491444).
- [Жар26] Жаркова О. А., Насыров Р. В. Анализ инвариантных последовательностей процессов на основе вероятностно-взвешенных графов и символьных вычислений // СИИТ. 2026. Т. 8, № 3(27). С. 33–44. DOI: [10.54708/SIIT-2026-no3-p33](https://doi.org/10.54708/SIIT-2026-no3-p33). EDN: [XBVQLP](#). [Zharkova O. A., Nasyrov R. V. Analysis of invariant process sequences based on probabilistically weighted graphs and symbolic computations // SIIT. 2026. Vol. 8, No. 3(27). P. 33–44. (In Russian). DOI: [10.54708/SIIT-2026-no3-p33](https://doi.org/10.54708/SIIT-2026-no3-p33). EDN: [XBVQLP](#).]
- [Кан26] Канаев М. М., Ирзаев Г. Х., Эседова Г. С. Модель построения гибридной интеллектуальной системы управления автономным транспортным средством в условиях непредсказуемой обстановки // СИИТ. 2026. Т. 8, № 2(26). С. 20–28. DOI: [10.54708/SIIT-2026-no2-p20](https://doi.org/10.54708/SIIT-2026-no2-p20). EDN: [MNLHJC](#). [Kanaev M. M., Irzaev G. Kh., Esedova G. S. A model for constructing a hybrid intelligent control system for an autonomous vehicle in an unpredictable environment // SIIT. 2026. Vol. 8, No. 2(26). P. 20–28. (In Russian). DOI: [10.54708/SIIT-2026-no2-p20](https://doi.org/10.54708/SIIT-2026-no2-p20). EDN: [MNLHJC](#).]
- [Кем70] Kemeny J. G., Snell J. L. Finite Markov Chains. Princeton: Van Nostrand, 1960. 210 p.
- [Моис26] Моисеева Т. В. Применение субъектно-ориентированного подхода при построении онтологии учебной дисциплины // СИИТ. 2026. Т. 8, № 3(27). С. 3–14. DOI: [10.54708/SIIT-2026-no3-p3](https://doi.org/10.54708/SIIT-2026-no3-p3). EDN: [CUOQSB](#). [Moiseeva T. V. A subject-oriented approach to constructing an academic discipline ontology // SIIT. 2026. Vol. 8, No. 3(27). P. 3–14. (In Russian). DOI: [10.54708/SIIT-2026-no3-p3](https://doi.org/10.54708/SIIT-2026-no3-p3). EDN: [CUOQSB](#).]
- [Нас21] Насыров Р. В. Оценка эффективности процессов разработки программного обеспечения на основе вероятностных причинно-следственных моделей // 3-я Междунар. конф. по системам управления, математическому моделированию, автоматизации и энергоэффективности (SUMMA). 2021. EDN: [YLGXBL](#). [Nasyrov R. V. Evaluating the effectiveness of software development processes based on probabilistic causal models // 3rd Int. Conf. on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). 2021. EDN: [YLGXBL](#).]
- [Pen13] Репин В. В., Елиферов В. Г. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2013. 544 с. [Repin V. V., Eliferov V. G. Process Approach to Management. Business Process Modeling. Moscow: Mann, Ivanov i Ferber, 2013. 544 p. (In Russian).]
- [Хам11] Хаммер М., Чампи Дж. Реинжиниринг корпорации: манифест революции в бизнесе. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2011. 288 с. [Hammer M., Champy J. Reengineering the Corporation: A Manifesto for Business Revolution. Moscow: Mann, Ivanov i Ferber, 2011. 288 p. (In Russian).]

ОБ АВТОРАХ | ABOUT THE AUTHORS

ШАМСЕЕВ Айдар Ирекович

Уфимский университет науки и технологий, Россия.

e-mail. ORCID: 0000-0000-0000-0000.

Магистрант каф. автоматизированных систем управления (напр. «Прикладная информатика», программа «Реинжиниринг бизнес-процессов»). Готовит дисс. в обл. реинжиниринга бизнес-процессов и моделирования разработки ПО.

СУЛЕЙМАНОВА Алла Маратовна

Уфимский университет науки и технологий, Россия.

sulejmanova.am@ugatu.su

Доц. каф. автоматизированных систем управления. Инж.-системотехник (Уфимск. авиац. ин-т), канд. техн. наук (Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т). Иссл. в обл. систем принятия решений.

SHAMSEEV Aidar Irekovich

Ufa University of Science and Technology, Russia.

e-mail. ORCID: 0000-0000-0000-0000.

Master's student, Dept. of Automated Control Systems (Applied Informatics, "Business Process Reengineering" program). Research in business process reengineering and software development process modeling.

SULEYMANOVA Alla Maratovna

Ufa University of Science and Technology, Russia.

sulejmanova.am@ugatu.su

Assoc. Prof., Automated Control Systems Dept. Systems Engineer (Ufa Aviat. Inst.). Cand. Techn. Sci. (Ufa State Aviat. Tech. Univ.). Research in the field of decision-making systems.

МЕТАДАННЫЕ | METADATA

Заглавие: Количественная оценка вариантов реинжиниринга процесса управления задачами разработки программного обеспечения на основе поглощающих цепей Маркова.

Авторы: Шамсеев А. И., Сулейманова А. М.

Аннотация: Рассматривается задача количественного обоснования проектных решений при реинжиниринге межфункционального процесса управления задачами разработки программного обеспечения в небольшой ИТ-организации, где постановка, передача и приёмка задач выполняются по неформальным каналам. Модели процесса «как есть» и «как должно быть» предложено представлять вероятностно-взвешенными графами, интерпретируемыми как поглощающие цепи Маркова с двумя матрицами ресурсных весов — календарного времени и трудозатрат на координацию. С использованием фундаментальной матрицы цепи получены аналитические выражения для вероятности доведения задачи до результата, условного ожидаемого времени выполнения заказа, трудозатрат на координацию и коэффициента эффективности цикла, а также эластичности времени выполнения по параметрам этапов. Длительности базовых операций откалиброваны по данным 556 запросов на изменение и 400 задач двух открытых репозиториях, развиваемых командами сопоставимого масштаба. Анализ сценариев поэтапного применения эвристик перепроектирования показал сокращение ожидаемого времени выполнения заказа с 190,6 до 140,5 ч (на 26,3 %), трудозатрат на координацию — с 2,67 до 0,44 чел.-ч на задачу и устранение потерь задач, составлявших 7 %. Показано, что полное устранение возвратов и уточнений без изменения структуры процесса не обеспечивает показателей перепроектированного варианта, а его преимущество сохраняется при вероятности возврата на доработку до 0,63. Предложен замкнутый контур уточнения модели, в котором множество допустимых переходов конечного автомата статусов веб-системы совпадает с множеством дуг графа, а журнал переходов служит источником оценок параметров.

Ключевые слова: реинжиниринг бизнес-процессов; управление задачами; разработка программного обеспечения; поглощающая цепь Маркова; вероятностно-взвешенный граф; анализ чувствительности; открытые репозитории; конечный автомат.

Язык: Русский.

Title: Quantitative evaluation of software development task management process reengineering alternatives based on absorbing Markov chains.

Authors: Shamseev A. I., Suleymanova A. M.

Abstract: The paper addresses the quantitative justification of design decisions in the reengineering of a cross-functional software development task management process in a small IT organization where tasks are assigned, handed over and accepted through informal channels. The AS-IS and TO-BE process models are represented as probability-weighted graphs interpreted as absorbing Markov chains with two resource weight matrices: calendar time and coordination effort. Using the fundamental matrix of the chain, analytical expressions are derived for the probability of task completion, the conditional expected lead time, coordination effort and cycle efficiency ratio, as well as for the elasticity of lead time with respect to stage parameters. Durations of core operations are calibrated on 556 pull requests and 400 issues from two open-source repositories maintained by teams of comparable size. Scenario analysis of the stepwise application of redesign heuristics shows a reduction of expected lead time from 190.6 to 140.5 hours (by 26.3 %), a reduction of coordination effort from 2.67 to 0.44 person-hours per task, and elimination of task losses that amounted to 7 %. It is shown that complete elimination of rework and clarifications without changing the process structure does not achieve the performance of the redesigned process, and that the advantage of the latter persists for rework probabilities up to 0.63. A closed loop of model refinement is proposed in which the set of permitted transitions of the web system's status state machine coincides with the arc set of the graph, and the transition log serves as the source of parameter estimates.

Key words: business process reengineering; task management; software development; absorbing Markov chain; probability-weighted graph; sensitivity analysis; open-source repositories; finite state machine.

Language: Russian.