

УДК 004

## **ГРАММАТИКО-АЛГЕБРАИЧЕСКИЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ И СИНТЕЗУ ДИАГРАММАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ГИБРИДНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ ПРОЕКТНЫХ РАБОТ**

© Авторы, 2017

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2017

**А.Н. Афанасьев**, д.т.н., профессор, первый проректор – проректор по ДиДО, Ульяновский государственный технический университет

E-mail: [a.afanasev@ulstu.ru](mailto:a.afanasev@ulstu.ru)

**Н.Н. Войт**, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Вычислительная техника», Ульяновский государственный технический университет

E-mail: [n.voit@ulstu.ru](mailto:n.voit@ulstu.ru)

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, Saarlaut AG отмечают, что промышленность и техника (прогресс) движутся слишком быстро и требования к ним меняются с высокой интенсивностью, а традиционные (монокитные) методы уже не могут управлять жизненным циклом продуктов и рабочих процессов проекта.

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.

**Ключевые слова:** грамматика, язык, диаграмматика, временной автомат, темпоральная логика, анализ, синтез, контроль, моделирование, хореография, оркестровка, бизнес-процессы, потоки работ.

Design companies often have to dynamically reconfigure their internal processes to improve the efficiency of business workflow. However, changing the workflow usually leads to several problems (deadlocks) from the point of view of degree of freedom, completeness and security solutions. Therefore, the design, analysis, control and modeling of dynamic workflows is an important task in connection with the necessity of rapid response to changing business situation. The dynamic devel-

opment of complex automated systems related to adapting work processes to changes in system requirements. It is considered that the flexibility (agility) of the enterprise / business as a property enterprise operates in a dynamic world, this enterprise has developed in two trajectories: 1) to adapt to changes in the environment; 2) discover new opportunities constantly appearing in the dynamic world for launching completely new products (services). The implementation of flexibility requires a new approach that allows project managers to detect changes and opportunities for the development of complex automated systems and to influence them accordingly. The necessity of this approach emerged when the rate of change of development has increased. Large corporations Whitestein Technologies, Magenta Technologies, SkodaAuto, Volkswagen, Saarlouis AG note that industry and technology (progress) were moving too fast and demands are high intensity, and traditional (monolithic) methods can no longer manage product life cycle and project workflows.

The paper addresses the problem of hybrid dynamic workflows of design in a large engineering organizations, an overview of the methods of orchestration and choreography as an integral component of the ensemble with the purpose of their further analysis in terms of workflow through the author's temporal automaton RVT-grammar, and developed new grammatical-algebraic approach to the analysis and synthesis diagrammatically models of hybrid dynamic design workflow in a large design organization if you design and technological preparation of production, including the system of principles, models, methods, and RVT-grammar, using the concept of time and is responsible for the management of errors, recovery failed diagrams.

**Key words:** grammar, language, diagrammatic, timed automaton, temporal logic, analysis, synthesis, control, modelling, choreography, orchestration, business process, workflow.

## **Введение**

«В настоящее время предприятиям часто приходится динамически перенастраивать 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» [1]. 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. «Мы считаем гибкость предприятия / бизнеса как свойство предприятия функционировать в динамично развивающемся мире» [2], при этом предприятия реализуют два пути: 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. Например, в работе [3] автор пишет: «Промышленность и техника движутся слишком быстро, требования меняются по темпам, которые 'топят' традиционные методы».

Корпорации Whitestein Technologies, Magenta Technologies, SkodaAuto, Volkswagen, Saarstahl AG отмечают, что первое поколение статических систем управления жизненным циклом продуктов и рабочих процессов проекта [4] больше не может удовлетворять требованиям многих компаний, подходам и ав-

томатическим инструментам первого поколения проекта, стандартизация рабочего процесса уже исчерпала свои ресурсы, и, как результат, существуют слабо оформленные (некачественные) процессы, стимулирующие рост расходов на их развитие и улучшение.

Авторы использовали определение, приведенное в [5], для динамического рабочего процесса – рабочий процесс, адаптированный к изменениям окружающей среды. ProBis [6] считается традиционной системой управления рабочими процессами. Динамические системы управления рабочими процессами проекта в соответствии с работами [7-9] включают YAWL (еще один язык Workflow) и iPB. 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.

### **Смежные работы**

Анализом и контролем проектных потоков работ занимаются научные школы ГУВШЭ, МГТУ СТАНКИН, МВТУ им. Н.Э. Баумана, УлГТУ, ПОМИ 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. [10-14], Карпов

Ю.Г.[15], Соснин П.И., Лифшиц Ю. [16], Ярушкина Н.Г., Калянов Г.Н. [17], Ко-нев Б. Ю., Шалыто А. А., Савенков К., Кулямин В. В. (Россия), а также Neda Saeedloei, Gopal Gupta [18], Кларк Э.М., Буч Г.(США), Yuan Wang, Yushun Fan [19] (Китай). Проектирование и обработка потоков работ связаны с технологией Rational Unified Process (RUP) [20], методологией PBWD, языками моделирования Unified Model Language (UML) [21], extended Event Driven Process Chain (eEPC), BPMN, IDEF0, IDEF3, Amber, Promela, YAWL, the Booch Methodology [22], Hierarchical Object Oriented Requirement Analysis (HOORA) [23], Jacobson Method [24], Object Modeling Technique (OMT) [25], Planguage [26], Shlaer-Mellor Object-Oriented Analysis Method [27], Software Cost Reduction requirements method (SCR) [28], Software Requirements Engineering Methodology (SREM) [29], Story-board Prototyping [30], Structured Analysis and Design Technique (SADT) [31], 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)) [32].

Карпов Ю.Г. в работе [15] использует подход Model Checking для анализа, контроля, моделирования и реинжиниринга бизнес-процессов, в котором главным недостатком является исследование модели, а не самой системы, поэтому возникает вопрос об адекватности модели к системе, при этом сложность решения перечисленных выше задач является экспоненциальной. В работе Neda Saeedloei and Gopal Gupta [18] применен темпоральный автомат, реализующий

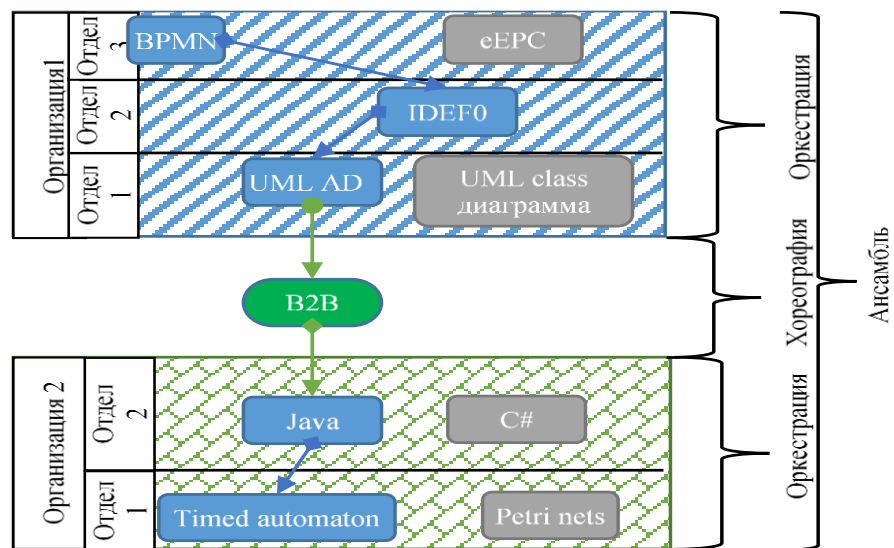
темпоральную контекстно-свободную грамматику, для анализа кибер-физических систем с последующим переводом этой грамматики в программу для интерпретатора Prolog. Yuan Wang and Yushun Fan [19] предлагают использовать темпоральную логику действий для описания потоков работ в графовой форме, что требует описания всех маршрутов графа в формулах темпоральной логики действий. При этом применяется 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 нерешенным. База инструментальных средств анализа и контроля кибер-физических систем, а также потоков работ доступна по адресу [33]. Кроме этого, имеются хорошие инструменты CPN Tools [34], «Roméo - A tool for Time Petri Nets analysis» [35], TimesTool [36], Tina Toolbox [37], Visual Object Net++ [38].

### **Ансамбль потоков проектных работ**

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 диаграмм 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 оркестровки

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 [39-46].

### **Потоки проектных работ в методологии eEPC**

Как правило, бизнес-процессы, в том числе потоки проектных работ, представляются в виде диаграмматических моделей с помощью графических языков моделирования eEPC, UML, BPMN, IDEF0 в инструментальных средах IBM, Whitestien Technologies, ARIS, OMG и др.

Темпоральные характеристики проектных процессов являются наиболее важными при конструкторской и технологической подготовке производства в

случае управления сроками разработки и реализации изделий. Методология eEPC компании-разработчика ARIS полностью представляет временные характеристики проектных процессов по сравнению с UML, IDEF0, BPMN. Событие и Функция являются основными сущностями в этой методологии, причем Событие представлено мгновением, а Функция – длительным процессом принятия решения. События имеют папку Frequency с атрибутами частот появления событий, а Функции – папку Simulation с атрибутами длительности принятия решения. Логические операторы “И” –  $\wedge$ , “ИЛИ” –  $\vee$ , “ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ” –  $\otimes$  в методологии являются управляющими функциями потоков работ процесса.

Рассмотрим Пример 1 – "Процесс согласования конструкторской документации": *типовой процесс согласования конструкторской документации на изделие занимает 3 дня и содержит этапы “начало”, “в работе”, “контроль”, “доработки”, “согласован”, “конец”* – с помощью диаграмматической модели в методологии eEPC (рис. 2).

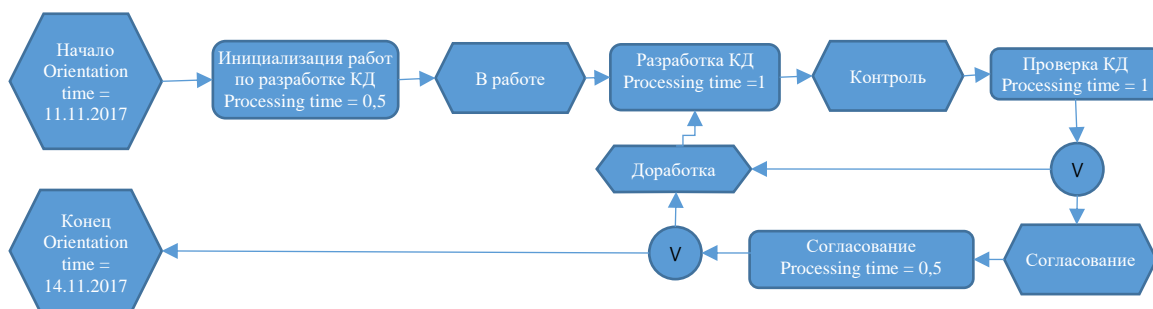


Рис. 2. Процесс согласования конструкторской документации  
в методологии eEPC

В модели на рис. 2 имеются атрибуты Processing time (длительность потока) в Функциях (суммирование их значений дает 3), а также Orientation time (время начала и конца процесса) в событиях Начало и Конец.

Авторами разработан математический аппарат анализа временных (темпоральных) особенностей проектных процессов в виде диаграмматических моделей гибридных динамических потоков проектных работ с помощью авторской темпоральной автоматной грамматики с внутренней памятью, обеспечивающей адаптивный процесс проектирования в плане динамической реорганизации параллельных конструкторских и технологических проектных процессов подготовки производства в условиях крупного предприятия с целью устранения проста информационно-технических средств производства, сокращения сроков изготовления изделий.

### **Темпоральная автоматная грамматика с внутренней памятью**

RVT-грамматикой [39-46] 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  $(a_l, t_l) \xrightarrow{W_\nu(\gamma_1, \dots, \gamma_n)} r_m$ , где

$W_\nu(\gamma_1, \dots, \gamma_n)$  –  $n$ -арное отношение, определяющее вид операции над внутренней памятью в зависимости от  $\nu = \{1, 2, 3\}$  (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

$\sigma = \{a_0\} \rightarrow \{a_l, t_l\} \rightarrow \{a_k\}$ .

Разработаем грамматику для примера 1. Алфавитом событий процесса согласования является множество

$\Sigma = \{\text{Начало, В работе, Контроль, На доработку, Согласование, Конец}\}$ .

$\Sigma = \{B, W, C, I, A, E\}$ . Определим матрицу паросочетаний квазитермов (таблица 1).

Таблица 1. Матрица паросочетаний квазитермов грамматики

	r0	r1	r2	r3	r4	rk
	B	W	C	I	A	E
r0	B	1				
r1	W		1			
r2	C			1	1	
r3	I				1	
r4	A			1	1	
rk	E					

Один магазин  $1m$  и одна эластичная лента  $1t$  используются в грамматике как внутренняя память. Временная метка  $tm$  заносится в ленту. В таблице 2 приведена RVT-грамматика примера 1.

Таблица 2. RVT-грамматика к примеру 1

Комплекс-источник	Квазитерм	Комплекс-приёмник	Отношение
$r_0$	B	$r_1$	$W_1(1^{1m}), W_1(tm^{1t})$
$r_1$	W	$r_2$	$W_1(2^{1m})/W_3(c \leq tm^{1t})$
$r_2$	C	$r_3$	$W_1(3^{1m})/W_3(c \leq tm^{1t})$
$r_2$	C	$r_4$	$W_2(3^{1m})/W_3(c \leq tm^{1t})$
$r_3$	I	$r_4$	$W_2(3^{1m})/W_3(c \leq tm^{1t})$
$r_4$	A	$r_3$	$W_2(3^{1m})/W_3(c \leq tm^{1t})$
$r_4$	A	$r_k$	$W_2(2^{1m})$
$r_k$	E		$W_2(1^{1m})$

Экземпляром трассы примера 1 является следующая последовательность квазитермов:  $\{B\} \rightarrow \{W\} \rightarrow \{C\} \rightarrow \{I\} \rightarrow \{A\} \rightarrow \{E\}$ . Причем по окончании струк-

турно-параметрического анализа процесса с помощью данной грамматики магазина должны быть пустыми, а лента содержать временную метку. В случае наличия '1', '2' или '3' в магазине  $1m$  в данном процессе имеется ошибка, обусловленная неправильным порядком или отсутствием нужного события (квазистерма) во входной последовательности грамматики.

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.

### **Алгебраическая модель проектных процессов**

Темпоральный проектный процесс представим в алгебраическом виде как:

$$P^{TEMP} = (E, L(G)), \quad (1)$$

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  $\parallel_{i=1}^N P^{TEMP}$ .

Темпоральные процессы  $i$  и  $j$  эквивалентны, если их языки одинаковы:

$$L(G)_i^{P^{TEMP}} = L(G)_j^{P^{TEMP}}. \quad (2)$$

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 [39-46].

### **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 [10-13] 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. 3).

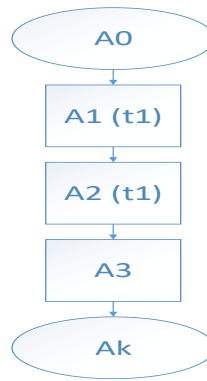


Рис. 3. UML AD диаграмма с меткого времени  $t_1$

Графические примитивы (элементы)  $A_1$  и  $A_2$  имеют временные метки  $t_1$ . Это означает, что в определенный 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 `replace()`. На начальном этапе рассматривается удаление. В результате в момент времени  $t_1$  диаграмма принимает вид, показанный на рис. 4.



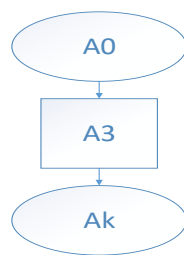


Рис. 4. Удаление элементов в диаграмме

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 «достает» из магазина ссылку на первоначально удаляемый элемент и привязывает ее к текущему элементу. Процесс изображен на рис. 5.

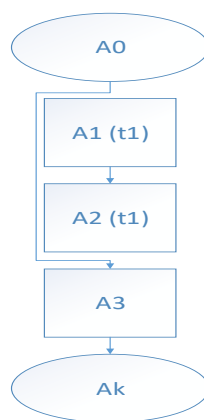


Рис. 5. Переназначение связей при удалении элемента

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
r <sub>0</sub>	A0i	r <sub>1</sub>	insert()/W <sub>3</sub> (k <sup>t(1)</sup> ==1)
	A0	r <sub>1</sub>	o
r <sub>1</sub>	rel	r <sub>2</sub>	o
r <sub>2</sub>	Ai	r <sub>1</sub>	insert()/W <sub>3</sub> (k <sup>t(1)</sup> ==1)
	Ar	r <sub>1</sub>	replace()/W <sub>3</sub> (k <sup>t(1)</sup> ==2)
	Ad	r <sub>3</sub>	(delete(), W <sub>1</sub> (l <sup>1m</sup> ))/ W <sub>3</sub> (k <sup>t(1)</sup> ==3)
	A	r <sub>1</sub>	o
	Ak	r <sub>5</sub>	o
r <sub>3</sub>	drel	r <sub>4</sub>	o
r <sub>4</sub>	Ai	r <sub>1</sub>	(change_rel(),insert())/W <sub>3</sub> (k <sup>t(1)</sup> ==1)
	Ar	r <sub>1</sub>	(change_rel(), replace()) /W <sub>3</sub> (k <sup>t(1)</sup> ==2)
	Ad	r <sub>3</sub>	delete_with_link()/W <sub>3</sub> (k <sup>t(1)</sup> ==3)
	A	r <sub>1</sub>	change_rel()
	Ak	r <sub>5</sub>	change_rel()
r <sub>5</sub>	no_label	r <sub>k</sub>	*

### Заключение

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 распределенности 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.

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.

## Литература

1. *Aguilar J. C. P. et al.* Model Checking of BPMN Models for Reconfigurable Workflows // arXiv preprint arXiv:1607.00478. – 2016. URL: [https://www.researchgate.net/publication/304788360\\_Model\\_Checking\\_of\\_BPMN\\_Models\\_for\\_Reconfigurable\\_Workflows](https://www.researchgate.net/publication/304788360_Model_Checking_of_BPMN_Models_for_Reconfigurable_Workflows) (дата обращения: 13.11.2017)
2. *Sherehiy B., Karwowski W., Layer J. K.* A review of enterprise agility: Concepts, frameworks, and attributes //International Journal of industrial ergonomics. – 2007. – Т. 37. – №. 5. – С. 445-460.
3. *Highsmith J., Orr K., Cockburn A.* E-business application delivery, pp 4-17. – 2000. URL: [www.cutter.com/freestuff/ead0002.pdf](http://www.cutter.com/freestuff/ead0002.pdf) (дата обращения: 13.11.2017)

4. A global Swiss company offering advanced intelligent application software for multiple business sectors, 2016. URL: <http://whitestein.com/> (дата обращения: 13.11.2017)
5. *Bider I., Jalali A.* Agile business process development: why, how and when -applying Nonaka's theory of knowledge transformation to business process development //Information Systems and e-Business Management. – 2016. – Т. 14. – №. 4. – С. 693-731. URL: <https://www.researchgate.net/publication/266078141> (дата обращения: 13.11.2017)
6. *Andersson T., Andersson-Ceder A., Bider I.* State flow as a way of analyzing business processes—case studies //Logistics Information Management. – 2002. – Т. 15. – №. 1. – С. 34-45.
7. YAWL Foundation, YAWL. 2004. URL: <http://www.yawlfoundation.org/> (дата обращения: 13.11.2017)
8. *Bider I.* Analysis of agile software development from the knowledge transformation perspective //International Conference on Business Informatics Research. – Springer, Cham, 2014. – С. 143-157.
9. IbisSoft, “iPB Reference Manual,” 2009. URL: <http://docs.ibissoft.se/node/3> (дата обращения: 13.11.2017)
10. *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.
11. *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.
12. *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.

13. *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.
14. *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)
15. *Карпов Ю. Г.* MODEL CHECKING. Верификация параллельных и распределенных программных систем. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 560 с.
16. Верификация программы и темпоральные логики. URL: <http://logic.pdmi.ras.ru/~yura/modern/034.pdf> (дата обращения: 13.11.2017)
17. *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)
18. *Saeedloei N., Gupta G.* Timed definite clause omega-grammars //LIPIcs-Leibniz International Proceedings in Informatics. – Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik, 2010. – Т. 7.
19. *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..
20. *Kruchten P.* The rational unified process: an introduction. – Addison-Wesley Professional, 2004.
21. *Booch, G., Jacobson, I. & Rumbaugh, J.* The Unified Modeling Language User Guide. Addison-Wesley, 1998.
22. *Booch, G.* Object-oriented Analysis and Design with Applications, 2nd edition. Addison-Wesley, 1994.
23. HOORA's homepage. URL: <http://www.hoora.org/> (дата обращения: 13.11.2017)

24. *Jacobson I.* Object-oriented software engineering: a use case driven approach. – Pearson Education India, 1993.
25. *Rumbaugh J. et al.* Object-oriented modeling and design. – Englewood Cliffs, NJ : Prentice-hall, 1991. – Т. 199. – №. 1.
26. *Gilb, T.* Competitive Engineering. Addison-Wesley, 2003.
27. *Shlaer S.* Object-oriented systems analysis //Modeling the World in Data. – 1988.
28. *Heninger K. L. et al.* Software requirements for the a-7 e aircraft. – 1978.
29. *Alford M. W.* A requirements engineering methodology for real-time processing requirements //IEEE Transactions on Software Engineering. – 1977. – №. 1. – С. 60-69.
30. *Andriole, S.* Storyboard Prototyping for Systems Design: A New Approach to User Requirements Analysis. Q E D Pub Co, 1989.
31. *Marca, D.A. & McGowan, C.L.* SADT: Structured Analysis and Design Techniques. McGraw-Hill, 1988.
32. *Parviainen, Päivi, et al.* Requirements engineering inventory of technologies. –VTT PUBLICATIONS, 2003.
33. YAHODA.URL: <http://web.archive.org/web/20120220001353/http://anna.fi.muni.cz/yahoda/> (датаобращения: 13.11.2017)
34. CPN Tools. URL: <http://cpntools.org> (дата обращения: 13.11.2017)
35. Roméo. URL: <http://romeo.rts-software.org> (дата обращения: 13.11.2017)
36. TimesTool. URL: <http://www.timestool.com/documentation.shtml> (дата обращения: 13.11.2017)
37. Tina Toolbox. URL: <http://projects.laas.fr/tina/> (дата обращения: 13.11.2017)
38. Visual Object Net++. URL: <https://www.techfak.uni-bielefeld.de/~mchen/BioPNML/Intro/VON.html> (дата обращения: 13.11.2017)

39. *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.
40. *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.
41. *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.
42. *Афанасьев А.Н., Войт Н.Н.* Интеллектуальная агентная система анализа моделей потоков проектных работ // Автоматизация процессов управления. – 2015. – № 4. – С. 42.
43. *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.
44. *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.
45. *Афанасьев А.Н., Войт Н.Н.* Автоматная временная грамматика для управления объектами киберфизических систем // В книге: десятая всероссийская мультikonференция по проблемам управления МКПУ-2017 Материалы 10-й Всероссийской мультikonференции. В 3-х томах. Ответственный редактор: И.А. Каляев. – 2017. – С. 20-22.

46. *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.

GRAMMAR-ALGEBRAIC APPROACH TO THE ANALYSIS AND SYNTHESIS DIAGRAMMATICALLY MODELS OF HYBRID DYNAMIC DESIGN WORKFLOWS

© Authors, 2017

© Radiotekhnika, 2017

**A.N. Afanasev** – Doctor of Engineering, Professor, First Vice-Rector, Vice-Rector of Distance and Further Education, Ulyanovsk State Technical University

E-mail: a.afanasev@ulstu.ru

**N.N. Voit** – Ph. D., associate Professor of the Department «Computing technique» of Ulyanovsk state technical University, Deputy Director on research work of Institute of distance and further education of Ulyanovsk state technical University

E-mail: n.voit@ulstu.ru

The authors have developed a new grammar-algebraic approach to the analysis and synthesis diagrammatically models of hybrid dynamic design workflows in a large design organization if you design and technological preparation of production, including the system of principles, models, methods, and grammar-intensive.

## References

1. Aguilar J. C. P. et al. Model Checking of BPMN Models for Reconfigurable Workflows // arXiv preprint arXiv:1607.00478. – 2016. URL: [https://www.researchgate.net/publication/304788360\\_Model\\_Checking\\_of\\_BPMN\\_Models\\_for\\_Reconfigurable\\_Workflows](https://www.researchgate.net/publication/304788360_Model_Checking_of_BPMN_Models_for_Reconfigurable_Workflows) (дата обращения: 13.11.2017)



2. Sherehiy B., Karwowski W., Layer J. K. A review of enterprise agility: Concepts, frameworks, and attributes //International Journal of industrial ergonomics. – 2007. – Т. 37. – №. 5. – С. 445-460.
3. Highsmith J., Orr K., Cockburn A. E-business application delivery, pp 4-17. – 2000. URL: [www.cutter.com/freestuff/ead0002.pdf](http://www.cutter.com/freestuff/ead0002.pdf) (дата обращения: 13.11.2017)
4. A global Swiss company offering advanced intelligent application software for multiple business sectors, 2016. URL: <http://whitestein.com/> (дата обращения: 13.11.2017)
5. Bider I., Jalali A. Agile business process development: why, how and when -applying Nonaka's theory of knowledge transformation to business process development //Information Systems and e-Business Management. – 2016. – Т. 14. – №. 4. – С. 693-731. URL: <https://www.researchgate.net/publication/266078141> (дата обращения: 13.11.2017)
6. Andersson T., Andersson-Ceder A., Bider I. State flow as a way of analyzing business processes—case studies //Logistics Information Management. – 2002. – Т. 15. – №. 1. – С. 34-45.
7. YAWL Foundation, YAWL. 2004. URL: <http://www.yawlfoundation.org/> (дата обращения: 13.11.2017)
8. Bider I. Analysis of agile software development from the knowledge transformation perspective //International Conference on Business Informatics Research. – Springer, Cham, 2014. – С. 143-157.
9. IbisSoft, “iPB Reference Manual,” 2009. URL: <http://docs.ibissoft.se/node/3> (дата обращения: 13.11.2017)
10. 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.
11. 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. – C. 227-236.
12. 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. – C. 1-4.
  13. 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. – C. 285-288.
  14. 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)
  15. Karpov Yu. G. MODEL CHECKING. Verification of concurrent and distributed software systems. – SPb.: BHV-Petersburg, 2010. – 560 p
  16. Verification program and temporal logic. URL: <http://logic.pdmi.ras.ru/~yura/modern/034.pdf> (cited by 13.11.2017)
  17. Kalyanov G.N. Modeling, analysis, reorganization and optimization of business processes / tutorial. — M.: finances and statistics, 2006. - 240 p. URL: <http://www.twirpx.com/file/2204790/> (cited by 13.11.2017)
  18. Saeedloei N., Gupta G. Timed definite clause omega-grammars //LIPIcs-Leibniz International Proceedings in Informatics. – Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik, 2010. – T. 7.
  19. 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. – C. 169-174..
  20. Kruchten P. The rational unified process: an introduction. – Addison-Wesley Professional, 2004.

21. Booch, G., Jacobson, I. & Rumbaugh, J. The Unified Modeling Language User Guide. Addison-Wesley, 1998.
22. Booch, G. Object-oriented Analysis and Design with Applications, 2nd edition. Addison-Wesley, 1994.
23. HOORA's homepage. URL: <http://www.hoora.org/> (дата обращения: 13.11.2017)
24. Jacobson I. Object-oriented software engineering: a use case driven approach. – Pearson Education India, 1993.
25. Rumbaugh J. et al. Object-oriented modeling and design. – Englewood Cliffs, NJ : Prentice-hall, 1991. – Т. 199. – №. 1.
26. Gilb, T. Competitive Engineering. Addison-Wesley, 2003.
27. Shlaer S. Object-oriented systems analysis //Modeling the World in Data. – 1988.
28. Heninger K. L. et al. Software requirements for the a-7 e aircraft. – 1978.
29. Alford M. W. A requirements engineering methodology for real-time processing requirements //IEEE Transactions on Software Engineering. – 1977. – №. 1. – С. 60-69.
30. Andriole, S. Storyboard Prototyping for Systems Design: A New Approach to User Requirements Analysis. Q E D Pub Co, 1989.
31. Marca, D.A. & McGowan, C.L. SADT: Structured Analysis and Design Techniques. McGraw-Hill, 1988.
32. Parviainen, Päivi, et al. Requirements engineering inventory of technologies. –VTT PUBLICATIONS, 2003.
33. YAHODA.URL: <http://web.archive.org/web/20120220001353/http://anna.fi.muni.cz/yahoda/> (датаобращения: 13.11.2017)
34. CPN Tools. URL: <http://cpntools.org> (дата обращения: 13.11.2017)
35. Roméo. URL: <http://romeo.rts-software.org> (дата обращения: 13.11.2017)
36. TimesTool. URL: <http://www.timestool.com/documentation.shtml> (дата обращения: 13.11.2017)

37. Tina Toolbox. URL: <http://projects.laas.fr/tina/> (дата обращения: 13.11.2017)
38. Visual Object Net++. URL: <https://www.techfak.uni-bielefeld.de/~mchen/BioPNML/Intro/VON.html> (дата обращения: 13.11.2017)
39. Afanasev A. N., Igonin A. G., Afanaseva T. V., Voit, N. N. Use neurosemantics networks for computer-aided design computing // Automation. Modern technology. – 2008. – No. 1. – P. 21-24. (in russia)
40. Afanasev A. N., Voit N. N. Analysis and control of dynamic distributed workflow in the design of complex automated systems (SAS) // In the book: System design, technological preparation of production and management stages of the life cycle of industrial product (CAD/CAM/PDM - 2016) proceedings of the XVI-th international youth conference. – 2016. – P. 97-101. (in russia)
41. Afanasev A. N., Voit N. N., Gainullin R. F., Brigadnov S. I., Gorodov V. S., Sharov O. G. Metacompilation RV-grammars // Vestnik of Ulyanovsk state technical University. – 2016. – № 4 (76). – S. 48-52. (in russia)
42. Afanasev A. N., Voit N. N. Intelligent agent system analysis models design works // Automation of control processes. – 2015. – No. 4. – S. 42. (in russia)
43. Afanasev A. N., Voit N. N., Voevodin, Y. E., Gainullin R. F. Analysis diagrammatically models in the design process of automated systems // Object system. – 2015. – № 10 (10). – Pp. 124 to 129. (in russia)
44. Voit N. N., V. A. Gordeev, Yu. Savicheva A. Development of RV grammar for a diagram language SHAREPOINT // IN the collection: Informatics, modeling, design automation of Collection of scientific works of the VII all-Russian school-seminar for graduate students and young scientists (ИМАР-2015). – 2015. – P. 111-121. (in russia)
45. Afanasev A. N., Voit N. N. Automata-based temporal grammar to manipulate objects cyber-physical systems // In book: the tenth all-Russian multimedia conference on governance, мсрр-2017 the materials of the 10th all-Russian conference. In 3 volumes. Responsible editor: I. A. Kalyaev. – 2017. – Pp. 20-22. (in russia)

46. Afanasev A. N., Voit N. N., Ukhanova, M., Ionova, I. S., Epifanov V. V. Analysis of design-technological work streams in a large electronic company // Radiotekhnika. -2017. – No. 6. – P. 49-58. (in russia)

**Сведения об авторах статьи**

**ГРАММАТИКО-АЛГЕБРАИЧЕСКИЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ И СИНТЕЗУ ДИАГРАММАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ГИБРИДНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ ПРОЕКТНЫХ РАБОТ**

**Афанасьев Александр Николаевич**

ученая степень – доктор технических наук;

ученое звание – профессор;

должность – первый проректор – проректор по ДиДО УлГТУ;

число опубликованных научных работ – 600;

область научных исследований – проектирование автоматизированных систем

название организации, в которой работает автор – Ульяновский государственный технический университет;

полный адрес организации – Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32;

контактная информация для связи с авторами (телефон, адрес электронной почты),

E-mail: a.afanasev@ulstu.ru

**Войт Николай Николаевич**

ученая степень – кандидат технических наук;

ученое звание – доцент;

должность – доцент кафедры «Вычислительная техника» Ульяновского государственного технического университета, заместитель директора по НИР ИДДО Ульяновского государственного технического университета;

число опубликованных научных работ – 170;

область научных исследований – проектирование автоматизированных систем

название организации, в которой работает автор – Ульяновский государственный технический университет;

полный адрес организации – Россия, 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32;

контактная информация для связи с авторами (телефон, адрес электронной почты) – тел. 8(8422)77-88-46, n.voit@ulstu.ru.