

**УДК 004**

# **АНАЛИЗ ТЕМПОРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В ГИБРИДНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКАХ ПРОЕКТНЫХ РАБОТ<sup>1</sup>**

А.Н. Афанасьев<sup>2</sup>, Н.Н. Войт<sup>3</sup>

Сроки исполнения, длительность выполнения, очередность проектных процедур являются темпоральными параметрами при информационном сопровождении жизненного цикла изделий в гибридных динамических потоках проектных работ, которые предлагается структурно-параметрически анализировать с помощью временной автоматной RVT-грамматики с магазинной памятью и семантически анализировать с помощью формализации спецификаций данных потоков проектных работ в базисе темпоральных операторов "До", "В течение", "После".

## **Введение**

Потоки проектных работ являются мощным инструментом анализа бизнес-процессов предприятия и содержат проектные задачи, которые адресованы к конкретным подразделениям и исполнителям предприятия. Такие проектные работы могут производиться одновременно в разных структурных подразделениях и разными исполнителями, поэтому вопросы синхронизации, блокировки ресурсов, тупиков (deadlocks), узкого горлышка (bottlenecks) и т.п., встречающиеся в теории информатики, возникают и в области управления бизнес-процессами предприятия. Такие потоки проектных работ можно представить в темпоральном базисе "До", "В течение", "После" поставив в соответствие параметру срок временной регламент исполнения работ предприятия.

Как правило, системы управления потоками проектных работ представлены фреймворками, которые обеспечивают аккумуляцию,

---

<sup>1</sup> *Исследования поддержаны грантом Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 2.1615.2017/4.6.*

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта № 16-47-732152*

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-07-01417*

<sup>2</sup> 432027, Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, УлГТУ, e-mail: a.afanasev@ulstu.ru

<sup>3</sup> 432027, Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, УлГТУ, e-mail: n.voit@ulstu.ru

диспетчеризацию и представление потоков проектных работ в виде диаграмматических моделей таких как BPMN, UML, IDEF0, WPDЛ и т.п. Подобные системы разработаны по разным парадигмам [1], их методы анализа потоков проектных работ делятся на обеспечивающие (моделирующие) и не обеспечивающие (не моделирующие) имитацию бизнес-процессов во времени [2]. К не моделирующим схемам относятся диаграммы активности UML, WPDЛ, BPMN, в которых нет механизмов и свойств для анализа. К моделирующим (динамическим) – сети Петри (как наиболее яркий представитель),  $\pi$ -исчисления ( $\pi$ -calculus). В настоящее время  $\pi$ -исчисление является перспективной, но еще очень молодой и развивающейся теорией, в ней много открытых вопросов и нерешенных проблем. Сети Петри имеют следующие ограничения: нет универсального фрейворка для моделирования и анализа потоков проектных работ на базе сетей Петри; нет механизма, который помог бы проектировщику при моделировании и обеспечил успешное завершение задачи с необходимыми требованиями (свойствами).

Достаточно широкое применения 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 оперировании, а также анализирует модель, а не объект исследования [2].

При проектировании и разработке сложных автоматизированных систем разработчики выделяют оркестрацию (orchestration) и хореографию (choreography) в архитектуре системы. Языками моделирования для описания оркестровки выступают BPEL (Business Process Executive Language), XPDЛ (XML Process Definition Language), UML (Unified Model Checking). Соответственно, языками моделирования для описания хореографии выступают WS-CDL (Web-services Choreography Description Language) и ebXML (Electronic Business using eXtensible Markup Language). Можно констатировать, что в проектной практике используется множество различных (гибридных) языков описания бизнес-процессов в оркестровке и хореографии, а также при моделировании, анализе, контроле и оптимизации потоков работ предприятия.

Динамические системы управления потоками проектных работ, такие как ARIS Business Architect (IDS Scheer), LSPS Agile Change Management Application (WhiteStein Technologies), WBI Modeler (IBM), учитывают темпоральные особенности бизнес-процессов предприятия и представляют их в виде параметров в BPMN-, eEPC-моделях. Однако, они не имеют методов анализа темпоральных характеристик в этих диаграмматических моделях в плане сроков исполнения, длительности выполнения и очередности проектных процедур.

Таким образом, в работе разработана автоматная RVT-грамматика с магазинной памятью и метод спецификации гибридных динамических потоков проектных работ на базе темпоральной алгебры, обеспечивающие анализ гибридных динамических потоков проектных работ при информационном сопровождении жизненного цикла изделия на крупном проектном предприятии.

## **1. Анализ состояния научных исследований в области управления производством**

Анализом и контролем потоков проектных работ занимаются такие ученые как Афанасьев А.Н. [3-8], Карпов Ю.Г. [9], Соснин П.И., Лифшиц Ю. [10], Ярушкина Н.Г., Калянов Г.Н. [11], Курейчик В.В., Бурдо Г. Б., Конев Б. Ю., Шалыто А. А., Савенков К., Кулямин В. В., Neda Saeedloei, Gopal Gupta [12], Кларк Э.М., Буч Г., Yuan Wang, Yushun Fan [13].

Карпов Ю.Г. в работе [9] представляет подход Model Checking к анализу, контролю, моделированию и реинжинирингу бизнес-процессов, в котором главным недостатком является исследование модели, а не самой системы, поэтому возникает вопрос об адекватности модели к системе, а также сложность решения перечисленных выше задач является экспоненциальной.

В работе Neda Saeedloei and Gopal Gupta [12] применен темпоральный автомат реализующий темпоральную контекстно-свободную грамматику  $\omega$ -grammars к анализу кибер-физических систем с последующим переводом этой грамматики в ко-индуктивное логическое программирование для интерпретатора Prolog.

Yuan Wang and Yushun Fan [13] предлагают использовать темпоральную логику действий для описания потоков работ в графовой форме, что требует описание всех маршрутов графа в формулах темпоральной логики действий и доказательства от противного предположения. Используется линейная темпоральная логика к формализации маршрута из задач, разветвлений AND, OR и схождения JOIN, однако, вопрос адекватности построения описания потоков работ в графовой форме остается не решенным.

База инструментальных средств анализа и контроля потоков проектных работ доступна по адресу [14]. Кроме этого, имеется инструменты CPN Tools [15], «Roméo - A tool for Time Petri Nets analysis» [16], TimesTool [17], Tina Toolbox [18], Visual Object Net++ [19].

## **2. Темпоральная автоматная RVT-грамматика с магазинной памятью**

RVT-грамматикой языка  $L(G)$  называется упорядоченная восьмерка непустых множеств  $G = (V, \Sigma, \tilde{\Sigma}, C, E, R, T, r_0)$ , где

- $V = \{v_e, e = \overline{1, L}\}$  – вспомогательный алфавит (алфавит операций над внутренней памятью);
- $\Sigma = \{a_l, l = \overline{1, T}\}$  – терминальный алфавит графического языка, являющийся объединением множеств его графических объектов и связей (множество примитивов графического языка);
- $\tilde{\Sigma} = \{\tilde{a}_l, t = \overline{1, \tilde{T}}\}$  – квазитерминальный алфавит, являющийся расширением терминального алфавита. Алфавит  $\tilde{\Sigma}$  включает: квазитермы графических объектов; квазитермы графических объектов, имеющих более одного входа; квазитермы связей-меток с определенными для них семантическими различиями. Связью-меткой является каждая связь, исходящая из графического объекта, содержащего более одного входа или выхода. Допустимо одну из связей такого графического объекта не обозначать как связь-метка. Механизм меток используется для возврата к не проанализированным частям графического образа; квазитерм, определяющий отсутствие связей-меток. Квазитерм *no\_label*, определяющий отсутствие связей-меток, используется для прекращения анализа диаграммы при условии выполнения операции(ий) над внутренней памятью;
- $C$  – множество идентификаторов часов;
- $E$  – множество темпоральных отношений “До”, “В течение”, “После” (инициализация часов  $\{c := 0\}$ , отношения вида  $\{c \sim x\}$ , где  $c$  переменная (идентификатор часов), а  $x$  является константой,  $\sim \in \{=, <, \leq, >, \geq\}$ );
- $R = \{r_i, i = \overline{0, I}\}$  – схема грамматики  $G$  (множество имен комплексов продукций, причем каждый комплекс  $r_i$  состоит из подмножества  $P_{ij}$  продукций  $r_i = \{P_{ij}, j = \overline{1, J}\}$ );
- $T \in \{t_1, t_2, t_3 \dots, t_n\}$  является множеством временных меток, причем есть отображение  $FT\Sigma: \Sigma \times C \times E \rightarrow T$  и соответственно  $\tilde{FT\Sigma}: \tilde{\Sigma} \times C \times E \rightarrow T$ .
- $r_0 \in R$  – аксиома RVT-грамматики (имя начального комплекса продукций),  $r_k \in R$  – заключительный комплекс продукций.

Продукция  $P_{ij} \in r_i$  имеет вид  $a_l^{[t_i]} \xrightarrow{W_Y(\gamma_1, \dots, \gamma_n)} r_m$ , где

- $W_v(\gamma_1, \dots, \gamma_n)$  –  $n$ -арное отношение, определяющее вид операции над внутренней памятью в зависимости от  $v \in \{0, 1, 2, 3\}$ ;
- $r_m \in R$  – имя комплекса продукции-преемника.

### 3. Анализ темпоральных характеристик гибридных динамических потоков проектных работ

Спецификация свойств гибридных динамических потоков проектных работ описывает требования к поведению системы (исполнителя) и может быть задана формулой темпоральной алгебры в виде дизъюнктивно-нормальной формы следующим образом:

$$\varphi ::= p | \neg \varphi | \varphi \vee \psi | \varphi \circ \psi | \varphi \cup \psi, \quad (1)$$

где  $p$  – темпоральный атомарный предикат (atomic predicate),  $\neg$  – отрицание,  $\vee$  – логическое ‘ИЛИ’, оператор  $\circ$  – темпоральный оператор NextTime ( $X$ ),  $\cup$  – темпоральный оператор Until. Причем, темпоральный атомарный предикат  $p$  принимает значение ‘0’ или ‘1’ в конкретные временные интервалы и, в отличие от предиката логики первого порядка, не зависит от своей структуры.

*Пример.* Начальник сектора конструкторов проверяет конструкторскую документацию (КД) к изделию на наличие ошибок, принимает решение: отдать ее на доработку при наличии ошибок или, в случае отсутствия ошибок, передать инженерам-конструкторам в отдел конструкторского бюро – ОКБ (Design); а начальник сектора лаборатории проверяет конструкторскую документацию (КД) к изделию на наличие ошибок, принимает решение: отдать ее на доработку при наличии ошибок или, в случае отсутствия ошибок, передать лаборантам в Лабораторию (Laboratory). Формальная запись выглядит так:

$$\varphi = \text{Design} \vee \text{Laboratory} \cup (\text{No Errors in Problem Definition}), \quad (2)$$

где Design – темпоральный атомарный предикат: признак передачи КД в ОКБ, Laboratory – темпоральный атомарный предикат: признак передачи КД в Лабораторию, (No Errors in Problem Definition) – темпоральный атомарный предикат: признак отсутствия ошибок в КД.

Для дальнейшего упрощения темпоральных алгебраических выводов определим  $\varphi$  через темпоральный оператор  $\circ$  как:

$$\varphi = NE \vee (D \vee L) \wedge \circ \varphi, \quad (3)$$

где  $NE$  – No Errors in Problem Definition,  $D$  – Design,  $L$  – Laboratory.

Используя теорему [9] о том, что для любого логико-алгебраического выражения можно построить конечный автомат с памятью, следовательно, можно построить конечный автомат с памятью также для  $\varphi$ . Предложим следующую теорему.

*Теорема “Семантический анализ”.* Содержание эластичной ленты RVT-грамматики, построенной по  $\varphi$ , должно является подмножеством содержания  $(v_1, \dots, v_n)$  RVT-грамматики, построенной к

диаграмматической модели, иначе в гибридных динамических потоках проектных работ существует семантическая ошибка, т.е.

$$\exists \varphi \rightarrow w_2(v_1, \dots, v_n) / w_3(v_1, \dots, v_n \neq \emptyset) \quad (3)$$

Доказательство.

Используем метод доказательства от обратного, докажем, что в таком случае у нас будет две разных грамматики. Пусть содержание эластичной ленты RVT-грамматики к  $\varphi$  не является подмножеством содержания эластичной ленты RVT-грамматики к диаграмматической модели. Следовательно, существует продукция в RVT-грамматики к  $\varphi$  отличная от продукции в RVT-грамматики к диаграмматической модели, что приводит к неэквивалентности двух грамматик. Что и требовалось доказать.

Таким образом, семантический анализ гибридных динамических потоков проектных работ реализуется с помощью определения не пустого множества пересечения содержания эластичных лент двух грамматик – RVT-грамматики к  $\varphi$  и RVT-грамматики к диаграмматической модели.

### Заключение

Разработаны темпоральная автоматная RVT-грамматики с магазинной памятью, обеспечивающая структурно-параметрический анализ временных характеристик гибридных динамических потоков проектных работ, метод семантического анализа темпоральных характеристик гибридных динамических потоков проектных работ, использующий спецификацию гибридных динамических потоков проектных работ в виде темпоральной алгебры.

В будущих работах будет рассмотрен класс структурно-параметрических и семантических ошибок гибридных динамических потоков проектных работ.

### Список литературы

1. D. Georgakopoulos, M. Hornick, and A. Sheth, An overview of workflow management: From process modeling to infrastructure for automation. Journal on Distributed and Parallel Database Systems, 3(2): 119-153, April 1995.
2. Yuan Wang, Yushun Fan Using Temporal Logics for Modeling and Analysis of Workflows // Proceedings of E-Commerce Technology for Dynamic E-Business, 2004. IEEE International Conference on, 2004. DOI: 10.1109/CEC-EAST.2004.72
3. Афанасьев А.Н., Войт Н.Н. Разработка и исследование средств извлечения из САПР КОМПАС-3D и представления в веб-системах конструкторского описания, 3D-моделей промышленных деталей и сборок // В сборнике: Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2015) Труды международной конференции. Под ред. А.В. Толока. 2015. С. 208-212.

4. Афанасьев А.Н., Войт Н.Н. Компонентная автоматизированная обучающая система САПР на основе гибридной нейронной сети // Автоматизация. Современные технологии. 2009. № 3. С. 14-18.
5. Афанасьев А.Н., Войт Н.Н. Разработка компонентно-сервисной платформы обучения: диаграммы использования и деятельности программного компонента сценария на UML-языке // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2012. № 1 (57). С. 66-68.
6. Афанасьев А.Н., Войт Н.Н. Реализация конструктора сценария обучающих курсов // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2011. № 1 (53). С. 54-59.
7. Афанасьев А.Н., Войт Н.Н. Разработка методов нечеткой параметрической адаптивной диагностики обучаемого инженера // Автоматизация процессов управления. 2009. № 3. С. 51-56. 11
8. Афанасьев А.Н., Игонин А.Г., Афанасьева Т.В., Войт Н.Н. Использование нейросемантических сетей для автоматизированного проектирования вычислительной техники // Автоматизация. Современные технологии. 2008. № 1. С. 21-24.
9. Карлов Ю. Г. MODEL CHECKING. Верификация параллельных и распределенных программных систем. — СПб.: БХВ-Петербург, 2010. — 560 с.
10. Верификация программы и темпоральные логики. URL: <http://logic.pdmi.ras.ru/~yura/modern/034.pdf>
11. Калянов Г.Н. Моделирование, анализ, реорганизация и оптимизация бизнес-процессов / Учебное пособие. — М.: Финансы и статистика, 2006. — 240 с. URL: <http://www.twirpx.com/file/2204790/>
12. Saedloei, Neda, and Gopal Gupta. "Timed definite clause omega-grammars." LIPICs-Leibniz International Proceedings in Informatics. Vol. 7. Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik, 2010.
13. Wang, Yuan, and Yushun Fan. "Using temporal logics for modeling and analysis of workflows." E-Commerce Technology for Dynamic E-Business, 2004. IEEE International Conference on. IEEE, 2004.
14. YAHODA.URL: <http://web.archive.org/web/20120220001353/http://anna.fi.muni.cz/yahoda/>
15. CPN Tools. URL: <http://cpntools.org/>
16. Roméo. URL: <http://romeo.rts-software.org>
17. TimesTool. URL: <http://www.timestool.com/documentation.shtml>
18. Tina Toolbox. URL: <http://projects.laas.fr/tina/>
19. Visual Object Net++. URL: <https://www.techfak.uni-bielefeld.de/~mchen/BioPNML/Intro/VON.html>