

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 004.94(07)

Интегрированная платформа анализа и исполнения блочно-структурированных бизнес-процессов

Васильев Н.В., Яшин А.И., Довжиков С.Н.

Аннотация. Актуальность: Современные системы управления предприятием базируются на основе процессно-ориентированного подхода. Подавляющее их большинство используют язык описания BPMN2. Однако поддержка этого языка в системах управления предприятием обладает ограниченными возможностями по переносу описания по причине неполной поддержки стандарта. Для создания и поддержания BPMN2 моделей процессов в актуальном состоянии аналитик использует целый набор вспомогательных инструментов имитационного моделирования и проверки логической корректности. Получившая в последние годы распространение методология глубинного анализа процессов (Process Mining), использует свой набор инструментов, поддержка бизнес-процессов в которых неполна. Как следствие использование целого набора инструментов и необходимость преобразования форматов при переносе описания существенно замедляет внедрение и актуализацию бизнес-процессов в системах управления предприятием. **Целью исследования** является выработка концептуально-методологического базиса, позволяющего на базе общей методологии Process Mining технологически интегрировать все этапы жизненного цикла бизнес-процесса (реконструкция, анализ качества, анализ временных и стоимостных параметров). **Методы:** теория сетей Петри, дискретная математика, математическая логика, теория алгоритмов. **Результаты:** описана схема интегрированного анализа бизнес-процессов. Предложена и реализована модель динамики деревьев, которая является основой для реализации машины исполнения бизнес-процессов. На основе модели динамики предложен алгоритм построения графа достижимости маркировок дерева процессов. Модифицированы алгоритмы оценки соответствия и точности для их применения с деревьями процессов. В рамках методологии аналитической оценки параметров производительности блочных бизнес-процессов получена формула оценки времени завершения циклического блока с несколькими вариантами доработки. Произведено экспериментальное исследование эффективности разработанного решения путём натурного моделирования схемы интегрированного анализа и предложенных методов и его сравнение с промышленными инструментами по критериям точности и соответствия реконструкции. Полученные экспериментальные результаты позволяют говорить о соизмеримых с известными инструментами характеристиках. Это позволяет уменьшить необходимость использования внешних инструментов, повышая оперативность внесения изменений. **Практическая значимость:** приведённые в работе идеи прошли апробацию в ряде опытных конструкторских работ. Описанные в работе результаты могут служить основой для создания более эффективных систем управления предприятием.

Ключевые слова: деревья процессов; верификация; машины исполнения бизнес-процессов; сети Петри; производительность бизнес-процессов.

Введение

Современная методология выявления бизнес-процессов [1, 2] базируется на формализации нормативных документов и опросе сотрудников на рабочих местах. Для определения ключевых параметров производительности, полученное описание подвергается имитационному моделированию и верификации. После нескольких циклов оптимизации и уточнения бизнес-процесс внедряется. Дополнительной сложностью является неполная поддержка языка BPMN2 в инструментах, а также сложности переноса описаний между инструментами оптимизации, моделирования и исполнения. Таким образом, аналитик на различных этапах вынужден создавать отдельные версии одной и той же модели.

Привлечение методологии процессной аналитики (Process Mining) позволяет сократить время создания моделей бизнес-процессов [3, 4]. Этот подход базируется на идее, что на предприятии устанавливается система с минимально необходимым набором базовых процессов. Пользователи выполняют в системе привычные действия в ручном режиме. На основе этих действий формируются журналы информационных систем, обработка которых специализированными алгоритмами [3] позволяет принять рациональное решение об организации бизнес-процесса. Но и здесь наблюдается многообразие моделей, специфичных для различных алгоритмов. Как результат необходимо выполнять значительное количество ручных операций по их преобразованию.

Ключ к решению описанных трудностей [5, 6] – использования единого формата моделирования на этапах анализа и исполнения бизнес-процессов. Наиболее интересно в этом случае применение высокоуровневого блочно-структурированного подхода к описанию на основе деревьев процессов [7]. За счёт простоты и корректности на уровне синтаксиса, данный подход может служить единым формализмом, связывающим основные этапы жизненного цикла бизнес-процессов.

В работе рассматриваются некоторые прикладные и теоретические вопросы, которые методологически обеспечивают основу комплексного подхода к описанию, анализу и выполнению бизнес-процессов. Описывается модифицированная авторами схема интегрированного анализа и выполнения бизнес-процессов. Для формализации выполнения дерева процессов предлагается модифицированная модель контроля выполнения (динамики). Представлены модифицированные авторами алгоритмы оценки соответствия и точности реконструированного по средствам алгоритма индуктивного анализа дерева. В следующих разделах описывается методология прогнозирования времени выполнения процесса, полученная авторами. В конце работы приведены результаты натурного моделирования и сравнение результатов реконструкции с существующими инструментами *Process Mining* (*pt4py*) на основе метрик точности и соответствия.

1 Общая схема интегрированного анализа процессов

Для восстановления высокоуровневых схем процессов используется журнал выполнения элементарных (базовых) процессов, развернутых в информационной системе. Например, в системах электронного документооборота базовыми действиями будут создание поручения, регистрация документа, визирование цифровой подписью, просмотр документа. Общая схема комплексного анализа представлена на рис. 1. По мере того, как журнал выполнения элементарных действий, появляется возможность исследовать логику их связи в процессе выполнения. Как только развернутый бизнес-процесс перестает соответствовать потребностям организации, пользователи возвращаются к основным действиям, и процесс восстановления повторяется. В корпоративных информационных системах каждый тип объектов (вид документа, запись справочника и пр.) характеризуется своим набором специфичных бизнес-процессов. Поэтому возможно разбиение общесистемного журнала по типам объектов (далее назовём его объектом-селектором).

Каждый объект-селектор характеризуется жизненным циклом, который описывает его поведение от момента создания до уничтожения. Жизненный цикл может быть описан в форме графа, в котором вершинами являются стадии, а рёбрами – переходы между стадиями. Восстанавливаемая посредством алгоритма индуктивного анализа схема бизнес-процесса отражает все стадии жизненного цикла объекта-селектора от создания до уничтожения. Последующее разделение единой схемы на подпроцессы ложится на аналитика.

Точность и соответствие модели (п. 4) процесса также удобнее оценивать сразу для всего дерева поведения объекта-селектора. Указанные характеристики позволяют осуществлять непрерывный мониторинг периодически формируемого журнала и эксплуатируемой совокупности бизнес-процессов.

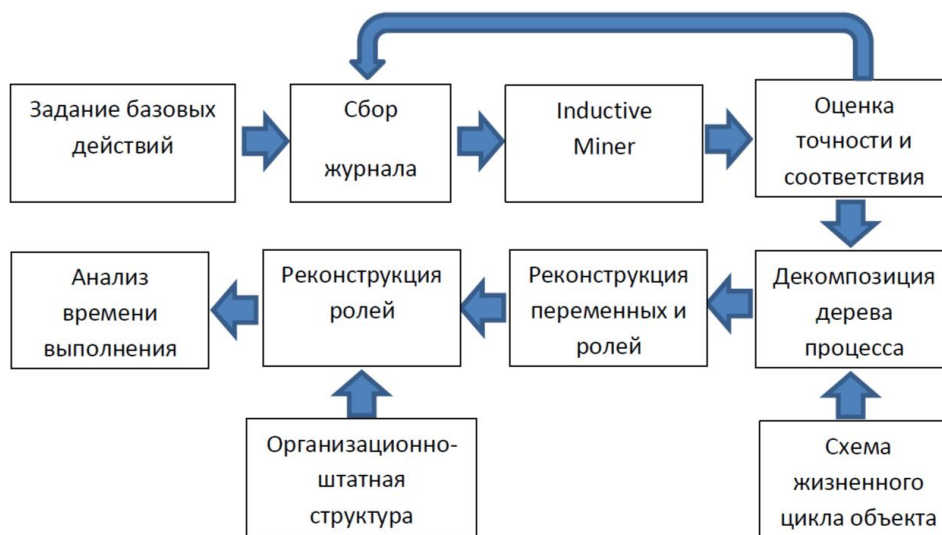


Рис. 1. Схема интегрированного анализа процессов

Оценка временных характеристик созданных процессов (п. 5) выполняется на последнем этапе, так как не влияет на процесс реконструкции и имеет значение при оптимизации логики и прогнозировании сроков завершения экземпляров бизнес-процессов.

Для заполнения журнала в реализованной авторами машине исполнения [7] выделяется специальный вид базовых бизнес-процессов. Реконструкция модели процесса была осуществлена названным выше алгоритмом индуктивного анализа [8-10]. В п. 2 описывается модель динамики деревьев процессов, используемая в п. 3 для модификации алгоритмов структурной оценки качества реконструкции. Приведённый в следующем разделе формализм также используется в п. 5 при декомпозиции модели процесса для оценки времени выполнения.

2 Динамика деревьев процессов

Логической основой для *BPMN* является подкласс сетей Петри, носящих название *WF*-сетей [1, 2]. Как и в случае сетей Петри, *BPMN* не страхует от возможных ошибок: тупиков, активных блокировок и мёртвых переходов.

Проблема логических ошибок разрешается при блочно-структурированном задании бизнес-процесса в виде дерева. Данный подход [8-10], позволяет создавать гарантированно корректный (бездефектный) процесс. Однако применение этого подхода в машинах исполнения, а также на этапе оценки адекватности исполняемого бизнес-процесса требует разработки специфичной модели динамики, – выработать правила срабатывания дерева процессов, а также модифицировать основные понятия и методы анализа, сформулированные для сетей Петри [11]. Модель деревьев процессов включает присутствующие в *BPMN* параллельный (\wedge) и условный (\times) операторы композиции, а также вводит циклический ($@$) и последовательный (\rightarrow) операторы. Листовыми узлами дерева являются выполняемые действия.

Заметим, что исходя из теоремы о бездефектности блочно-структурированных процессов [1, 2], между родительским и дочерним узлом всегда будет передаваться только один маркер. То есть любой узел как формальное представление блока получает от родительского узла единственный маркер. После выполнения собственных дочерних узлов, маркер передаётся обратно в родительский узел. Перемещение маркера по поддеревьям в зависимости от типа узла показано на рис. 2.

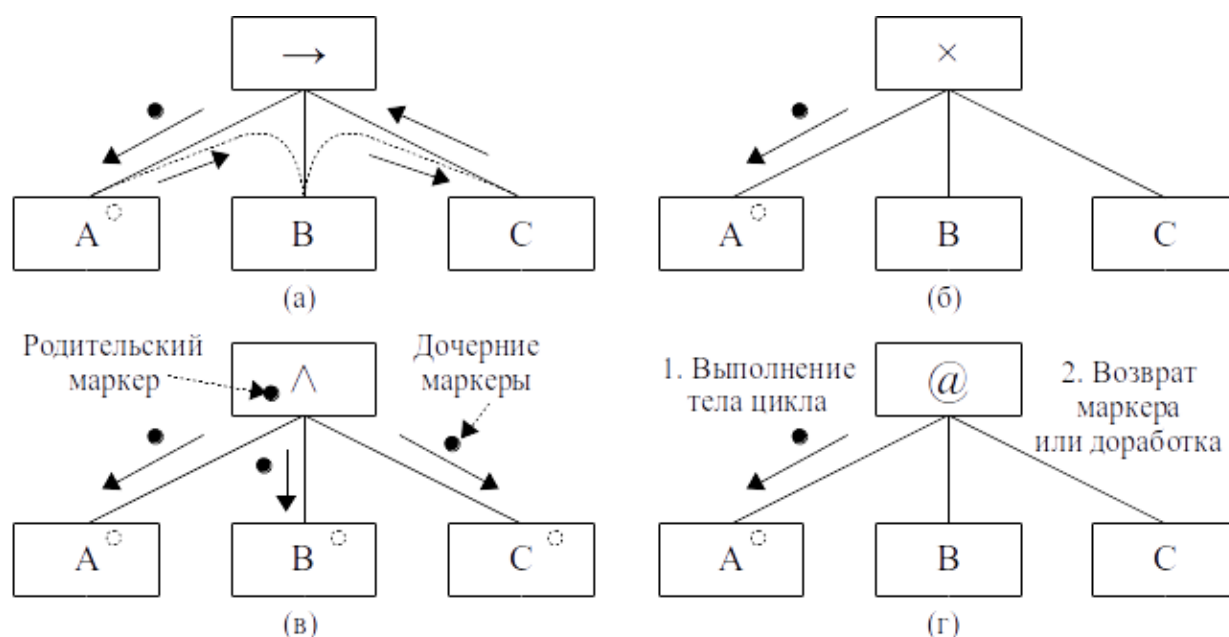


Рис. 2. Обход маркерами поддеревьев последовательного (\rightarrow), условного (\times), параллельного (\wedge) и циклического ($@$) узлов

В случае последовательного узла (\rightarrow) маркер поочерёдно обходит поддеревья – слева направо.

В условном узле (\times) на основе заданного в узле предиката, маркер передаётся в единственное дочернее поддерево.

При входе маркера в узел параллельного выполнения (\wedge) порождаются дочерние маркеры, каждый из которых передаётся в соответствующее поддерево. Родительский маркер ожидает момента возврата маркеров от дочерних поддеревьев. После получения маркеров от всех дочерних поддеревьев происходит их уничтожение, а родительский маркер передаётся узлу-предку.

Узел циклического выполнения ($@$) содержит тело цикла A и возможные варианты доработки конечного результата. При обходе единственный маркер передаётся в первое по порядку поддерево. После его завершения поведение, фактически, аналогично исключаящему узлу с поддеревьями вариантов доработки. В случае доработки маркер передаётся в соответствующее поддерево. По его возвращению, маркер снова передаётся в первое поддерево. Если доработка не требуется, то маркер возвращается родителю.

В процессе функционирования маркеры могут «останавливаться» только в листовых узлах, соответствующих действиям пользователя или автоматически выполняемой процедуре. Таким образом состояние процесса можно описать расположением маркеров в листовых узлах. Будем обозначать листовые узлы дерева как p_1, p_2, \dots, p_n .

Маркировкой дерева назовём вектор вида (p_1, p_2, \dots, p_n) . Элемент p_i этого вектора указывает на присутствие маркера в узле (0 или 1). В листовом узле может находиться только один маркер по причине бездефектности процесса, описываемого деревом. Иными словами, маркировка дерева – функция $M(p)$, сопоставляющая каждому листовому узлу дерева p признак нахождения в нем маркера.

Маркированный узел может сработать, вызывая смену маркировки. Сработавший в маркировке M_1 листов узел порождает множество новых маркировок $\{M_i\}$ перемещая маркеры между листовыми узлами. В случае узлов последовательного (\rightarrow) и параллельного (\wedge) операторов множество $\{M_i\}$ будет состоять из единственной маркировки, в то время как при срабатывании условного (\times) и циклического ($@$) узлов число порождаемых маркировок

будет равно числу дочерних поддеревьев. Маркировки, входящие в множество $\{M_i\}$, назовём «сцепленными».

Обозначим этот факт как $M_1 \xrightarrow{a} \{M_i\}$. Будем считать, что маркеры между узлами перемещаются мгновенно и в один и тот же момент времени может сработать только один листовой узел.

Динамику дерева процессов удобно описать в форме известного из теории сетей Петри [1] графа достижимости маркировок, в котором вершинами являются маркировки, а ребрами – сработавшие действия листовых узлов. Пример дерева процессов и графа маркировок показан на рис. 3.

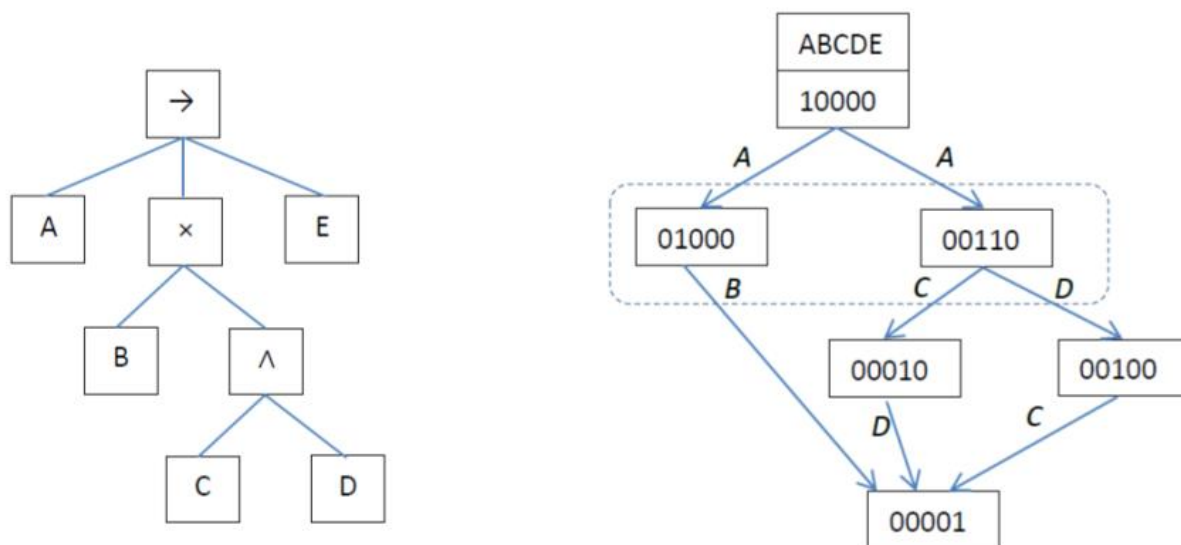


Рис. 3. Схема дерева процессов и его граф достижимости маркировок.
Пунктиром показано множество «сцепленных» маркировок

В разработанном прототипе для реконструкции схемы процесса был использован алгоритм *InductiveMiner* [8]. Далее работа будет посвящена оценке качества произведённой реконструкции применительно к деревьям процессов.

3 Схема вычисления соответствия и точности

Оценка реконструированной схемы бизнес-процесса может осуществляться различными способами [3]. Как правило, показатели (метрики) качества реконструкции показывают насколько соответствует поведение реконструированной модели исходному журналу событий. Наиболее методологически проработанными являются метрики соответствия [12, 13] и точности [14].

Высокий уровень метрики соответствия (*fitness*) обеспечивает возможность воспроизведения реконструированной моделью поведения в журнале событий.

Точность характеризует отсутствие избыточности реконструированной модели по отношению к журналу.

Для оценки соответствия был использован подход [12], модифицированный для деревьев процессов. Алгоритм базируется на вычислении оптимального выравнивания трасс журнала L и последовательности срабатываний листовых узлов модели процесса PT . Например:

PT	a	b	c	d	e	f
L	\wedge	b	d	e	f	\wedge

где \wedge – пропуск символа в модели PT или в трассе l журнала событий.

Обсуждение предложенного алгоритма вычисления оптимального выравнивания приведено в [21].

Метрика соответствия определяется как:

$$fitness(L, PT) = 1 - \frac{fcost(L, PT)}{move(L) + |L|move(PT)}, \quad (1)$$

где $fcost(L, PT)$ – минимальное суммарное редакционное расстояние между выравненной трассой журнала и последовательностью срабатываний модели PT ; $move(L)$ – суммарная длина трасс журнала событий; $move(PT)$ – длина наиболее короткой трассы модели процесса PT .

Метрика точности характеризует отсутствие избыточности модели процесса по отношению к журналу. Она может быть вычислена как [14, 15]:

$$precision(L, PT) = \frac{\sum_{s \in Q} \omega(s) |e_x(s)|}{\sum_{s \in Q} \omega(s) |a_v(s)|}, \quad (2)$$

где Q – множество префиксов трасс журнала; $\omega(s)$ – частота (счетчик) префикса s в журнале; $e_x(s)$ – множество действий, следующих за префиксом s трасс журнала; $a_v(s)$ – множество действий, непосредственно выполнимых из маркировки, в которую можно перевести модель выполнив последовательность s .

4 Оценка параметров производительности процесса

Помимо бездефектности, гарантируемой формализмом описания, точности и соответствия журналу, бизнес-процесс должен характеризоваться определёнными параметрами производительности [2]. Их наиболее точную оценку даёт вычислительно сложное и ресурсоемкое имитационное моделирование [16]. Однако такие параметры как среднее время выполнения процесса и средние суммарные затраты, могут быть вычислены аналитически [17-19].

Формально время выполнения CT бизнес-процесса может быть рекурсивно вычислено на основании времён исполнения поддеревьев T_i следующим образом:

Последовательное исполнение:

$$CT = \sum_{i=1}^n T_i. \quad (3)$$

Параллельное исполнение:

$$CT = \text{Max}(T_1, T_2, \dots, T_n). \quad (4)$$

Условный выбор между поддеревьями с вероятностями p_1, p_2, \dots, p_n :

$$CT = \sum_{i=1}^n p_i T_i. \quad (5)$$

В работе [21] приведен результат, который позволяет вычислить время выполнения циклического узла (Рис.4):

$$CT = \frac{T_0 + \sum_{i=1}^n T_i p_i}{p_0} + T_{n+1}. \quad (6)$$

Указанные соображения можно использовать для прогноза времени завершения с запущенным и частично исполненным процессом с текущим журналом выполнения L . Вычисление также производится рекурсивно от маркировки, соответствующей последней

записи журнала. Для узлов последовательного, параллельного и исключаящего поведения методика схожа с формулами (3), (4), (5). При вычислении времени доработки для циклов рассматривается два случая: если маркер в момент вычисления находится в теле цикла (количество входов в тело больше количества выходов), и если маркер находится в блоке доработки (количество входов равно количеству выходов).

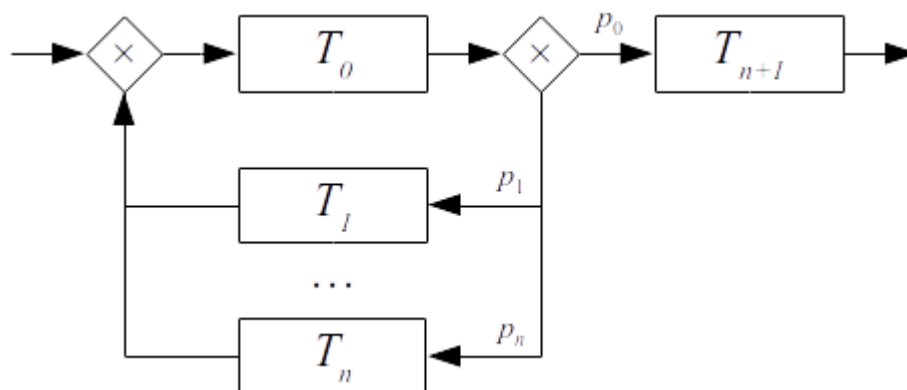


Рис. 4. Пример циклического процесса

Пусть n – количество входов в тело цикла,

$CT_r = \frac{\sum_{i=1}^n T_i p_i}{1 - p_0}$ – среднее время доработки. Результирующая формула для первого

случая:

$$CT = (CT_r + T_0) \left(1 + \frac{(1 - p_0)^n}{p_0} \right), \quad (8)$$

для случая, когда на момент вычисления маркер находится в теле доработки:

$$CT = (CT_r + T_0) \left(1 + \frac{(1 - p_0)^{n+1}}{p_0} \right). \quad (9)$$

5 Экспериментальные исследования

Описанные алгоритмы были реализованы в разработанной системе электронного документооборота совместно с машиной исполнения бизнес-процессов *Onengine*[7]. Согласно принятой методологии [19-21] эксперимент производился на основе журнала событий процесса, содержащего порядка 20 действий. В журнал вносились случайные пропуски действий (от 1 до 6). После чего производился расчёт предложенными в работе алгоритмами и эталонной реализацией на инструментари *pm4py* [22, 23]. В каждой из шести групп производилось от 20 (для 1 удаления) до 10000 (для 6 удалений) экспериментов. Результаты статистического анализа в виде дисперсии (Var) и математического ожидания (AVG) характеристик соответствия (Fit) и точности (Prec), вычисленных указанными инструментами представлены на рис. 5.

По метрике точности наблюдалось полное совпадение результатов (график в) по математическому ожиданию значения для всех 6 типов экспериментов при несколько меньшей дисперсии с сохранением формы закономерности (график а). Для метрики точности наблюдалось сохранение формы закономерности математического ожидания (график 4) при меньших значениях и иная форма дисперсии (график б). Такой результат можно объяснить

отсутствием, в отличие от метрики соответствия единого способа вычисления [24], что было подтверждено сравнительным изучением исходного кода *pm4py* и соответствующих плагинов *ProM*.

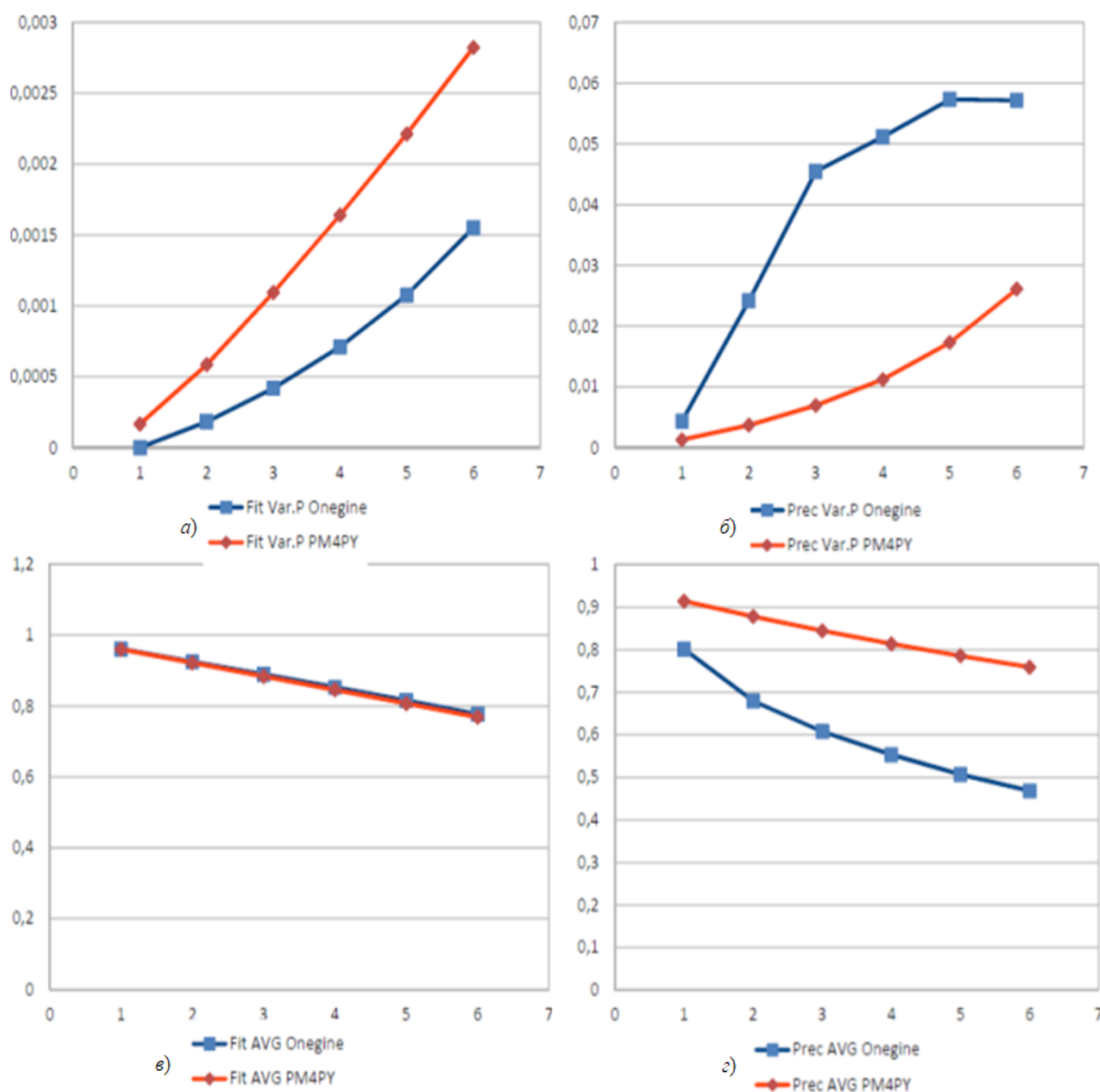


Рис. 5. Результаты сравнения дисперсии (а,б) и матожидания (в,г) соответствия и точности реконструкции процессов разработанным инструментарием *Onegine* и *pm4py*

Заключение

В представленном прикладном исследовании были получены следующие выводы и результаты:

– реализованная схема и предложенные алгоритмы позволяют интегрировать средства описания, анализа и исполнения бизнес-процессов. Рассмотренные алгоритмы вычисления базовых метрик точности и соответствия показывают соизмеримые с известными инструментами результаты;

– использование платформы *Onegine* позволяет минимизировать использование сложных средств проверки корректности описания и повысить (до 2-3 раз) скорость внесения изменений в действующие бизнес-процессы.

Литература

1. W. van der Aalst. *Process Mining: Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes*. Berlin: Springer-Verlag, 2011. 352 p.
2. Васильев Н.В., Яшин А.И. Введение в анализ процессов. Учебное пособие. СПб.: Издательство СПбГЭТУ, 2020. 96 с.
3. Васильев Н.В., Яшин А.И. Введение в структурный синтез процессов автоматизации управления (Process Mining). Учебное пособие. СПб.: Издательство СПбГЭТУ, 2021. 88 с.
4. Васильев Н.В., Забродин О.В., Куликов Д.В. Метод Process Mining в системе защищенного электронного документооборота / Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т.10. № 6. С. 38-50.
5. M. Gregor. The death of process mining? [Online]. Available: <https://www.bptrends.com/the-death-of-process-mining/>, 2019.
6. W. van der Aalst. *Process Mining: Bridging Not Only Data and Processes, but Also Industry and Academia* (Blog Post Celonis). www.celonis.com, 2019.
7. Vasiliev N. V., Dorogov A. Y., Yashin A. I. and Dovzhikov S. N., "Onegine: an Engine for the Description, Analysis and Execution of Block-structured Business Processes*", 2020 XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), St. Petersburg, Russia, 2020, pp. 165-168, doi: 10.1109/SCM50615.2020.9198819
8. S. Leemans, D. Fahland, and W. van der Aalst. Discovering block-structured process models from incomplete event logs. In *Application and Theory of Petri Nets and Concurrency*, G. Ciardo and E. Kindler, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2014, pp. 91–110.
9. W. van der Aalst, J. Carmona, T. Chatain, and B.F. van Dongen. A Tour in Process Mining: From Practice to Algorithmic Challenges. In M. Koutny, L. Pomello, and L.M. Kristensen, editors, *Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency (ToPNoC 14)*, vol. 11970 of *Lecture Notes in Computer Science*, p. 1-35. Springer-Verlag, Berlin, 2019.
10. A. Kalenkova, A. Burattin, M. de Leoni, W. van der Aalst, and A. Sperduti. Discovering High-Level BPMN Process Models From Event Data. *Business Process Management Journal*, 25(5): p. 995-1019, 2019.
11. W. van der Aalst. Everything You Always Wanted to Know About Petri Nets, but Were Afraid to Ask. In T.T. Hildebrandt, B.F. van Dongen, M. Röglinger, and J. Mendling, editors, *International Conference on Business Process Management (BPM 2019)*, volume 11675 of *Lecture Notes in Computer Science*, p. 3-9. Springer-Verlag, Berlin, 2019.
12. Adriansyah, Arya & Dongen, B.F. & Aalst, Wil. (2011). Conformance Checking Using Cost-Based Fitness Analysis. *The Journal of Physical Chemistry*. p.55-64. 10.1109/EDOC.2011.12.
13. Sander J.J. Leemans, Dirk Fahland, Wil M.P. van der Aalst. Scalable process discovery and conformance checking. *Software & Systems Modeling* 17(2): p. 599-631, 2018.
14. D. Schuster, S. van Zelst, and W. van der Aalst. Alignment Approximation for Process Trees. *Computing Research Repository (CoRR)* in arXiv, abs/2009.14094, 2020.
15. Augusto, R. Conforti, A. Armas-Cervantes, M. Dumas and M. La Rosa. Measuring Fitness and Precision of Automatically Discovered Process Models: A Principled and Scalable Approach. In *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, doi: 10.1109/TKDE.2020.3003258. 2021.
16. Bedilia Estrada-Torres, Manuel Camargo, Marlon Dumas, Luciano García-Bañuelos, Ibrahim Mahdy, Maksym Yerokhin, Discovering business process simulation models in the presence of multitasking and availability constraints, *Data & Knowledge Engineering*, vol. 134, 2021, 101897, ISSN 0169-023X, <https://doi.org/10.1016/j.datak.2021.101897>.
17. M. Dumas, M. Rosa, J. Mendling, and H. Reijers, *Fundamentals of Business Process Management* (2-ed.). Springer Publishing Company, Incorporated, 2018.
18. G. Schuh, A. Gutzlaff, S. Schmitz, and W. van der Aalst. Data-Based Description of Process Performance in End-to-End Order Processing. *CIRP Annals*, 69(1): p. 381-384, 2020.

19. C. Li, S. van Zelst, and W. van der Aalst. A Generic Approach for Process Performance Analysis using Bipartite Graph Matching. In C. Di Francescomarino, R. Dijkman, and U. Zdun, editors, Workshop on Business Process Intelligence (BPI 2019), BPM 2019 Workshop Proceedings, vol. 362 of Lecture Notes in Business Information Processing, p. 199-211. Springer-Verlag, Berlin, 2019.

20. A. Augusto et al. Automated Discovery of Process Models from Event Logs: Review and Benchmark. In IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol. 31, no. 4, pp. 686-705, 1 April 2019, doi: 10.1109/TKDE.2018.2841877.

21. N. Vasiliev, A. Yashin and S. Dovzhikov. Integration of Business Process Definition, Analysis and Execution Tools Based on Block-structured Approach. 2021 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/MECO52532.2021.9460283. 2021.

22. Berti, Alessandro & van Zelst, Sebastiaan. Process Mining for Python (PM4Py): Bridging the Gap Between Process- and Data Science. in IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol. 31, no. 4, pp. 686-705, 1 April 2019, doi: 10.1109/TKDE.2018.2841877. 2019.

23. A. Berti, S. van Zelst, and W. van der Aalst. PM4Py Web Services: Easy Development, Integration and Deployment of Process Mining Features in any Application Stack. In Proceedings of the BPM Demo Track at BPM 2019, vol. 2420 of CEUR Workshop Proceedings, p. 174-183. CEUR-WS.org, 2019.

24. A. Augusto et al. Automated Discovery of Process Models from Event Logs: Review and Benchmark. In IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol. 31, no. 4, pp. 686-705, 1 April 2019, doi: 10.1109/TKDE.2018.2841877.

References

1. W. van der Aalst. Process Mining: Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes. Berlin: Springer-Verlag, 2011. 352 p.

2. Vasiliev N.V., Yashin A.I. Introduction to process analysis. Tutorial. SPb.: Publishing house SPbETU, 2020. 96 p. (in Russian)

3. Vasiliev N.V., Yashin A.I. Introduction to the structural synthesis of control automation processes (Process Mining). Tutorial (In Russian). SPb.: Publishing house SPbETU, 2021. 88 p. (in Russian).

4. Vasiliev N.V., Zabrodin O.V., Kulikov D.V. Process mining method in a secure electronic document management system (in Russian) // Science-intensive technologies in space research of the Earth. 2018.T.10. No. 6, p.38-50 (in Russian).

5. M. Gregor. The death of process mining? [Online]. Available: <https://www.bptrends.com/the-death-of-process-mining/>, 2019.

6. W. van der Aalst. Process Mining: Bridging Not Only Data and Processes, but Also Industry and Academia (Blog Post Celonis). www.celonis.com, 2019.

7. Vasiliev N.V., Dorogov A.Y., Yashin A.I. and Dovzhikov S.N., "Onengine: an Engine for the Description, Analysis and Execution of Block-structured Business Processes*", 2020 XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), St. Petersburg, Russia, 2020, pp. 165-168, doi: 10.1109/SCM50615.2020.9198819

8. S. Leemans, D. Fahland, and W. van der Aalst. Discovering block-structured process models from incomplete event logs. In Application and Theory of Petri Nets and Concurrency, G. Ciardo and E. Kindler, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2014, pp. 91–110.

9. W. van der Aalst, J. Carmona, T. Chatain, and B.F. van Dongen. A Tour in Process Mining: From Practice to Algorithmic Challenges. In M. Koutny, L. Pomello, and L.M. Kristensen, editors, Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency (ToPNoC 14), vol. 11970 of Lecture Notes in Computer Science, p. 1-35. Springer-Verlag, Berlin, 2019.

10. A. Kalenkova, A. Burattin, M. de Leoni, W. van der Aalst, and A. Sperduti. Discovering High-Level BPMN Process Models From Event Data. Business Process Management Journal, 25(5): p. 995-1019, 2019.

11. W. van der Aalst. Everything You Always Wanted to Know About Petri Nets, but Were Afraid to Ask. In T.T. Hildebrandt, B.F. van Dongen, M. Röglinger, and J. Mendling, editors, International

Conference on Business Process Management (BPM 2019), volume 11675 of Lecture Notes in Computer Science, p. 3-9. Springer-Verlag, Berlin, 2019.

12. Adriansyah, Arya & Dongen, B.F. & Aalst, Wil. (2011). Conformance Checking Using Cost-Based Fitness Analysis. *The Journal of Physical Chemistry*. p.55-64. 10.1109/EDOC.2011.12.

13. Sander J.J. Leemans, Dirk Fahland, Wil M.P. van der Aalst. Scalable process discovery and conformance checking. *Software & Systems Modeling* 17(2): p. 599-631, 2018.

14. D. Schuster, S. van Zelst, and W. van der Aalst. Alignment Approximation for Process Trees. *Computing Research Repository (CoRR)* in arXiv, abs/2009.14094, 2020.

15. Augusto, R. Conforti, A. Armas-Cervantes, M. Dumas and M. La Rosa. Measuring Fitness and Precision of Automatically Discovered Process Models: A Principled and Scalable Approach. In *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, doi: 10.1109/TKDE.2020.3003258. 2021.

16. Bedilia Estrada-Torres, Manuel Camargo, Marlon Dumas, Luciano García-Bañuelos, Ibrahim Mahdy, Maksym Yerokhin, Discovering business process simulation models in the presence of multitasking and availability constraints, *Data & Knowledge Engineering*, vol. 134, 2021, 101897, ISSN 0169-023X, <https://doi.org/10.1016/j.datak.2021.101897>.

17. M. Dumas, M. Rosa, J. Mendling, and H. Reijers, *Fundamentals of Business Process Management* (2-ed.). Springer Publishing Company, Incorporated, 2018.

18. G. Schuh, A. Gutzlaff, S. Schmitz, and W. van der Aalst. Data-Based Description of Process Performance in End-to-End Order Processing. *CIRP Annals*, 69(1): p. 381-384, 2020.

19. C. Li, S. van Zelst, and W. van der Aalst. A Generic Approach for Process Performance Analysis using Bipartite Graph Matching. In C. Di Francescomarino, R. Dijkman, and U. Zdun, editors, *Workshop on Business Process Intelligence (BPI 2019)*, *BPM 2019 Workshop Proceedings*, vol. 362 of *Lecture Notes in Business Information Processing*, p. 199-211. Springer-Verlag, Berlin, 2019.

20. A. Augusto et al. Automated Discovery of Process Models from Event Logs: Review and Benchmark. In *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 31, no. 4, pp. 686-705, 1 April 2019, doi: 10.1109/TKDE.2018.2841877.

21. N. Vasiliev, A. Yashin and S. Dovzhikov. Integration of Business Process Definition, Analysis and Execution Tools Based on Block-structured Approach. 2021 10th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/MECO52532.2021.9460283. 2021.

22. Berti, Alessandro & van Zelst, Sebastiaan. Process Mining for Python (PM4Py): Bridging the Gap Between Process- and Data Science. in *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 31, no. 4, pp. 686-705, 1 April 2019, doi: 10.1109/TKDE.2018.2841877. 2019.

23. A. Berti, S. van Zelst, and W. van der Aalst. PM4Py Web Services: Easy Development, Integration and Deployment of Process Mining Features in any Application Stack. In *Proceedings of the BPM Demo Track at BPM 2019*, vol. 2420 of *CEUR Workshop Proceedings*, p. 174-183. CEUR-WS.org, 2019.

24. A. Augusto et al. Automated Discovery of Process Models from Event Logs: Review and Benchmark. In *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 31, no. 4, pp. 686-705, 1 April 2019, doi: 10.1109/TKDE.2018.2841877.

Статья поступила 28 сентября 2021 года

Информация об авторах

Васильев Николай Владимирович – К.т.н. Начальник сектора ПАО «Интелтех». E-mail: gandvik1984@gmail.com.

Яшин Александр Иванович – Д.т.н. Заместитель генерального конструктора ПАО «Интелтех». E-mail: a_yashin@inbox.ru.

Довжиков Сергей Николаевич – Инженер ПАО «Интелтех». E-mail: sergei.dovzhikov@gmail.com.

Адрес: 197342, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Кантемировская, д. 8. Тел. (812) 542-18-49.

Integration platform for execution, process mining and performance analysis of business processes

N.V. Vasiliev, A.I. Yashin, S.N. Dovzhikov

Annotation. Introduction: the core of modern enterprise management information systems are machines for the execution of business processes. The vast majority of them use the BPMN2 description language (for example, JBPM, Activiti, Camunda). Despite the adoption of the standard, the editors' support for BPMN is platform-oriented and has limited capabilities for transferring descriptions. To create and maintain BPMN descriptions up to date, a business analyst, in addition to editors, uses a whole set of auxiliary tools, including verification tools (for example, WoPeD) and performance analysis (Bizagi, BIMP). The attraction for identifying and updating business processes of the methodology of in-depth analysis of processes (ProcessMining), which uses its own set of tools (Disco, ProM), in which BPMN support is limited. As a result, the integration of analysis tools and tools for the execution of business processes remains insufficient, which significantly slows down the implementation and updating of enterprise management systems. **Purpose of the study:** based on the general log processing methodology used by Process Mining, show that a block-structured approach based on process trees can be a universal formalism at all stages (reconstruction, quality analysis, analysis of time and cost parameters). **Methods:** theory of Petri nets, discrete mathematics, mathematical logic, theory of algorithms. **Results:** the scheme of integrated analysis of business processes is described. A tree dynamics model is proposed and implemented, which is the basis for the implementation of a business process execution machine. On the basis of the dynamics model, an algorithm for constructing the reachability graph of process tree markings is proposed. Conformity and accuracy assessment algorithms have been modified for their application with process trees. Within the framework of the methodology for the analytical assessment of the performance parameters of block business processes, a formula for estimating the completion time of a cyclic block with several revision options is obtained. An experimental study of the effectiveness of the developed solution was carried out by means of full-scale modeling of the integrated analysis scheme and the proposed methods and its comparison with industrial instruments (pm4py) according to the criteria of accuracy and compliance of the reconstruction. The experimental results obtained make it possible to speak about characteristics comparable with the known instruments. This reduces the need for external tools, making changes faster. **Practical significance:** the ideas presented in the work were implemented in the Onengine virtual machine developed by the authors and tested in a number of experimental design works. The results described in the work can serve as a basis for creating more effective enterprise management systems.

Keywords: process trees; verification; business process execution machines; Petri nets; business process performance analysis.

Information about Authors

Nickolay V. Vasiliev – PhD. Head division of PJSC «Inteltech» department.
E-mail: gandvik1984@gmail.com.

Alexander I. Yashin – DrSc. Deputy general designer of PJSC «Inteltech».
E-mail: a_yashin@inbox.ru.

Sergey N. Dovzhikov – Engineer of PJSC «Inteltech». E-mail: sergei.dovzhikov@gmail.com.
Address: 197342, Russia, St. Petersburg, 8 Kantemirovskaya St. Tel. (812) 542-18-49.

Для цитирования: Васильев Н.В., Яшин А.И., Довжигов С.Н. Интегрированная платформа анализа и исполнения блочно-структурированных бизнес-процессов // Техника средств связи. 2021. № 3 (155). С. 79-90.

For citation: Vasiliev N.V., Yashin A.I., Dovzhikov S.N. Integration platform for execution, process mining and performance analysis of business processes. Means of communication equipment. 2021. No 3 (155). Pp. 79-90 (in Russian).