

# Грамматико-алгебраический подход к структурно-параметрическому анализу и синтезу потоков проектных работ<sup>1</sup>

*А.Н. Афанасьев,  
перв. прор., проректор по ДиДО, проф. каф. «Выч. техн.»,  
д.т.н., доц., a.afanasev@ulstu.ru,  
Н.Н. Войт,  
доц. каф. «Выч. техн.», зам. дир. по НИР ИДДО,  
к.т.н., доц., n.voit@ulstu.ru,  
УлГТУ, г. Ульяновск,*

В работе исследуется проблема гибридных динамических потоков проектных работ в условиях крупных проектных организаций, приведен обзор методов оркестрации, хореографии как составных компонентов ансамбля с целью их дальнейшего анализа в плане потоков работ с помощью авторской темпоральной автоматной RVT-грамматики, а также представлены механизмы синтеза и преобразования потоков проектных работ, обеспечивающие нейтрализацию ошибок и восстановление сбойных диаграмм

The problem of hybrid dynamic design workflows in a large engineering enterprise is described in this paper. Authors give an overview of the methods of orchestration choreography as an integral component of the ensemble with the purpose of their further analysis in terms of workflows through the author's temporal automaton RVT-grammar as well as the mechanisms of transformation and synthesis design workflow, to ensure the neutralization of errors and recovery of bad diagrams

## Введение

Проектным предприятиям часто приходится динамически реконфигурировать свои внутренние процессы, чтобы повысить эффективность бизнес-потока. Однако изменения рабочего процесса обычно приводят к нескольким проблемам (тупикам) с точки зрения степени свободы, полноты и безопасности решений. Поэтому проектирование, анализ, контроль и моделирование динамических потоков работ является актуальной задачей в связи с необходимостью оперативного реагирования на меняющиеся бизнес-ситуации. Динамическое развитие сложных автоматизированных систем связано с адаптацией рабочих процессов к изменениям в системных требованиях. Принято считать, что гибкость (живость) предприятия / бизнеса как свойство предприятия функционирует в динамично развивающемся мире, при этом предприятия должно развиваться по двум траекториям: 1) адаптироваться к изменениям в окружающей среде; 2) открывать новые возможности, постоянно появляющиеся в динамичном мире для запуска совершенно новых продуктов (услуг). Реализация гибкости требует нового подхода, который позволяет менеджерам-проекта обнаруживать изменения и возможности развития сложных автоматизированных систем и влиять на них соответственно. Необходимость разработки такого подхода возникла, когда степень изменения требований развития возросла. Крупные корпорации Whitestein Technologies, Magenta Technologies, SkodaAuto, Volkswagen, Saarstahl AG отмечают, что промышленность и техника (прогресс) движутся слишком быстро и требования к ним меняются с высокой интенсивностью, а традиционные (монокричные) методы уже не могут управлять жизненным циклом продуктов и рабочих процессов проекта.

Анализом и контролем проектных потоков работ занимаются научные школы ГУВШЭ, МГТУ СТАНКИН, МВТУ им. Н.Э. Баумана, УлГТУ, ПО-МИ АН РФ, ВМК МГУ имени М.В. Ломоносова, Института системного программирования РАН (Россия), университета Карнеги-Меллон (США), лаборатории VERIMAG (Франция), а также такие учёные как Афанасьев А.Н. [1-5], Карпов Ю.Г.[6], Соснин П.И., Лифшиц Ю. [7], Ярушкина Н.Г., Калянов Г.Н. [8], Конев Б. Ю., Шалыто А. А., Савенков К., Кулямин В. В. (Россия), а также Neda Saeedloei, Gopal Gupta [9], Кларк Э.М., Буч Г.(США), Yuan Wang, Yushun Fan [10] (Китай). Проектирование и обработка потоков работ связаны с технологией Rational Unified Process (RUP) [11], методологией PBWD, языками моделирования Unifeid Model Language (UML) [12], extended Event Driven Process Chain (eEPC), BPMN, IDEF0, IDEF3, Amber, Promela, YAWL, the Booch Methodology [13], Hierarchical Object Oriented Requirement Analysis (HOORA) [14], Jacobson Method [15], Object Modeling Technique (OMT) [16], Planguage [17], Shlaer-Mellor Object-Oriented Analysis Method [18], Software Cost Reduction requirements method (SCR) [19], Software Requirements Engineering Methodology (SREM) [20], Storyboard Proto-typing [21], Structured Analysis and Design Technique (SADT) [22], а также Structured Analysis and System Specification (SASS), Volere method, WinWin approach, Component-based methods (COTS-Aware Requirements Engineering (CARE), Off-the-Shelf Option (OTSO)) [23]. Кроме этого, имеются хорошие инструменты [24] CPN Tools [25], «Roméo - A tool for Time Petri Nets analysis» [26], TimesTool [27], Tina Toolbox [28], Visual Object Net++ [29].

В работе исследуется проблема гибридных динамических потоков проектных работ в условиях крупных проектных организаций, приведен обзор методов оркестрации, хореографии как составных компонентов ансамбля с целью их дальнейшего анализа в плане потоков работ с помощью авторской темпоральной автоматной RVT-грамматики, а также разработан новый грамматико-алгебраический подход к анализу и синтезу диаграмматических моделей гибридных динамических потоков проектных работ в условиях крупной проектной организации при конструкторской и технологической подготовке производства, включающий систему принципов, моделей, методов и RVT-грамматику, активно использующий понятие времени и обеспечивающий нейтрализацию ошибок, восстановление сбойных диаграмм.

<sup>1</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-07-01417.

## Ансамбль как композиция оркестрации и хореографии

Технологии обмена сообщениями, благодаря которым несколько независимых участников-организаций стремятся достичь желаемого состояния, называются «хореографией», а взаимодействие их отделов (служб) называется «оркестровкой». Специальные методологии и стандарты, такие как BPEL4WS, XLANG, WSFL, разработаны для оркестровки с целью описания бизнес-модели. Настоящие методики и инструменты разрабатываются с участием крупнейших поставщиков, таких как IBM, Microsoft, Oracle и BEA Systems и др. Оркестровка относится к определению бизнес-процесса, который может взаимодействовать с внешними и внутренними службами. Взаимодействия, возникающие на основе обмена сообщениями, включают бизнес-логику и порядок выполнения задач. Они могут выходить за рамки приложений и организаций, определяя долгосрочную, транзакционную, многошаговую бизнес-модель. Оркестровка – это всегда контроль с точки зрения одного участника в процессе. Хореография позволяет каждому участнику описать свою часть взаимодействия. При использовании хореографии отслеживаются последовательности сообщений между несколькими участниками и источниками.

Динамика потоков работ, представленных диаграмматическими моделями, рассматривается в двух аспектах: оркестровка и экземпляры хореографии, что в совокупности составляет ансамбль. Причем появившиеся экземпляры хореографии будут связаны с ранее спроектированными диаграммами. Например, организация 1 содержит BPMN, IDEF0, UML AD, eEPC, UML class диаграмма в оркестровке, но в ансамбле участвуют только BPMN, IDEF0, UML AD. Организация 2 содержит Java, C#, Timed automaton, Petri nets в оркестровке, но в ансамбле участвуют только Java и Timed automaton.

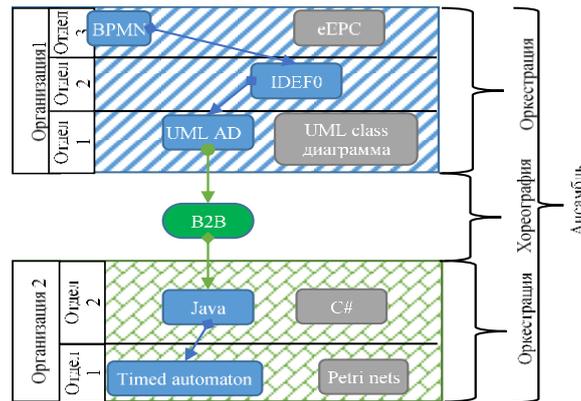


рис. 1. Ансамбль разнотипных диаграмм и гибридной оркестрации

Рассмотрим оркестровку IDEF0 и UML AD диаграмм в ансамбле (рис. 1). IDEF0-диаграммы хорошо себя зарекомендовали как функциональный инструмент, учитывающий связи типа “Вход”, “Выход”, “Управление”, “Механизмы”. UML AD диаграммы – как инструмент разработки программных средств в части алгоритмов. В тех случаях, когда нет необходимости учитывать управление и механизмы в IDEF0, а необходимо лишь отслеживать потоки, передаваемые одним процессом другому, строится UML AD диаграмма.

Принцип ансамбля гибридных динамических потоков проектных работ, заключающийся в использовании гетерогенных типов и распределенности в пространстве гибридных динамических потоков проектных работ крупного проектного предприятия требует преемственности объектно-ориентированного подхода к преобразованию этих работ при композиции оркестровки и хореографии, обеспечивает выразительность диаграмматических языков при проектировании автоматизированных систем, интенсивно использующих время [30-37].

### Темпоральная автоматная грамматика. Алгебраическая модель проектных процессов

RVT-грамматикой [30-37] 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 (магазин или эластичная лента);  $\Sigma = \{a_l, l = \overline{1, T}\}$  – алфавит событий;  $\tilde{\Sigma} = \{\tilde{a}_n, n = \overline{1, \tilde{T}}\}$  – квазитерминальный алфавит, являющийся расширением терминального алфавита;  $C$  – множество идентификаторов часов;  $E$  – множество темпоральных отношений 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  $r_i = \{P_{ij}, j = \overline{1, J}\}$ ;  $\tau = \{t_l, l = \overline{1, T}\}$  – множество темпоральных меток, причем  $\tau \subseteq C \times E$ ;  $r_0 \in R$  – аксиома RVT-грамматики (имя начального комплекса продукций),  $r_k \in R$  – заключительный комплекс продукций. Продукция  $P_{ij} \in r_i$  имеет вид  $(a_l, t_l) \xrightarrow{W_v(\gamma_1, \dots, \gamma_n)} r_m$ , где  $W_v(\gamma_1, \dots, \gamma_n)$  –  $n$ -арное отношение, определяющее вид операции над внутренней памятью в зависимости от  $v = \{1, 2, 3\}$  (1 – запись, 2 – чтение, 3 – сравнение);  $(a_l, t_l)$  – слово в виде пары: события и темпоральной метки;  $r_m \in R$  – имя комплекса продукции-преемника. Язык данной грамматики содержит слова вида  $(a_l, t_l)$  и представляет трассу  $\sigma = \{a_0\} \rightarrow \{a_l, t_l\} \rightarrow \{a_k\}$ .

Метод анализа структурно-параметрической корректности диаграмматических моделей гибридных динамических потоков проектных работ заключается в считывании содержания всех магазинов и эластичных лент по окончании анализа. При пустых магазинах ошибок в моделях нет.

Темпоральный проектный процесс представим в алгебраическом виде как:  $P^{TEMP} = (E, L(G))$ , где  $E = \{e_l, l = \overline{1, L}\}$  – множество событий алфавита грамматики  $\Sigma$ ;  $L(G)$  – темпоральный язык, представляющий последовательность темпоральных слов.  $N$  параллельных процессов представим в виде  $\prod_{i=1}^N P^{TEMP}$ . Темпоральные процессы  $i$  и  $j$  эквивалентны, если их языки одинаковы:  $L(G)_i^{P^{TEMP}} = L(G)_j^{P^{TEMP}}$ . Синтез нового процесса представляется как преобразование существующего процесса в плане изменения (замены) событий  $E$  с соответствующим изменением языка  $L(G)$ .

Принцип адаптивного проектирования, заключающийся в непрерывном по времени структурно-параметрический анализе и синтезе гибридных динамических потоков проектных работ крупного предприятия при разработке, внедрении и сопровождении автоматизированных систем обеспечивает повышение эффективности в плане уменьшения времени простоя производства, повышении качества проектных решений с помощью расширения класса ошибок диаграмматических моделей, что способствует повышению успешности предприятия [30-37].

### Метод преобразование проектных процессов

Динамическая реконфигурация бизнес-процессов требует наличия механизма преобразования диаграмм для достижения гибкости, улучшения функциональности и повышения эффективности существующего бизнес-процесса предприятия. В работах [1-3] проблема реконфигурации была глубоко исследована и с теоретической и с практической точки зрения. Авторами предлагается применять преобразование структуры диаграммы с помощью процедур удаления, вставки и замены с сохранением связности в течение (до, после и т.п.) конкретного времени. Необходимо, чтобы все графические примитивы имели время-метку, по которой определяется время преобразования диаграммы. Как правило в BPMN, eEPC, IDEF0, UML AD и т.п. графические примитивы содержат описание (примечание в UML AD), которые можно определить, как переменную времени. Рассмотрим пример UML AD диаграммы (рис. 2).

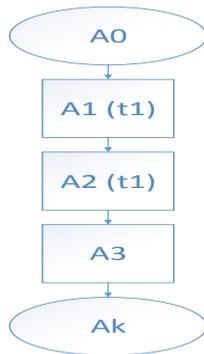


рис. 2. UML AD диаграмма с меткой

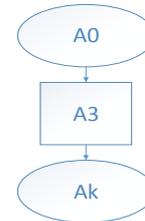


рис. 3. Удаление элементов в диаграмме

Графические примитивы (элементы)  $A_1$  и  $A_2$  имеют временные метки  $t_1$ . Это означает, что в определённый момент времени  $t_1$ , с данными элементами будут произведены определенные преобразования (операция): (1) Вставка, (2) Замена и (3) Удаление. Логично предположить, что в один промежуток времени над одним элементом может выполняться лишь одна операция. Поэтому для каждой временной метки будет отведена лента, на которой для одного элемента будет возможность указать три варианта: 1 – Вставка, 2 – Замена, 3 – Удаление. Дополнительная информация при операции Вставки/Замены будет храниться в расширенной ленте, позволяющей хранить не просто числа, а множество квазитермов. Для операции 1 будем использовать дополнительную функцию  $insert()$ , позволяющую извлечь необходимую информацию из расширенной ленты, и за счет подграмматики сформировать вставляемый фрагмент. Операция 2 является комплексной операцией и представляет собой совокупность операций удаления и вставки. Для этого вводится дополнительная функция  $getlase()$ . На начальном этапе рассматривается удаление. В результате в момент времени  $t_1$  диаграмма принимает вид (рис. 3).

Цепочка из удаляемых элементов может быть сколь угодно длинная. Для выполнения удаления будем использовать следующий способ. Если встречается элемент с отмеченной временной меткой, то ссылка на этот элемент заносится в магазин. Далее автомат следует по элементам пока не встретит элемент с отсутствием временной метки. В таком случае выполняется специальная функция  $change\_rel()$ , которая «достаёт» из магазина ссылку на первоначально удаляемый элемент и привязывает ее к текущему элементу (рис. 4).

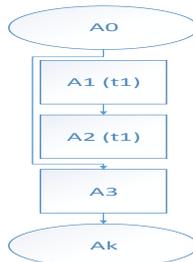


рис. 4. Переназначение связей при удалении элемента

Для того, чтобы не оставлять удаленные элементы висящими на диаграмме при прохождении удаляемых квазитермов, выполняется функция delete(), которая удаляет элемент из диаграммы. Отдельно стоит ввести функцию delete\_with\_link(). Она будет производить удаление элемента вместе с входящей связью. Грамматика для такой диаграммы представлена в таблице 3.

Таблица 3

Темпоральная RVT-грамматика для UML AD

Предыдущее Состояние	Квазитерм	След. Состояние	Операция
$\Gamma_0$	$A_{0i}$	$\Gamma_1$	insert() $\backslash W_3(k^{(1)}==1)$
	$A_0$	$\Gamma_1$	o
$\Gamma_1$	rel	$\Gamma_2$	o
$\Gamma_2$	$A_i$	$\Gamma_1$	insert() $\backslash W_3(k^{(1)}==1)$
	$A_r$	$\Gamma_1$	replace() $\backslash W_3(k^{(1)}==2)$
	$A_d$	$\Gamma_3$	(delete(), $W_1(l^{(1m)})$ ) / $W_3(k^{(1)}==3)$
	A	$\Gamma_1$	o
	$A_k$	$\Gamma_5$	o
$\Gamma_3$	drel	$\Gamma_4$	o
$\Gamma_4$	$A_i$	$\Gamma_1$	(change_rel(),insert()) $\backslash W_3(k^{(1)}==1)$
	$A_r$	$\Gamma_1$	(change_rel(), replace()) $\backslash W_3(k^{(1)}==2)$
	$A_d$	$\Gamma_3$	delete_with_link() $\backslash W_3(k^{(1)}==3)$
	A	$\Gamma_1$	change_rel()
	$A_k$	$\Gamma_5$	change_rel()
$\Gamma_5$	no_label	$\Gamma_k$	*

### Выводы

Предложен подход для анализа и синтеза моделей гибридных динамических потоков работ, который назван грамматико-алгебраическим. Принципами подхода являются принцип представления потоков работ в виде ансамбля (оркестровки и хореографии), заключающийся в использовании гетерогенных типов и распределённости в пространстве потоков проектных работ, и принцип адаптивного проектирования, заключающийся в непрерывном по времени структурно-параметрический анализе и синтезе потоков проектных работ крупного предприятия при разработке, внедрении и сопровождении автоматизированных систем.

Предложен метод анализа моделей потоков работ на основе автоматной временной RVT-грамматики, разработана алгебраическая модель проектного процесса на базе темпоральной грамматики, представлено преобразование проектных диаграмм с целью их корректировки и нейтрализации «сбойных» блоков.

Дальнейшее направление исследований связано с выявлением классов типовых структурно-поведенческих ошибок в диаграмматике потоков работ и формированием чеклиста таких ошибок.

### Литература

1. Afanasyev A., Voit N. Intelligent Agent System to Analysis Manufacturing Process Models //Proceedings of the First International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry"(IITI'16). – Springer International Publishing, 2016. – С. 395-403.
2. 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"(IITI'16). – Springer International Publishing, 2016. – С. 227-236.
3. 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.
4. 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. – С. 285-288.
5. Afanasev A.N. , Voit N.N., Voevodin E.Yu., Gainullin R.F. Analysis of Diagrammatic Models in the Design of Automated Software Systems // Object Systems – 2015: Proceedings of X International Theoretical and Practical Conference (Rostov-on-Don, 10-12 May, 2015) / Edited by Pavel P. Oleynik. – Russia, Rostov-on-Don: SI (b) SRSPU (NPI), pp. 124-129 (2015)
6. Карпов Ю. Г. MODEL CHECKING. Верификация параллельных и распределенных программных систем. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 560 с.
7. Верификация программы и темпоральные логики. URL: <http://logic.pdmi.ras.ru/~yura/modern/034.pdf> (дата обращения: 13.11.2017)
8. 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/> (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. Kruchten P. The rational unified process: an introduction. – Addison-Wesley Professional, 2004.
12. Booch, G., Jacobson, I. & Rumbaugh, J. The Unified Modeling Language User Guide. Addison-Wesley, 1998.
13. Booch, G. Object-oriented Analysis and Design with Applications, 2nd edition. Addison-Wesley, 1994.
14. HOORA's homepage. URL: <http://www.hoora.org/> (дата обращения: 13.11.2017)
15. Jacobson I. Object-oriented software engineering: a use case driven approach. – Pearson Education India, 1993.
16. Rumbaugh J. et al. Object-oriented modeling and design. – Englewood Cliffs, NJ : Prentice-hall, 1991. – Т. 199. – №. 1.

17. Gilb, T. Competitive Engineering. Addison-Wesley, 2003.
18. Shlaer S. Object-oriented systems analysis //Modeling the World in Data. – 1988.
19. Heninger K. L. et al. Software requirements for the a-7 e aircraft. – 1978.
20. Alford M. W. A requirements engineering methodology for real-time processing requirements //IEEE Transactions on Software Engineering. – 1977. – № 1. – С. 60-69.
21. Andriole, S. Storyboard Prototyping for Systems Design: A New Approach to User Requirements Analysis. Q E D Pub Co, 1989.
22. Marca, D.A. & McGowan, C.L. SADT: Structured Analysis and Design Techniques. McGraw-Hill, 1988.
23. Parviainen, Päivi, et al. Requirements engineering inventory of technologies. –VTT PUBLICATIONS, 2003.
24. YAHODA.URL: <http://web.archive.org/web/20120220001353/http://anna.fi.muni.cz/yahoda/> (дата обращения: 13.11.2017)
25. CPN Tools. URL: <http://cpntools.org> (дата обращения: 13.11.2017)
26. Roméo. URL: <http://romeo.rts-software.org> (дата обращения: 13.11.2017)
27. TimesTool. URL: <http://www.timestool.com/documentation.shtml> (дата обращения: 13.11.2017)
28. Tina Toolbox. URL: <http://projects.laas.fr/tina/> (дата обращения: 13.11.2017)
29. Visual Object Net++. URL: <https://www.techfak.uni-bielefeld.de/~mchen/BioPNML/Intro/VON.html> (дата обращения: 13.11.2017)
30. 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.
31. Афанасьев А.Н., Войт Н.Н. Анализ и контроль динамических распределенных потоков работ при проектировании сложных автоматизированных систем (САС) // В сборнике: Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2016) труды XVI-ой международной молодежной конференции. – 2016. – С. 97-101.
32. Афанасьев А.Н., Войт Н.Н., Гайнуллин Р.Ф., Бригаднов С.И., Хородов В.С., Шаров О.Г. Метакомпилятор RV-грамматик // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2016. – № 4 (76). – С. 48-52.
33. Афанасьев А.Н., Войт Н.Н. Интеллектуальная агентная система анализа моделей потоков проектных работ // Автоматизация процессов управления. – 2015. – № 4. – С. 42.
34. Афанасьев А.Н., Войт Н.Н., Воеводин Е.Ю., Гайнуллин Р.Ф. Анализ диаграмматических моделей в процессе проектирования автоматизированных систем // Объектные системы. – 2015. – № 10 (10). – С. 124-129.
35. Войт Н.Н., Гордеев В.А., Савичева Ю.А. Разработка RV-грамматики для диаграммного языка SHAREPOINT // В сборнике: Информатика, моделирование, автоматизация проектирования Сборник научных трудов VII Всероссийской школы-семинара аспирантов, студентов и молодых ученых (ИМАП-2015). – 2015. – С. 111-121.
36. Афанасьев А.Н., Войт Н.Н. Автоматная временная грамматика для управления объектами киберфизических систем // В книге: десятая всероссийская мультиконференция по проблемам управления МКПУ-2017 Материалы 10-й Всероссийской мультиконференции. В 3-х томах. Ответственный редактор: И.А. Каляев. – 2017. – С. 20-22.
37. Афанасьев А.Н., Войт Н.Н., Уханова М.Е., Ионова И.С., Епифанов В.В. Анализ конструкторско-технологических потоков работ в условиях крупного радиотехнического предприятия // Радиотехника. –2017. – № 6. – С. 49-58.