

УДК 004. 896

А.Н. Афанасьев, Н.Н. Войт, С.Ю. Кириллов

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОТОКОВ РАБОТ В ПРОМЫШЛЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ¹

Афанасьев Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, окончил радиотехнический факультет Ульяновского политехнического института. Первый проректор, проректор по Дистанционному и дополнительному образованию Ульяновского государственного технического университета. Автор более 250 статей в области САПР. Область научных интересов: автоматизированные системы обучения, организация вычислительных процессов и структур ЭВМ, проектирование интеллектуальных систем, САПР, управление сложными потоками работ, диаграмматика графических языков. [e-mail: a.afanasev@ulstu.ru].

Войт Николай Николаевич, кандидат технических наук, окончил факультет информационных систем и технологий УлГТУ. Доцент кафедры «Вычислительная техника» УлГТУ, заместитель директора по научно-исследовательской работе Института дистанционного и дополнительного образования УлГТУ. Имеет более 180 научных статей в области интеллектуальных САПР, Case-, Cals-технологий. Область научных интересов: интеллектуальные системы разработки сложных автоматизированных систем, автоматизированные среды обучения, графические языки и грамматики. [e-mail: n.voit@ulstu.ru].

Кириллов Сергей Юрьевич, окончил факультет информационных систем и технологий УлГТУ, аспирант кафедры «Вычислительная техника» УлГТУ, начальник научно-исследовательского отдела Института дистанционного и дополнительного образования УлГТУ. Имеет более 20 статей в области САПР. Область научных интересов: диаграмматика графических языков; методы и средства анализа и контроля потоков работ; разработка и внедрение программно-аппаратных платформ, способствующих поддержке, интенсификации и повышению вовлеченности обучающихся в образовательный процесс с помощью информационных технологий. [e-mail: kirillovsyu@gmail.com].

Аннотация

Фундаментальной научной проблемой теории управления бизнес-процессами являются повышение эффективности синтеза и обработки диаграмматических моделей потоков проектных работ автоматизированных систем с целью сокращения временных затрат на их разработку, повышение успешности обработки диаграмматических моделей потоков проектных работ, а именно выполнение требования к ресурсным ограничениям, функционалу, финансовой составляющей и срокам исполнения, а также повышение качества диаграмматических моделей в плане контроля ошибок, сужения семантического разрыва между анализом бизнес-процессов и их выполнением. В статье предложен подход к анализу диаграмматических моделей потоков работ на основе темпоральной автоматной грамматики с линейным временем анализа. Подход позволяет контролировать и анализировать структурно-семантические и темпоральные ошибки в моделях. Результаты исследования показывают, что подход имеет значительные преимущества по сравнению с аналогичными методами анализа. Эффективность данного аналитического подхода доказана на конкретных реальных и релевантных примерах.

Ключевые слова: потоки работ, бизнес-процесс, грамматика, визуальный язык.

AUTOMATION OF WORKFLOW DESIGN IN AN INDUSTRIAL ENTERPRISE

Aleksandr Nikolaevich Afanasev, Doctor of Science in Engineering, Professor; graduated from the Radioengineering Faculty at Ulyanovsk Polytechnic Institute; First Vice-Rector, Vice-Rector for Distance and Extended Education at Ulyanovsk State Technical University; an author of more than 250 articles in the field of CAD; interested in automated training systems, computational process and computer structure organization, intelligent system design, CAD, composite workflow control, graphic language diagrammatics. e-mail: a.afanasev@ulstu.ru.

¹ Исследование выполнено при поддержке РФФИ № 17-07-01417 и региональной поддержке РФФИ, грант № 18-47-730032.

Nikolai Nikolaevich Voit, Candidate of Science in Engineering; graduated from the Faculty of Information Systems and Technologies at Ulyanovsk State Technical University; Associate Professor at the Department of Computer Science of Ulyanovsk State Technical University, Deputy Director for Distance and Extended Education at Ulyanovsk State Technical University; an author of more than 180 articles in the field of intelligent CAD systems, CASE and CALS Technologies; interested in intelligent development systems of complex computer-aided systems, automated training systems, graphical languages and grammatics. e-mail: n.voit@ulstu.ru.

Segrei Iurevich Kirillov, graduated from the Faculty of Information Systems and Technologies at Ulyanovsk State Technical University; Postgraduate Student at the Department of Computer Science at Ulyanovsk State Technical University, Head of the Scientific Research Department of the Institute of Distance and Extended Education; an author of more than 20 articles in the field of CAD; interested in graphical languages diagrammatics, models and methods of workflow analysis and control, development and introduction of hardware and software of support, intensification and improvement of trainee involvement in educational process. e-mail: kirillovsyu@gmail.com.

Abstract

Increasing of the automated workflow synthesis systems efficiency is the fundamental scientific problem of the business process management theory. The problem includes such subtasks as processing in order to reduce the time spent on their development, increasing the success of processing diagram models, namely the implementation of the requirements for resource constraints, functionality, financial component and deadlines, as well as improving the diagram models quality in terms of error control, narrowing the semantic gap between business process analysis and execution.

In the article, an approach to the analysis of workflow diagram models on the basis of temporal automatic grammar with linear analysis time is proposed. The approach allows to control and analyze structural-semantic and temporal errors. The results of the research represent that the approach has significant advantages over similar methods of analysis. The effectiveness of this analytical approach is proved by concrete real and relevant examples.

Key words: workflows; business-process; grammar; visual language.

ВВЕДЕНИЕ

Успешность работы промышленных предприятий на рынке зависит от многих факторов: диапазона предлагаемых услуг, насыщенности рынка, маркетинговой политики и т. п. В целях поддержания конкурентоспособности современные, ориентированные на постоянное развитие промышленные предприятия вынуждены постоянно совершенствовать свою деятельность, что требует разработки новых технологий и приемов ведения бизнеса и внедрения более эффективных методов управления и организации деятельности. Вот почему в числе прочих мероприятий необходимо уметь выбирать и использовать методологии проектирования, моделирования и анализа (обработки) бизнес-процессов. Сегодня методологии и инструменты обработки бизнес-процессов являются одновременно и серьезным направлением научных исследований, и процветающим сектором рынка программного обеспечения. Спектр методов обработки, применяемых для описания бизнес-процессов, весьма широк: от простейших графических нотаций, используемых для построения блок-схем алгоритмов, и таких строгих математических аппаратов, как сети Петри, до объектно-ориентированных языков моделирования, подобных UML (Unified Modeling Language), и специально разработанных для описания бизнес-систем методологий, например XPDL (XML Process Definition Language) и BPEL (Business Process Execution Language).

Методы анализа применяются для исследования качественных и количественных характеристик потоков работ бизнес-процессов. Под качественными характеристиками понимается логико-алгебраическая корректность потоков работ, формализованная с помощью теории графов, сетей потоков работ, матриц паросочетаний, графических языков моделирования, в том числе UML, BPMN, IDEFO и eEPC и др., а также эволюционного подхода, логики высказываний и др. Количественные характеристики представляют эффективность исполнения потоков работ по параметрам, например, таким как среднее время обслуживания, коэффициент использования производственных мощностей (простой оборудования) и т. п. Оценка эффективности потоков работ выполняется с помощью имитационного моделирования (сети Петри), цепей Маркова и теории очередей (систем массового обслуживания). Применение временного автомата в проектировании, спецификации, контроле и анализе потоков работ при разработке сложных технических систем на промышленном предприятии является известной практикой [1]. Временные и гибридные автоматы используются для анализа и управления потоками работ [2] при разрешении проблем доступа к ресурсам, блокировки, ограничения живости (liveness reversibility, boundedness, reachability, dead transitions, deadlocks, home states). Примерами задач являются управление температурой атомного реактора, управление шлагбаумом на пересечении железнодорожных путей [3], в которых успешно применены временные

контекстно-свободные грамматики. Наличие большого числа взаимодействующих сложных автоматизированных систем ставит задачу формального контроля и анализа, что может быть выполнено различными методами. В настоящее время π -исчисление является перспективной, но еще очень молодой и развивающейся теорией, в ней много открытых вопросов и нерешенных проблем. Широко используемые сети Петри не имеют универсального фреймворка для моделирования и анализа потоков работ. Для того чтобы анализировать различные свойства (живость, достижимость, безопасность) потоков работ, они моделируются в разных типах сетей Петри. Достаточно широкое применение для анализа потоков работ при разработке безошибочных систем на этапе концептуального проектирования нашел метод *model checking*. Однако он предназначен для опытных ученых и инженеров, так как сложен в понимании и использовании [2]. Также потоки работ специфицируются менеджерами, которые не имеют подготовки в области формальных моделей и информатики, а для формального анализа необходимо детальное представление модели процесса на формальном языке, которое трудно построить и понять менеджерам.

Таким образом, актуальной и имеющей большое практическое значение является проблема исследования механизмов анализа и управления потоками работ. Авторами предложен такой математический аппарат, основанный на разработке темпоральной автоматной RVTI-грамматики. Работа сфокусирована на автоматизацию выявления качественных структурных, семантических и темпоральных ошибок потоков работ бизнес-процессов. Работа содержит введение, Related Work, the theoretical statements and Conclusion.

Анализ существующих работ

Теорией управления бизнес-процессами занимаются как в деловой практике, так и в науке. Существуют направления проектирования, анализа, моделирования, реализации и контроля бизнес-процессов [4]. В современной теории графических визуальных языков представления потоков работ бизнес-процессов используется логическая модель (поведенческая модель) [5, 6], содержащая графические объекты и связи между ними. Широкое промышленное применение на крупных предприятиях нашли следующие графические языки: UML [7], BPMN [8], AMBER [4], IDEF [9], eEPC [10], PERT [11]. В работе [4] описан язык AMBER, имеющий простую структуру данных (отсутствуют массивы, записи и классы), поэтому реализация комплексных структур бизнес-процессов в нем невозможна. Структурный подход, заложенный в методологии IDEF [9], получил развитие в языках UML, BPMN, eEPC и специализированном языке Лоцман Workflow АСКОН (российского разработчика систем управления потоками работ, фирма АСКОН [12]) в плане наследования объектно-ориентированной парадигмы и введения понятия «время» в диаграмматическую модель [2] потоков работ. Однако в наиболее рас-

пространственных инструментальных средствах создания и обработки диаграмматических моделей, таких как Microsoft Visio [13], Visual paradigm for UML [14], Aris Toolset [10], IBM Rational Software Architect (RSA) [15], Лоцман Workflow АСКОН, анализ диаграмматических моделей производится прямыми методами, требует нескольких «проходов» в зависимости от контролируемого типа ошибки. Кроме этого, отсутствуют анализ структурных особенностей комплексных диаграмматических моделей и операционный семантический анализ прикрепленных программных модулей диаграмматических моделей динамических потоков работ.

Перспективным подходом обработки диаграмматических потоков работ является синтаксически-ориентированный на основе формальных грамматик. Наиболее известными являются Веб-грамматика [16], позиционная грамматика [17], реляционная грамматика [18], многоуровневая графовая грамматика [19] и сохраняющая графовая грамматика [20]. Позиционные грамматики являются самыми простыми. Развиваясь на базе плекс-структур [19], они унаследовали их недостатки. Эти грамматики не предполагают использование областей соединения. Они не могут применяться для графических языков, элементы которых имеют динамически изменяемое количество входов/выходов, их невозможно применить для контроля синтаксиса графических языков, содержащих параллелизм. Достоинством реляционных грамматик является возможность обработки ошибок, но они не имеют механизма нейтрализации таких ошибок. Многоуровневая и сохраняющая графовые грамматики способны обеспечить анализ графических языков с «глубокой» контекстной зависимостью, которая необходима в языках, позволяющих указывать синхронизацию выполняемых действий. Примерами таких языков являются языки граф-схем технологических процессов и графических диаграмм последовательности сообщений (Message Sequence Charts). Общими недостатками [21–23] вышеописанных грамматик являются:

1. Увеличение числа продукций при построении грамматики для неструктурированных графических языков, т. е. при неизменном количестве примитивов графического языка происходит значительное увеличение количества продукций, поскольку необходимо определить все возможные варианты неструктурированности.

2. Сложность построения грамматики (увеличение сложности продукций и их числа), а для некоторых формализмов невозможность построения грамматики, для граф-схем с неструктурированным параллелизмом.

3. Большая временная сложность. Анализаторы, построенные на базе рассмотренных грамматик, предлагают полиномиальное или экспоненциальное время анализа диаграмм графических языков.

Основное ограничение вышеупомянутых методов заключается в том, что они не работают при наличии различных типов (темпоральные, многоуровневые и др.) диаграмм одновременно. Это означает, что в некоторых случаях входные диаграммы не могут быть проанализированы.

АНАЛИЗ ПОТОКОВ РАБОТ НА ПРИМЕРЕ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СОГЛАСОВАНИЯ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

В таблице 1 представлено математическое описание авторской RVTI-грамматики для графического языка BPMN, предложенной в работах [24–26].

В таблице 1 приняты следующие обозначения: n – количество исходящих связей; k – количество входящих связей; m – количество проанализированных входящих связей; t – номер текущего графического примитива из числа примитивов данного типа; b – номер графического примитива, от которого исходит «управляющий сигнал» (применяется только для связей); e – признак пустоты; ts_{\max} – максимальная временная характеристика выполнения операции; tc – текущая временная характеристика; $inc()$ – операция инкремента значения для текущего элемента; $comp()$ – операция, возвращающая большее значение между текущим значением и тем, что уже записано в ленте для текущего элемента. Для примера разберем следующую операцию: $W_1(1^{t(1)}, k^{t(2)}, t^{1m^{(n-1)}}) / W_3(e^{t(2)})$. При условии, что ленте № «2» значение для текущего элемента не уста-

новлено, производится запись цифры «1» в ленту № «1» для текущего элемента, общее количество входящих связей k в ленту № «2» для текущего элемента и номер элемента t в магазин № «1» в количестве $(n-1)$.

Символ «*» обозначает следующие операции:

$$* = W_2(e^{1m}) \dots \&\& W_3(m^{ai(7)} == n^{ai(8)}) \dots \&\& W_3(m^{ai(8)} > 1) \dots \&\& W_3(m^{ai(15)} < td) \dots,$$

где td – временная характеристика конечного срока. Операция вида $W_2(e^{1m})$ означает, что все магазины должны быть пусты (т. е. нет точек возврата). Операция $W_2(1^{ai(1)})$ – чтение единиц из всех ячеек ленты № 1 для проверки элементов с 1 фиксированной связью; операция $W_3(m^{ai(1)} == n^{ai(2)})$ – проверка соответствия количества проанализированных связей общему количеству входов соответствующего элемента; $W_3(m^{ai(8)} > 1)$ – проверка количества входящих связей, что их больше единицы; $W_3(m^{ai(15)} < td)$ – проверка выхода характеристик времени за определенный срок.

Автомат темпоральной автоматной RVTI-грамматики [27] визуального языка BPMN представлен в виде графа на рисунке 1.

Таблица 1

Грамматика для базового BPMN

Пред. состояние	Квазитерм	След. состояние	Операция над памятью
r0	A0	r1	$W_1(t^{1m^{(n-1)}})$
r1	rel	r2	Θ
r2	E	r1	$W_1(1^{t(1)}, 1^{t(4)}, (ts_{\max} + tc)^{t(15)}) / W_3(e^{t(1)})$
	Em	r1	$W_1(1^{t(2)}, 1^{t(5)}, (ts_{\max} + tc)^{t(15)}) / W_3(e^{t(5)})$
	Et	r1	$W_1(1^{t(3)}, 1^{t(6)}, (ts_{\max} + tc)^{t(15)}) / W_3(e^{t(6)})$
	Ak	r3	Θ
	A	r4	$W_1(1^{t(16)}, k^{t(17)}, t^{1m^n}, (ts_{\max} + tc)^{t(15)}) / W_3(e^{t(17)})$
	_A	r4	$W_1(inc(m^{t(16)}), comp(ts_{\max} + tc)^{t(15)}) / W_3(m^{t(16)} < n^{t(17)})$
	EG	r5	$W_1(1^{t(9)}, k^{t(10)}, t^{1m^n}, (ts_{\max} + tc)^{t(15)}) / W_3(e^{t(10)})$
	_EG	r5	$W_1(inc(m^{t(9)}), comp(ts_{\max} + tc)^{t(15)}) / W_3(m^{t(9)} < n^{t(10)})$
	EBG	r6	$W_1(1^{t(11)}, k^{t(12)}, t^{1m^n}, (ts_{\max} + tc)^{t(15)}) / W_3(e^{t(12)})$
	_EBG	r6	$W_1(inc(m^{t(11)}), comp(ts_{\max} + tc)^{t(15)}) / W_3(m^{t(11)} < n^{t(12)})$
	PG	r7	$W_1(1^{t(13)}, k^{t(14)}, t^{1m^n}, (ts_{\max} + tc)^{t(15)}) / W_3(e^{t(14)})$
	_PG	r7	$W_1(inc(m^{t(13)}), comp(ts_{\max} + tc)^{t(15)}) / W_3(m^{t(13)} < n^{t(14)})$
r3	labelA0	r2	$W_2(b^{1m}, tc^{t(15)})$
	labelA	r2	$W_2(b^{2m}, tc^{t(15)})$
	labelEG	r2	$W_2(b^{3m}, tc^{t(15)})$
	labelEBG	r8	$W_2(b^{4m}, tc^{t(15)})$
	labelPG	r2	$W_2(b^{5m}, tc^{t(15)}) / W_3(m^{t(13)} = n^{t(14)})$

Продолжение табл. 1

Пред. состояние	Квазитерм	След. состояние	Операция над памятью
	no_label	r9	*
r4	labelA0	r2	$W_2(b^{1m}, tc^{t(15)})$
	labelA	r2	$W_2(b^{2m}, tc^{t(15)})$
	labelEG	r2	$W_2(b^{3m}, tc^{t(15)})$
	labelEBG	r8	$W_2(b^{4m}, tc^{t(15)})$
	Et	r1	$W_1(1^{t(3)}, 1^{t(6)}, (ts_{\max} + tc)^{t(15)}) / W_3(e^{t(6)})$
r5	labelA0	r2	$W_2(b^{1m}, tc^{t(15)})$
	labelEG	r2	$W_2(b^{3m}, tc^{t(15)})$
	labelEBG	r8	$W_2(b^{4m}, tc^{t(15)})$
r6	labelA0	r2	$W_2(b^{1m}, tc^{t(15)})$
	labelEG	r2	$W_2(b^{3m}, tc^{t(15)})$
	labelEBG	r8	$W_2(b^{4m}, tc^{t(15)})$
	relEBG	r8	Θ
r7	labelA	r2	$W_2(b^{2m}, tc^{t(15)})$
	labelPG	r2	$W_2(b^{5m}, tc^{t(15)}) / W_3(m^{t(13)} = n^{t(14)})$
r8	Em	r1	$W_1(1^{t(2)}, 1^{t(5)}, (ts_{\max} + tc)^{t(15)}) / W_3(e^{t(5)})$
r9			

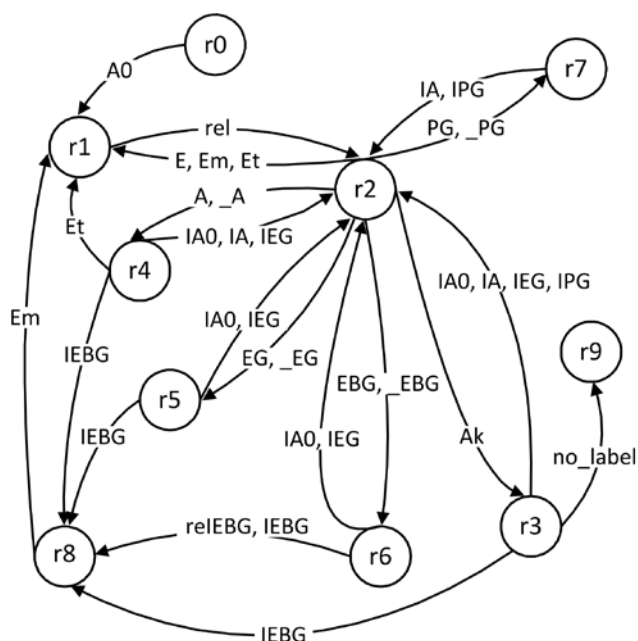


Рис. 1. Граф темпоральной автоматной RVTI-грамматики визуального языка BPMN

Апробацию разработанного математического аппарата из грамматики и методов решено выполнить на реальном бизнес-процессе крупного промышленного предприятия. Представлен процесс разработки конструкторской документации на рисунке 2. Стоит учесть, что в бизнес-процессе присутствуют циклы, поэтому в самой «печальной» ситуации он может стремиться к бесконечному выполнению. Точное значение можно получить только при запуске реального процесса. В ситуации, в которой для процесса установлен определенный срок завершения и анализ происходит статически, берется максимальная граница затрачиваемого времени. Если процесс не успевает завершиться при отсутствии доработок конструкторской документации (КД), то он точно не сможет завершиться в случае их наличия, поэтому подсчет ведется для первого варианта. Следовательно, необходимо заранее построить бизнес-процесс более оптимальным способом, уменьшить рамки на выполнение определенных задач или сдвинуть Deadline принудительно.

Для демонстрации возможностей грамматики в части контроля семантических ошибок корректный пример изменен на ошибочный с помощью переназначения конечной точки связи, исходящей из элемента EG_3 к A_1 на PG_1 . Данная модификация приведет к логической ошибке, называемой Deadlock. На данный момент в памяти хранится лишь один продолжитель и это связь, выходящая из элемента PG_1 . Однако извлечение

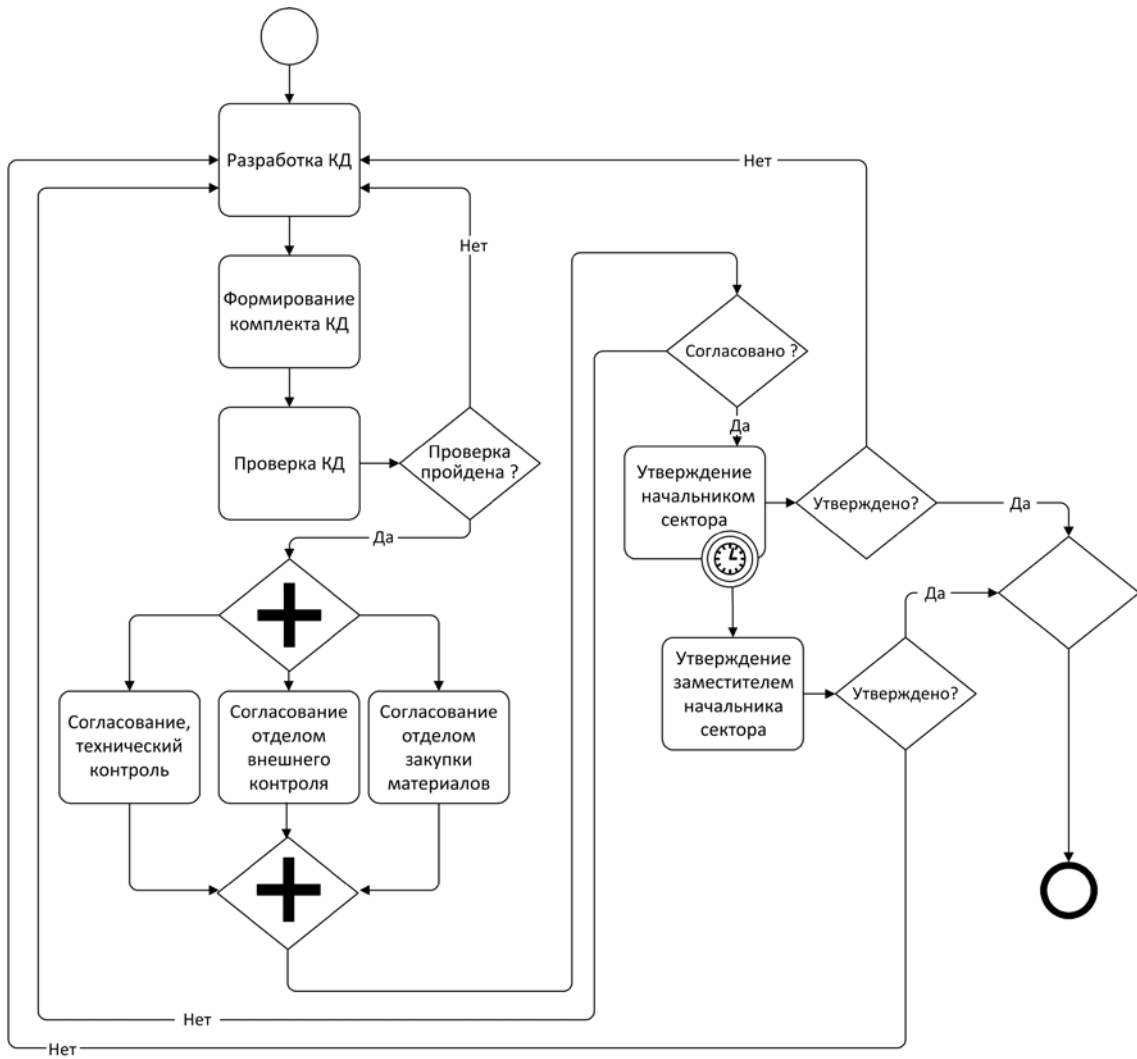


Рис. 2. Диаграмматическая модель согласования КД на визуальном языке BPMN

этого продолжателя невозможно, поскольку не выполняется необходимое условие ($1 \neq 2$) о том, что все входящие связи проанализированы.

В таблице 2 представлено содержимое памяти анализа темпоральной автоматной RVTI-грамматики визуального языка BPMN.

Разработанное программное средство, реализующее описанные методы, успешно отлавливает структурные, семантические и темпоральные виды ошибок [28, 29]. Скриншот сообщения об ошибке компьютерной программы анализа диаграмматической модели визуального языка BPMN представлен на рисунке 3.

В подтверждение линейной скорости работы метода был проведен эксперимент. Для создания тестовой базы диаграммных моделей привлекались студенты,

а также специальное программное средство, позволяющее генерировать объемные бизнес-процессы. Для чистоты эксперимента анализ и контроль проводился в несколько итераций для каждой диаграммы. Механизмы генерации позволяли учитывать главные факторы, наиболее существенно влияющие на конечное время измерений, которыми явились количество элементов и ошибок, их сложность и максимальный «fork».

Интерполяция зависимости времени от количества элементов анализа автоматной RVTI-грамматики визуального языка BPMN представлено на рисунке 4.

При различных комбинациях данных факторов на графике прослеживается общая тенденция, которая подтверждает теоретические расчеты о линейном характере скорости работы метода [30, 27].

Таблица 2

Содержимое памяти анализа темпоральной автоматной RVTI-грамматики визуального языка BPMN

№	Квазитерм	Операция	Содержимое памяти			Ошибки
			1m	t(1)	t(2)	
11	labelPG	$W_2(b^{1m})/W_3(m^{t(1)} == n^{t(2)})$	PG ₁	1 _{PG1}	2 _{PG1}	Deadlock

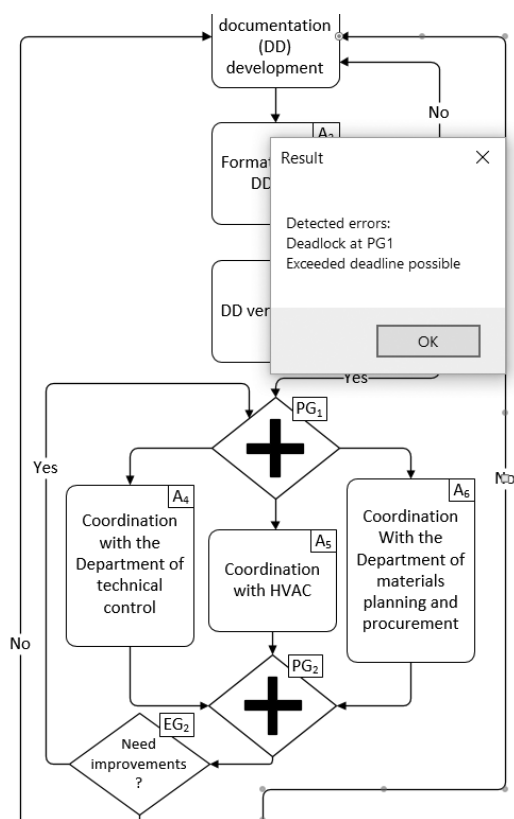


Рис. 3. Сообщение компьютерной программы о структурно-семантической ошибке элемента PG_1

Выводы

Исследованы парадигмы анализа и контроля качественных и количественных характеристик потоков работ. Разработана авторская темпоральная автоматная грамматика для визуального языка BPMN, анализирующая и контролирующая структурные, семантические и временные ошибки. В будущих работах предполагается провести исследования динамической модели представления процессов автоматизированных систем на базе темпоральной автоматной грамматики, обеспечивающей математическое описание гибридных динамических потоков проектных работ для анализа, контроля, преобразования и интерпретации, а также расширить возможности семантического анализа в плане согласования текстовой атрибутики диаграмм с проектной документацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lee E.A. Cyber Physical Systems: Design Challenges // 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC). Invited Paper, May 2008.
2. Wang Y., Fan Y. Using temporal logics for modeling and analysis of workflows // IEEE International Conference on E-Commerce Technology for Dynamic E-Business, IEEE Computer Society, Beijing, 2004. pp. 163–174.
3. Heitmeyer C.L. The generalized railroad crossing: a case study in formal verification of real-time systems

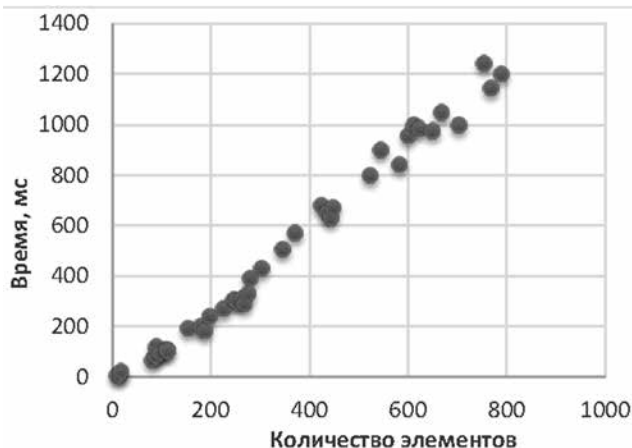


Рис. 4. Интерполяция зависимости времени от количества элементов анализа автоматной RVTI-грамматики визуального языка BPMN

// Proceedings Real-Time Systems Symposium REAL-94. Technical Report MIT/LCS/TM51, Lab. for Comp. Sci., MIT, Cambridge, MA, 1994.

4. Verifying business processes using SPIN / W. Janssen, R. Mateescu, S. Mauw, J. Springintveld // Proceedings of the 4th International SPIN Workshop, Paris, France, Nov. 1998. pp. 21–36.

5. Van Der Aalst W., van Hee K. M., van Hee K. Workflow management: models, methods, and systems. MIT press. Cambridge, 2002.

6. Workflow Handbook 2005 / Layna Fischer (editor) // Workflow Management Coalition, 2005.

7. Booch G., Jacobson I., Rumbaugh J. The unified modeling language reference manual. September 1999. pp. 321.

8. The Business Process Model And Notation Specification Version 2.0 // OMG | Object Management Group. – URL: www.omg.org/spec/BPMN/2.0 (дата обращения: 07.11.2018).

9. Mayer R.J., Painter M.K., de Witte P.S. IDEF family of methods for concurrent engineering and business re-engineering applications. College Station, Tex, USA: Knowledge Based Systems, 1994. pp. 65–66.

10. Santos P.S.Jr., Almeida J.P.A., Pianissolla, T.L. Uncovering the organisational modelling and business process modelling languages in the ARIS method // International Journal of Business Process Integration and Management. 2011. Vol. 5 (2). P. 130.

11. Pozewaunig H., Eder J., Liebhart W. ePERT: Extending PERT for workflow management systems. First East-European Symposium on Advances in Database and Information Systems, St. Petersburg, Russia, 1997. pp. 217–224.

12. АСКОН.– URL: <https://ascon.ru> (дата обращения: 07.11.2018).

13. Roth C. Using Microsoft Visio 2010. Pearson Education, 2011. pp. 24–35.

14. Paradigm V. Visual paradigm for UML. Hong Kong: Visual Paradigm International, 2010. pp. 78–92.

15. Hoffmann H.-P. Deploying model-based systems engineering with IBM-rational solutions for systems and

software engineering // IEEE/AIAA 31st Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2012. pp. 1–8.

16. Suppes P. Syntactic Methods in Pattern Recognition (K. S. Fu) // *SIAM Review*. 1977. Vol. 19 (4). P. 746.

17. Positional Grammars: A Formalism for LR-Like Parsing of Visual Languages / G. Costagliola, A. De Lucia, S. Orefice, G. Tortora // *Visual Language Theory*. 1998. pp. 171–191.

18. Zhang D.-Q., Zhang K. Reserved graph grammar: a specification tool for diagrammatic VPLs // *Proceedings of the IEEE Symposium on Visual Languages*. 1997. pp. 284–291.

19. Rekers J., Schürr A. Defining and Parsing Visual Languages with Layered Graph Grammars // *Journal of Visual Languages & Computing*. 1997. Vol. 8(1). pp. 27–55.

20. Zhang D.-Q. A Context-sensitive Graph Grammar Formalism for the Specification of Visual Languages // *The Computer Journal*. 2001. Vol. 44 (3). pp. 186–200.

21. Aho A.V. *Compilers: principles, techniques and tools* (for Anna University). Pearson Education India, 2003. pp. 5–6.

22. Sharov O.G., Afanas'ev A.N. Syntax-Directed Implementation of Visual Languages Based on Automaton Graphical Grammars // *Programming and Computer Software*. 2005. Vol. 31 (6). pp. 332–339.

23. Sharov O.G., Afanas'ev A.N. Methods and tools for translation of graphical diagrams // *Programming and Computer Software*. 2011. Vol. 37 (3). pp. 171–179.

24. Processing of Design and Manufacturing Workflows in a Large Enterprise / A. Afanasyev, M. Ukhanova, I. Ionova, N. Voit // *Lecture Notes in Computer Science*. 2018. pp. 565–576.

25. Afanasyev A., Voit N. Grammar-Algebraic Approach to Analyze Workflows // *Lecture Notes in Computer Science*. 2018. pp. 499–510.

26. Analysis and Control of Hybrid Diagrammatical Workflows / A. Afanasyev, N. Voit, O. Timofeeva, V. Epifanov // *Proceedings of the Second International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'17)*. 2017. pp. 124–133.

27. Voit N.N. Development of timed RT-grammars for analysis of business process at manufacturing and in cyber-physical systems // *International Conference on Computing Networking and Informatics (ICNI)*. 2017. pp. 1–3.

28. Afanasyev A., Voit N., Gaynullin R. The Analysis of Diagrammatic Models of Workflows in Design of the Complex Automated Systems // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2016. pp. 227–236.

29. Afanasyev A., Voit N., Gaynullin R. The Analysis of Diagrammatic of Workflows in Design of the Automated Systems // *Uncertainty Modelling in Knowledge Engineering and Decision Making*. 2016. pp. 509–514.

30. Control of UML diagrams in designing automated systems software / A.N. Afanasyev, N.N. Voit, E.Y. Voevodin., R.F. Gainullin // *9th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*. 2015. pp. 285–288.

REFERENCES

1. Lee E.A. *Cyber Physical Systems: Design Challenges. 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*. Invited Paper, May 2008.

2. Wang Y., Fan Y. Using Temporal Logics for Modeling and Analysis of Workflows. *IEEE International Conference on E-Commerce Technology for Dynamic E-Business*. IEEE Computer Society, Beijing, 2004, pp. 163–174.

3. Heitmeyer C. L. The Generalized Railroad Crossing: A Case Study in Formal Verification of Real-Time Systems. *Proceedings Real-Time Systems Symposium REAL-94*. Technical Report MIT/LCS/TM51, Lab. for Comp. Sci., MIT, Cambridge, MA, 1994.

4. Janssen W., R. Mateescu, S. Mauw, J. Springintveld. Verifying Business Processes Using SPIN. *Proceedings of the 4th International SPIN Workshop*. Paris, France, Nov. 1998, pp. 21–36.

5. Van Der Aalst W., Van Hee K. M., Van Hee K. *Workflow Management: Models, Methods, and Systems*. MIT Press, Cambridge, 2002.

6. *Workflow Handbook 2005*. Edited by Layna Fischer. Workflow Management Coalition, 2005.

7. Booch G., Jacobson I., Rumbaugh J. *The Unified Modeling Language Reference Manual*. September 1999. pp. 321.

8. *The Business Process Model and Notation Specification Version 2.0*. OMG Object Management Group. Available at: www.omg.org/spec/BPMN/2.0 (accessed: 07.11.2018).

9. Mayer R.J., Painter M.K., de Witte P.S. *IDEF Family of Methods for Concurrent Engineering and Business Re-engineering Applications*. College Station, Tex., USA, Knowledge Based Systems, 1994.

10. Santos P.S.Jr., Almeida J.P.A., Pianissolla T.L. Uncovering the Organisational Modelling and Business Process Modelling Languages in the ARIS Method. *International Journal of Business Process Integration and Management*, 2011, vol. 5 (2), pp. 130–143.

11. Pozewaunig H., Eder J., Liebhart W. ePERT: Extending PERT for Workflow Management Systems. *First East-European Symposium on Advances in Database and Information Systems*. St. Petersburg, Russia, 1997, pp. 217–224.

12. *ACKOH [ASCON]*. Available at: <https://ascon.ru> (accessed: 07.11.2018).

13. Roth C. *Using Microsoft Visio 2010*. Pearson Education, 2011. pp. 24–35.

14. Paradigm V. *Visual Paradigm for UML*. Hong Kong: Visual Paradigm International, 2010. pp. 78–92.

15. Hoffmann H.-P. Deploying Model-Based Systems Engineering with IBM-Rational Solutions for Systems and Software Engineering. *IEEE/AIAA 31st Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. 2012. pp. 1–8.

16. Suppes P. Syntactic Methods in Pattern Recognition (K. S. Fu). *SIAM Review*, 1977, vol. 19 (4), p. 746.

17. Costagliola G., A. De Lucia, S. Orefice, G. Tortora Positional Grammars: A Formalism for LR-Like Parsing

of Visual Languages. *Visual Language Theory*, 1998. pp. 171–191.

18. Zhang D.-Q., Zhang K. Reserved Graph Grammar: A Specification Tool for Diagrammatic VPLs. *Proceedings of the IEEE Symposium on Visual Languages*. 1997, pp. 284–291.

19. Rekers J., Schürr A. Defining and Parsing Visual Languages with Layered Graph Grammars. *Journal of Visual Languages & Computing*. 1997, vol. 8(1). pp. 27–55.

20. Zhang D.-Q. A Context-Sensitive Graph Grammar Formalism for the Specification of Visual Languages. *The Computer Journal*. 2001, vol. 44 (3). pp. 186–200.

21. Aho A.V. *Compilers: Principles, Techniques and Tools* (for Anna University). Pearson Education India, 2003. pp. 5–6.

22. Sharov O.G., Afanasev A.N. Syntax-Directed Implementation of Visual Languages Based on Automaton Graphical Grammars. *Programming and Computer Software*. 2005. vol. 31 (6). pp. 332–339.

23. Sharov, O.G., Afanas'ev A.N. Methods and Tools for Translation of Graphical Diagrams. *Programming and Computer Software*. 2011. vol. 37 (3). pp. 171–179.

24. Afanasyev A., M. Ukhanova, I. Ionova, N. Voit. Processing of Design and Manufacturing Workflows in a Large Enterprise. *Lecture Notes in Computer Science*, 2018. pp. 565–576.

25. Afanasyev A., Voit N. Grammar-Algebraic Approach to Analyze Workflows. *Lecture Notes in Computer Science*, 2018. pp. 499–510.

26. Afanasyev A., N. Voit, O. Timofeeva, V. Epifanov. Analysis and Control of Hybrid Diagrammatical Workflows. *Proceedings of the Second International Scientific Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI'17)*, 2017. pp. 124–133.

27. Voit N.N. Development of Timed RT-Grammars for Analysis of Business Process at Manufacturing and in Cyber-Physical Systems. *International Conference on Computing Networking and Informatics (ICNI)*, 2017. pp. 1–3.

28. Afanasyev A., Voit N., Gaynullin R. The Analysis of Diagrammatic Models of Workflows in Design of the Complex Automated Systems. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2016. pp. 227–236.

29. Afanasyev A., Voit N., Gaynullin R. The Analysis of Diagrammatic of Workflows in Design of the Automated Systems. *Uncertainty Modelling in Knowledge Engineering and Decision Making*, 2016. pp. 509–514.

30. Afanasyev A.N., N.N. Voit, E.Y. Voevodin., R.F. Gainullin. Control of UML Diagrams in Designing Automated Systems Software. *9th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*, 2015. pp. 285–288.