

4. Амербаев В.М., Корнилов А.И., Стемпковский А.Л. Модулярная логарифметика – новые возможности для проектирования модулярных вычислителей и преобразователей // IV Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2010»: Сб. научн. тр. – М.: ИПИМ РАН, 2010.
5. El-Maleh A.H., Oughalia F.C. A generalized modular redundancy scheme for enhancing fault tolerance of combinational circuits // Microelectronics Reliability. – 2014. – Vol. 54, No. 1. – P. 316-326.
6. Стемпковский А.Л., Тельпухов Д.В., Соловьев Р.А., Мячиков М.В. Повышение отказоустойчивости логических схем с использованием нестандартных мажоритарных элементов // Информационные технологии. – 2015. – № 10, Т. 21. – С. 749-756.
7. Стемпковский А.Л., Тельпухов Д.В., Соловьев Р.А., Соловьев А.Н., Мячиков М.В. Моделирование возникновения неисправностей для оценки надежных характеристик логических схем // Информационные технологии. – 2014. – № 11. – С. 30-36.
8. J. von Neumann. Probabilistic logics and the synthesis of reliable organisms from unreliable components // in Automata Studies, C.E. Shannon and J. McCarthy, Eds. Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1956. – P. 43-98.
9. Xiao R., Chen C. Gate-level circuit reliability analysis: A survey,” VLSI Design, Vol. 2014, Article ID 529392. – 2014. – P. 1-12.
10. Стемпковский А.Л., Тельпухов Д.В., Соловьев Р.А., Мячиков М.В., Тельпухова Н.В. Разработка технологически-независимых метрик для оценки маскирующих свойств логических схем // Вычислительные технологии. – 2016. – Т. 21, № 2.
11. Choudhury M.R., Mohanram K. Reliability analysis of logic circuits // IEEE Trans CAD. – 2009. – No. 28 (3). – P. 392-405.

УДК 004

Н.Н. Войт<sup>1</sup>

## ГРАММАТИКО-АЛГЕБРАИЧЕСКИЙ ПОДХОД ДЛЯ СТРУКТУРНО-СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДИАГРАММАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПОТОКОВ РАБОТ В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ\*

*Статья посвящена авторскому подходу для анализа и преобразования потоков проектных работ. Для представления потоков работ используются графические языки eEPC, UML, BPMN и IDEF0. Основу подхода составляют темпораль-*

<sup>1</sup> УлГУ; г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, 32; n.voit@ulstu.ru; 88422778846; к.т.н.; доцент.

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-07-01417. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Ульяновской области в рамках научного проекта № 18-47-730032.

*ная автоматная грамматика и онтология. Сужение семантического разрыва (semantic gap) между анализом бизнес-процессов и выполнением бизнес-процессов является целью исследования.*

*Потоки работ, диаграмматика, бизнес-процессы, предприятие.*

**N.N. Voit**

### **GRAMMATICAL-ALGEBRAIC APPROACH FOR STRUCTURAL-SEMANTIC ANALYSIS AND TRANSFORMATION OF WORKFLOWS IN COMPUTER-AIDED DESIGN**

*The article is devoted to the author's approach to the analysis and transformation of the project workflows. The graphical languages eEPC, UML, BPMN, and IDEF0 are used to represent workflows. The basis of the approach are temporal automaton grammar and ontology. Narrowing the semantic gap between business process analysis and business process execution is the goal of the study.*

*Workflows, diagrammatic, business process, manufacturing.*

#### **Введение**

Поток работ представляет собой трассу выполнения множества задач бизнес-процесса с учетом ограничений и бизнес-событий, содержит временные ограничения и данные, в котором, чтобы избежать сбоев, необходимо определить и исправить ошибки. Хотя ошибки могут возникать в причинно-следственных связях между задачами, в работе акцентируется внимание на семантических ошибках выполнения потока работ, а именно на денотативной и сигнификативной семантике. Денотативная семантика определяет ошибки антонимии, синонимии слов в событиях потока работ. Сигнификативная семантика выявляет конструкционные ошибки потока работ на основе изоморфизма и гомоморфизма трасс. Как правило, прием Ad-hoc [1] в потоке работ является надстройкой и делает процесс нестрогим (неформализованным), тем самым нарушая канонические правила выполнения процесса. Как следствие, выполнение такого потока работ может привести к снижению производительности в проектировании автоматизированных систем, снижению прибыли и расходованию значительного управленческого времени. Таким образом, выявление и устранение ошибок, в том числе денотативных и сигнификативных, в потоках работ имеет важное научно-техническое значение в проектировании автоматизированных систем.

Поток работ должен быть концептуально представлен на формальном языке для анализа и экспертизы перед развертыванием в реальной бизнес-среде. Такое представление также полезно при передаче задач потока работ между проектировщиками, пользователями, инженерами-технологами, менеджерами и техническим персоналом. Кроме того, модели процесса при представлении могут быть проверены с использованием подходов,

имеющих соответствующий формальный язык к определению потока работ. Концептуальные представления могут быть выполнены с использованием Workflow Nets (WF-nets), Workflow Graphs, Object Coordination Nets (OCoNs), Adjacency Matrix, Unified Modeling Language (UML) diagrams, Evolution Workflow Approach and Propositional Logic. В настоящее время алгоритмы проверки существуют для WF-nets, Workflow Graphs, UML diagrams, Propositional Logic and Adjacency Matrix representations. Причем популярными алгоритмами являются те, которые основаны на WF-nets и Workflow Graphs. WF-nets основаны на сетях Петри, и многие формальные методы анализа сетей Петри были использованы для получения теоретических решений проблем, с которыми сталкиваются при проектировании сетей WF. Хотя многие сложные конструкции языка процессов, которые полезны в бизнес-среде, могут быть реализованы с помощью WF-nets, Workflow Management Council (WfMC) использует только шесть основных конструкций языка процессов. WfMC принял этот подход, чтобы сохранить моделирование очень простым и ясным. До сих пор большинство систем управления рабочими процессами (WfMSs) предоставляют только средства моделирования для проверки моделей рабочих процессов с использованием метода проб и ошибок [2]. Эти инструменты моделирования можно использовать для выполнения подмножества экземпляров потоков работ, чтобы проверить наличие структурных конфликтов, которые могут возникнуть в соответствующих сценариях. Тем не менее, потоки работ могут иметь много экземпляров, и задача проверки становится трудновыполнимой для всех экземпляров.

Проверка потоков работ на структурные и семантические ошибки является вычислительной задачей, поэтому для этого можно использовать различные формальные подходы и языки. Однако подход, принятый для проверки, должен поддерживать язык описания потока работ. Из-за вычислительной сложности задачи (полиномиальной, экспоненциальной) только немногие подходы успешно справляются с проверкой потоков работ с учетом ограничений, в том числе, и временных, для всех видов графов потоков работ.

Наглядная (в виде диаграмм) форма представления бизнес-процессов призвана помочь проектировщикам при разработке и анализе проектных решений, конструкторской подготовке производства, технологической подготовке производства с помощью логических рассуждений по конкретным сложным бизнес-процессам. Многие системы управления потоками проектных работ разработаны под разные парадигмы и имеют в научном плане закрытые исследования и применения [2]. Как правило, методы делятся на моделирующие и не моделирующие [3]. К не моделирующим методам относятся диаграммы активности UML, WPDЛ, BPMN, в которых нет механизмов и свойств для анализа. К моделирующим – 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. Для того, чтобы анализировать различные свойства (живость, достижимость, безопасность), потоки работ моделируются в разных типах сетей Петри, что является приемом Ad-hoc; нет механизма, который помог бы проектировщику при моделировании и обеспечил успешное завершение задачи с необходимыми требованиями (свойствами).

### 1. Научно-техническая проблема, имеющая важное хозяйственное значение

Фундаментальной научной проблемы является повышение эффективности 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. Проблема в техническом плане представлена в работе [4]. Данная работа вносит вклад в разрешение научно-технической проблемы новым грамматико-алгебраическим подходом к контролю и анализу денотативных и сигнификативных семантических ошибок диаграмматических моделей потоков проектных работ, приблизив решение к оптимуму. Поскольку согласно работе [5] невозможно формально определить, что означает «полное отсутствие ошибок» в диаграмматических моделях потоков проектных работ, то под оптимумом понимается контроль и анализ всех известных ошибок динамических моделей потоков работ, включая синтаксические (структурные), семантические (денотативные, сигнификативные и квантовые), а также контроль топологических событий, имен и др. (в работе представлено 23 класса ошибок). В работах авторов [6–10] рассматриваются подходы и методы контроля, анализа и моделирования бизнес-процессов.

### 2. Темпоральная автоматная RVTI-грамматика и онтология

Темпоральной автоматной RVTI-грамматикой языка  $L(G)$  называется упорядоченная восьмерка непустых множеств  $G = (V, \Sigma, \tilde{\Sigma}, C, E, R, \tau, \tau_0)$ , где  $V = \{v_e, e = \overline{1..L}\}$  – вспомогательный алфавит (алфавит операций над

внутренней памятью, представленный магазином или эластичной лентой);

$\Sigma = \{a_n, n = \overline{1, T}\}$  – алфавит графических символов (объектов);

$\tilde{\Sigma} = \{\tilde{a}_n, n = \overline{1, T}\}$  – квазитерминальный алфавит, являющийся расширением

терминального алфавита  $\Sigma$ ;  $C = \{c, c = c + t_i \mid \exists t_0 = 0 \rightarrow c = 0\}$  – иденти-

фикатор часов (счетчик);  $\tau = \{t_i \in [0; +\infty], i = \overline{1, K}\}$  – множество временных

меток, причем  $c \in [t_i; t_{i+1}]$ ;  $E$  – темпоральное отношение вида  $\{c \sim t_i\}$ , где

переменная  $c$  (идентификатор часов), отношение  $\sim \in \{=, <, \leq, >, \geq\}$ , опи-

сывающих условие наступление события  $t_i$ ;  $R = \{r_i, i = \overline{0, I}\}$  – схема

грамматики  $G$  (множество имен комплексов продукций, причем каждый ком-

плекс  $r_i$  состоит из подмножества  $P_j$  продукций  $r_i = \{P_j, j = \overline{1, J}\}$ );

$r_0 \in R$  – аксиома RVPI-грамматики (имя начального комплекса продукций),

$r_k \in R$  – заключительный комплекс продукций. Продукция  $P_j \in r_i$  имеет вид

$a_i \xrightarrow{W_\gamma(v_1, \dots, v_n)E} r_m$ , где  $W_\gamma(v_1, \dots, v_n)$  –  $n$ -арное отношение, определяющее

вид операции над внутренней памятью в зависимости от  $\gamma = \{1, 2, 3\}$  (1 – за-

пись, 2 – чтение, 3 – сравнение),  $E = \emptyset$  при  $c \sim t_i$ ;  $(a_i, t_i)$  – слова в виде

пары квази-символа и временной метки;  $r_m \in R$  – имя комплекса продукции-

преемника. Язык данной грамматики содержит слова вида  $(\tilde{a}_i, t_i)$  при  $E \neq \emptyset$

и  $a_i$  при  $E = \emptyset$ , представляет трассу  $\sigma = \{a_0, 0\} \rightarrow \{a_i, t_i\} \vee \bar{a}_i \rightarrow \{a_k, t_k\}$ .

Поскольку онтология является совокупностью схем описания пред-

метной области и правил отнесения данных к этой предметной области, а

выделение онтологии является описания схемы предметной области, ха-

рактеризующейся определенной логической структурой, то с использо-

ванием семантического анализа диаграмматических моделей и набора напи-

санных правил осуществляется наполнение выделенной онтологии. Логич-

еская форма представления онтологии структурирована, поэтому к

наполняющим ее данным применима реляционная алгебра. По экземпляру

диаграмматической модели можно построить онтологию, классы которой

являются словами (концептами) и имеют следующий вид:

$Class_0 = (\tilde{a}_k, t_0), \dots, Class_k = (\tilde{a}_k, t_k)$ , где пара  $(\tilde{a}_i, t_i)$  является темпоральным словом. Классы имеет свойства, которые представлены следующим образом:  $Property = \{Name, OrientationTime, ProcessingTime\}$ , где *Name* – имя поля (наследуется от имени нотации диаграмматической модели); *OrientationTime* – время начала потока; *ProcessingTime* – длительность потока.

Перечень ошибок, обнаруживаемых при применении подхода для анализа диаграмматических моделей потоков проектных работ, представлен ниже. Описание сути ошибок с 1 по 19 дано в работах [11–18].

Классы синтаксических и семантических ошибок: 1. Циклическая связь. 2. Взаимоисключающие связи. 3. Множественная связь. 4. Ошибка удаленного контекста. 5. Ошибка передачи управления. 6. Ошибка кратности входов. 7. Ошибка кратности выходов. 8. Недопустимая связь. 9. Ошибка связи. 10. Ошибка уровня доступа. 11. Ошибка передачи сообщения. 12. Ошибка делегирования управления. 13. Количественная ошибка элементов диаграммы. 14. Исключающие связи неверного типа. 15. Вызов направленный в линию жизни объекта. 16. Оборванная связь. 17. Нарушение кратности зависимостей. 18. Взаимоисключающие связи. 19. Синхронный вызов до получения ответа.

Классы денотативных и сигнификативных семантических ошибок:

20. Большая синонимия (денотативная ошибка): темпоральные слова  $(\tilde{a}_i, t_i)$  и  $(\tilde{a}_k, t_j)$  являются синонимами тогда и только тогда, когда  $l \neq k, a_l \equiv a_k, t_l < t_j$ . Будем обозначать их как  $(\tilde{a}_l, t_l) \equiv (\tilde{a}_k, t_j)$ . Под высокой синонимией в диаграмматических моделях будем понимать интенсивное использование синонимов  $\mu$ . Признак ошибки «Большая синонимия»:

$$\lim_{\substack{l, j \in N \\ l, k \in N}} \left[ \frac{1}{\mu \left( \neg \left( (\tilde{a}_l, t_l) \equiv (\tilde{a}_k, t_j) \right) \right) \right]} \rightarrow \infty.$$

21. Антонимия объектов (денотативная ошибка): темпоральные слова  $(\tilde{a}_l, t_l)$  и  $(\tilde{a}_k, t_j)$  являются антонимами тогда и только тогда, когда

$\bar{a}_i = \neg \bar{a}_k, t_i < t_j$ . Будем обозначать их как  $(\bar{a}_i, t_i) \equiv (\neg \bar{a}_k, t_k)$ . Под антонимией объектов в диаграмматических моделях будем понимать интенсивное использование антонимов. Как правило, *Начало* и *Конец* в диаграмматике является антонимами.

22. Конверсивность отношений (сигнификативная ошибка). Заключается в наличие противоположных отношений темпоральных слов.

23. Несогласованность объектов (сигнификативная ошибка). Заключается в отсутствии отношения между темпоральными словами.

Механизм подхода для преобразования диаграмматических моделей потоков работ описан в работе [6].

### Заключение

Разработан грамматико-алгебраический подход для структурно-семантического анализа и преобразования диаграмматических моделей потоков работ в автоматизированном проектировании. Анализ позволяет обнаружить 23 класса ошибки, в том числе, 2 денотативных и 2 сигнификативных согласно перечню классов ошибок. При применении авторского подхода контролируются и анализируются не только структурные ошибки, но и семантические ошибки, что отличает подход от аналогов. Предложенная темпоральная автоматная RVTI-грамматика имеет линейную характеристику времени анализа диаграмматических моделей потоков работ, учитывает язык описания процесса и может быть применена для любой диаграммы, а также позволяет выполнить имитационно моделирование (симуляцию) процесса в наглядной форме. Онтологическая модель является основной для анализа на денотативные и сигнификативные ошибки диаграмматических моделей потоков работ. Автором расширен перечень структурных и семантических ошибок, встречающихся в потоках работ. В будущих работах автор предполагает увеличить число примеров применения подхода в промышленности, обучении, киберфизических системах, при разработке автоматизированных систем, а также формально описать признаки сигнификативных семантических ошибок диаграмматических моделей потоков проектных работ.

### Библиографический список

1. Workflow Handbook 2005 / Layna Fischer (edit or) // Workflow Management Coalition, 2005.
2. Henry. H. Bi and J. Leon Zhao. Applying Propositional Logic to Workflow Verification // Information Technology and Management. – 2004. – Vol. 5 (3-4). – P. 293-318.
3. 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.

4. WhiteStein Technologies. – <https://www.whitestein.com/lsp-solutions/manufacturing> (дата обращения: 25.05.2018).
5. **Карлов Ю.Г.** Model Checking. Верификация параллельных и распределенных программных систем. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 560 с.
6. **Афанасьев А.Н., Войт Н.Н.** Грамматико-алгебраический подход к анализу и синтезу диаграмматических моделей гибридных динамических потоков проектных работ // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2017. – № 12. – С. 69-78. – URL: <http://www.radiotec.ru/article/20138> (дата обращения: 25.05.2018)
7. Верификация программы и темпоральные логики. – URL: <http://logic.pdmi.ras.ru/~yuga/modern/034.pdf> (дата обращения: 25.05.2018).
8. **Калянов Г.Н.** Моделирование, анализ, реорганизация и оптимизация бизнес-процессов: учеб. пособие. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 240 с. – URL: <http://www.twirpx.com/file/2204790/> (дата обращения: 13.11.2017).
9. **Saeedloei N., Gupta G.** Timed definite clause omega-grammars // LIPIcs-Leibniz International Proceedings in Informatics. – Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik, 2010. – Т. 7.
10. **Wang Y., Fan Y.** Using temporal logics for modeling and analysis of workflows // E-Commerce Technology for Dynamic E-Business, 2004 // IEEE International Conference on. – IEEE, 2004. – С. 169-174.
11. **Афанасьев А.Н., Шаров О.Г., Войт Н.Н.** Анализ и контроль диаграмматических моделей при проектировании сложных автоматизированных систем. – Ульяновск: УлГТУ, 2016. – 125 с.
12. **Afanasyev A., Voit N., Gaynullin R.** The Analysis of Diagrammatic Models of Workflows in Design of the Complex Automated Systems // Proceedings of the First International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (ITI'16). – Springer International Publishing, 2016. – P. 227-236.
13. **Afanasyev A.N., Voit N.N., Gainullin R.F.** Diagrammatic models processing in designing the complex automated systems // Application of Information and Communication Technologies (AICT), 2016 IEEE 10th International Conference on. – IEEE, 2016. – С. 1-4.
14. **Afanasyev A.N. et al.** Control of UML diagrams in designing automated systems software // Application of Information and Communication Technologies (AICT), 2015 9th International Conference on. – IEEE, 2015. – P. 285-288.
15. **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.
16. **Афанасьев А.Н., Войт Н.Н.** Интеллектуальная агентная система анализа моделей потоков проектных работ // Автоматизация процессов управления. – 2015. – № 4. – С. 42.
17. **Афанасьев А.Н., Войт Н.Н.** Автоматная временная грамматика для управления объектами киберфизических систем // В книге: десятая всероссийская мультиконференция по проблемам управления МКУ-2017 Материалы 10-й Всероссийской мультиконференции. В 3-х т. Ответственный редактор: И.А. Каляев. – 2017. – С. 20-22.
18. **Афанасьев А.Н., Войт Н.Н., Уханова М.Е., Ионова И.С., Елифанов В.В.** Анализ конструкторско-технологических потоков работ в условиях крупного радиотехнического предприятия // Радиотехника. – 2017. – № 6. – С. 49-58.