

УДК 519.71:681.518

А.В. Козов

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИ РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ СИСТЕМЫ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ

Козов Алексей Владимирович, окончил кафедру «Системы автоматизированного проектирования» Московского государственного технического университета (МГТУ) им. Н.Э. Баумана, инженер НУЦ «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор публикаций в области автоматизации проектирования робототехнических систем управления. [e-mail: alexey.kozov@gmail.com].

Аннотация

Высокий уровень адаптивности является важным требованием к системе управления группой мобильных роботов при работе в недетерминированной изменяющейся среде. Система группового управления (СГУ) должна обеспечивать выполнение поставленной задачи в случаях изменения состояния среды или структуры объекта управления. Требуемый уровень адаптивности может быть достигнут за счёт динамической реконфигурации системы управления. Статья рассматривает различные подходы к математическому описанию динамически реконфигурируемой системы. Проведён обзор математических моделей систем с переменной структурой, реконфигурируемых систем управления и методологий их проектирования. Представлены теоретико-множественные, аналитические, дискретно-событийные модели систем с переменной структурой. Рассмотрены методы проектирования реконфигурируемых систем и их применимость для проектирования динамически реконфигурируемой СГУ. Показано, что существующие методы проектирования СГУ не позволяют в полной мере обеспечить требуемый уровень адаптивности и автономности. Проведено сопоставление процессов функционирования СГУ и реконфигурируемой многопроцессорной вычислительной системы. Предложено использование принципов построения реконфигурируемых вычислительных систем для повышения уровня адаптивности и автономности.

Ключевые слова: система управления, распределённая система, математическая модель, дискретно-событийная система, динамическая реконфигурация, мобильный робот, автоматизация проектирования.

doi: 10.35752/1991-2927-2021-1-63-130-139

MODELS AND DESIGNING METHODS FOR THE DYNAMICALLY RECONFIGURABLE GROUP CONTROL SYSTEM FOR MOBILE ROBOTS

Aleksei Vladimirovich Kozov, graduated from Bauman Moscow State Technical University of the Computer-Aided Design Systems Department; an engineer of the Center of Education and Research "Robotics" in BMSTU; an author of publications in the field of computer-aided design of robotic control systems. e-mail: alexey.kozov@gmail.com.

Abstract

High adaptability is an important requirement for the control system over a group of mobile robots operating in a nondeterministic changing environment. The group control system must ensure that the group task is completed when the structure of the group or the environment changes. Such adaptability can be achieved through dynamic reconfiguration of the control system. The article discusses the mathematical models of a dynamically reconfigurable system from the standpoint of computer-aided design. A review of mathematical models of variable structure system, reconfigurable control systems and their design methods is presented. The paper deals with set-theoretic, analytical, discrete-event models of variable structure systems and methodologies of designing reconfigurable systems. It is shown that the existing design methods do not fully provide the required adaptability of designed group control system. The paper compares the group control system and the reconfigurable multiprocessor computing system and shows how to increase adaptability and autonomy of designed control system using principles of reconfigurable computing systems designing.

Keywords: control system, distributed system, mathematical model, discrete-event system, dynamic reconfiguration, mobile robot, computer-aided design.

ВВЕДЕНИЕ

Мультиагентные робототехнические системы, объединяющие роботов-агентов под управлением единой системы группового управления (СГУ), позволяют повысить эффективность применения мобильных роботов. Для применения в областях, связанных с риском для человеческой жизни (например, подводные работы, ликвидация пожаров и последствий чрезвычайных ситуаций), СГУ должна соответствовать крайне высоким требованиям по быстродействию, отказоустойчивости, автономности, адаптивности. Такая система выполняет координацию действий агентов для выполнения поставленной задачи в условиях недетерминированной изменяющейся среды, часто при недостоверности или отсутствии априорной информации, и обеспечивает взаимодействие с человеком-оператором.

Проведённый в работах [1–3] анализ показывает, что группа мобильных роботов является целеустремлённой технической системой, а СГУ следует рассматривать как распределённую иерархическую реконфигурируемую систему. Для выделения иерархической структуры предложено разделение системы на уровни по их функциональному назначению [3]. Используем следующие обозначения (рис. 1): уровень формирования операции (**А**), уровень управления подгруппой (**Б**), уровень управления единичным роботом (**В**), уровень управления подсистемой робота (**Г**), уровень управления исполнительным устройством (**Д**). Указанное разделение на уровни соответствует такому способу постановки задачи группе роботов, при котором человек-оператор формирует замысел *групповой операции* на цифровой карте геоинформационной системы [4, 5]. Групповая операция является упорядоченной последовательностью *групповых действий* подгрупп, каждое групповое действие состоит из *индивидуальных действий* агентов, а индивидуальные действия представляют собой согласованную работу подсистем робота. Объект управления на верхних уровнях (**А**, **Б**, **В**) иерархической СГУ можно рассматривать как дискретно-событийную систему (ДСС) с переменной структурой, динамически меняющейся во время выполнения групповой операции: на уровне **А** группа может разделяться на несколько подгрупп, на уровне **Б** может происходить изменение состава подгрупп, а на уровне **В** – режимов функционирования отдельных роботов. Кроме того, изменение обстановки может потребовать оперативной коррекции замысла групповой операции человеком-оператором. СГУ должна иметь достаточный уровень автономности и адаптивности для того, чтобы продолжить выполнение групповой операции в описанных ситуациях. Обеспечение таких качеств возможно за счёт динамической реконфигурации верхних уровней СГУ [6]. На уровне **Б** динамическая реконфигурация системы потенциально способна повысить живучесть (как способность сохранять функциональность при различных внешних воздействиях) подгруппы, а на уровне **А** – повысить эффективность выполнения групповой операции, особенно

в случаях добавления или перераспределения членов подгрупп. Однако сложность проектирования и реализации подобных динамически реконфигурируемых систем управления ограничивает их практическое применение.



Рис. 1. Иерархические уровни СГУ

Снижение сложности и сокращение времени разработки верхних уровней СГУ как динамически реконфигурируемой системы возможно при помощи специализированных инструментов автоматизации проектирования, которые, однако, в настоящее время отсутствуют [3]. Создание таких инструментов требует формальных методов проектирования и математических моделей объекта проектирования, при этом на разных стадиях разработки модели должны отражать различные свойства объекта. На начальных стадиях для определения требований к СГУ и её функционально-структурного облика необходимы агрегированные математические модели, отражающие переменную структуру объекта управления. Для синтеза и верификации конкретных проектных решений необходимы модели и методы управления реконфигурируемыми дискретно-событийными системами.

Проведём анализ литературы для поиска математических моделей и методов проектирования реконфигурируемых систем, применимых на разных стадиях разработки верхних уровней СГУ. Сравним существующие методы проектирования по таким ключевым аспектам, как потенциал снижения трудоёмкости процесса разработки, уровень адаптивности и автономности проектируемой системы. Далее рассмотрены основные работы по следующим направлениям: математическое описание систем с переменной структурой, описание реконфигурируемых ДСС и методологий их проектирования.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМ С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

Теоретико-множественное описание переменной структуры сложных технических систем представлено в работах отечественных авторов [7–10]. В этих работах

использован термин «структурная динамика» для обозначения процессов изменения структуры системы во время её функционирования. В работах [7–9] рассмотрены проблемы проектирования и управления структурной динамикой информационных систем на примере распределённой системы управления космическими аппаратами. Для описания таких систем Б.В. Соколов, А.Н. Павлов и их соавторы используют мультиагентный подход и концепцию активного подвижного объекта как агента. Предложено теоретико-множественное описание структурной динамики системы в виде «динамического альтернативного мультиграфа»

$$G_{\alpha}^t = \langle X_{\alpha}^t, \Gamma_{\alpha}^t, P_{\alpha}^t \rangle,$$

где $\alpha = 1, 2, \dots, N$ – индекс, характеризующий тип структуры системы (топологическая, функциональная и пр.), N – число рассматриваемых типов структур; $t \in T$ – момент времени из линейно упорядоченного множества T моментов времени изменения структуры системы; X_{α}^t , Γ_{α}^t – множества вершин и дуг графа, соответствующих фиксированному типу структуры α в момент времени t и задающие её альтернативные варианты; P_{α}^t – множество весов, количественно характеризующих каждую дугу графа (её приоритет). Многоструктурное состояние S_{δ} с номером δ представлено как подмножество декартова произведения множеств вершин графов структур различных типов:

$$S_{\delta} \subseteq X_1^t \times X_2^t \times \dots \times X_N^t,$$

где $\cdot \times \cdot$ – декартово произведение множеств. Тогда изменение структуры системы можно определить как множество допустимых операций отображения многоструктурных состояний системы друг на друга в момент времени $t \in T$:

$$\Pi_{\langle \delta, \delta' \rangle}^t : S_{\delta} \rightarrow S_{\delta'},$$

а эволюцию структуры во времени – как последовательность (композицию) таких операций:

$$Y = \Pi_{\langle |T|, |T|+1 \rangle}^t \circ \Pi_{\langle |T|-1, |T| \rangle}^t \circ \dots \circ \Pi_{\langle 1, 2 \rangle}^t,$$

где $\cdot \circ \cdot$ означает композицию отображений, а $|\cdot|$ – мощность множества. Таким образом, задача управления структурной динамикой (т. е. реконфигурации) сведена к поиску такой композиции Y^* , которая обеспечивает оптимальный по некоторому критерию перевод системы из начального многоструктурного состояния в целевое. Аналогичный математический аппарат использует А.Н. Павлов для описания «структурно-функциональной реконфигурации» системы при выполнении технологических операций приёма, передачи, хранения и обработки ресурсов различного типа [10]. Такое математическое описание позволяет моделировать действия агентов с целью определения общих требований к групповому действию, а также применимо в системах поддержки принятия решений для организации групповой операции человеком-оператором.

Математическое описание процессов изменения структуры различных технических систем представлено в работах [11, 12], в которых А.Н. Кириллов вводит понятие системы с переменной размерностью. Им предложено математическое описание поведения сложной системы S , состоящей из n подсистем S_i , $i = 1, 2, \dots, n$, которые в процессе функционирования могут находиться в активном или пассивном режимах (активироваться и деактивироваться соответственно). Взаимосвязи между подсистемами характеризуют внутреннюю структуру системы. Вектор структуры $\gamma \in \mathbb{R}^n$ составляют элементы $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$, такие, что, если подсистема S_i в активном режиме, то $\gamma_i = 1$, иначе $\gamma_i = 0$. Структурную динамику системы описывает вектор $y(t) = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t))^T$, для каждого элемента $y_i(t) \in \mathbb{R}$ которого определены пороговые значения \tilde{y}_i такие, что $\gamma_i = 1$, если $y_i(t) > \tilde{y}_i$ и $\gamma_i = 0$, если $y_i(t) < \tilde{y}_i$, $i = 1, 2, \dots, n$. Таким образом, вектор $y(t)$, заданный, например, некоторой системой дифференциальных уравнений, описывает эволюцию системы S , а изменение значений элементов этого вектора характеризует изменение структуры системы. Кириллов приводит математическое описание операций увеличения и уменьшения размерности системы (активации и деактивации подсистем), а также выводит уравнения динамики системы. В работе [11] при помощи предложенного математического аппарата описана модель структурной динамики производственного объединения с изменяющимся в процессе функционирования числом предприятий.

Некоторые аналитические модели структурной динамики робототехнических систем представлены в монографии [13]. Например, приведено описание процесса кластеризации (выделения подгруппы) в группе роботов большой численности. Группа рассматривается как динамическая система, а процесс кластеризации – как переходный процесс в ней. Пусть N_1 – число роботов в кластере; N_2 – число роботов в остальной части группы; n_1^{\max} – требуемое число роботов в формируемом кластере; α_1, α_2 – «коэффициенты деградации» (число роботов, выходящих из строя в единицу времени, приведённое на один робот, в первом кластере и в остальной группе соответственно). N_1 и N_2 являются функциями времени: $N_1 = N_1(t)$, $N_2 = N_2(t)$, $t \geq 0$. Тогда структурная динамика системы может быть описана в виде уравнений

$$\dot{N}_1 = -\alpha_1 N_1 + \gamma_1 (n_1^{\max} - N_1),$$

$$\dot{N}_2 = -\alpha_2 N_2 - \gamma_1 (n_1^{\max} - N_1),$$

где \dot{N}_i , $i = 1, 2$ – производная по времени, а γ_1 – коэффициент роста кластера, определяющий скорость его формирования. Представленная аналитическая модель позволяет выполнить анализ устойчивости системы и

провести моделирование поведения группы при различных значениях параметров.

С точки зрения проектирования СГУ, описанные модели систем с переменной структурой необходимы при определении требований, функционального и структурного облика системы. Однако такие модели малоприменимы для практической реализации реконфигурируемой СГУ и не решают проблемы перевода замысла проектанта в формальное описание требуемого поведения – одной из основных проблем проектирования СГУ [3]. Поскольку верхние уровни СГУ (**А**, **Б**, **В**) представимы в виде ДСС, рассмотрим ряд работ практической направленности, посвящённых управлению, реконфигурации и методам проектирования таких систем.

РЕКОНФИГУРИРУЕМЫЕ ДСС

Рассмотрим далее задачу управления ДСС в следующей постановке. К поведению объекта управления (ДСС) предъявляются некоторые требования в виде спецификации – ограничений, накладываемых на поведение ДСС. Выполнение ограничений обеспечивает контроллер, встраиваемый в контур обратной связи таким образом, чтобы поведение системы из объекта управления и контроллера соответствовало спецификации. Для синтеза контроллеров ДСС часто применяют теорию супервизорного управления [14–19], где объект управления G рассматривают как генератор некоторого формального языка $L(G)$, а спецификацию – как подмножество этого языка $K \subseteq L(G)$. По модели объекта управления $L(G)$ и спецификации K выполняют синтез супервизора (контроллера) S , такого, что поведение G под управлением S соответствует спецификации: $L(S/G) = K$. Изменение объекта управления G или спецификации K влечёт необходимость синтеза нового супервизора.

Ситуация изменения спецификации поведения ДСС в процессе её функционирования рассмотрена в работе [20]. Объект управления представлен сетью Петри с множеством позиций $P = \{p_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, где $n = |P|$ – число позиций сети Петри, множеством переходов $T = \{t_j\}$, $j = 1, 2, \dots, m$, где $m = |T|$ – число переходов сети Петри, связывающей позиции и переходы матрицей инцидентности D размера n на m и начальной разметкой V_0 . Спецификация представляет собой линейные ограничения, задающие число меток в определённых позициях, и может быть представлена в следующих формах:

$$l_1 v_1 + l_2 v_2 + \dots + l_n v_n \leq b,$$

$$l_1 v_1 + l_2 v_2 + \dots + l_n v_n \geq b,$$

$$l_1 v_1 + l_2 v_2 + \dots + l_n v_n = b,$$

где v_i – число меток в позиции p_i во всех достижимых маркировках, l_i , b – целочисленные коэффициенты ограничений, $i = 1, 2, \dots, n$. Для рассматриваемой системы предложен простой алгоритм синтеза контроллера

и процедура его реконфигурации, обеспечивающая соблюдение спецификации ДСС при изменении коэффициентов ограничений (при неизменном числе ограничений) во время функционирования системы. Несмотря на простоту и эффективность предложенных процедур, этот подход не учитывает возможность изменения структуры объекта управления, что ограничивает его применение при проектировании верхних уровней СГУ.

Различные реализации возможности изменения структуры объекта управления во время функционирования ДСС представлены в работах [21–24]. В статье [21] предложен способ математического описания ДСС с переменной структурой, названный R-TNCES (Reconfigurable Timed Net Condition/Event System) и основанный на расширении математического аппарата NCES (Net Condition/Event System). Модели NCES [25], в отечественной литературе именуемые сетевыми системами «условие-событие» [26, 27], в свою очередь, являются расширением сетей Петри. Структура ДСС, описываемая при помощи R-TNCES, не может меняться произвольным образом, и её изменение должно приводить систему в одну из предварительно заданных конфигураций. Такое переключение конфигураций системы соответствует, например, изменению режима функционирования производственной системы. R-TNCES представляет собой кортеж $\langle \mathcal{B}, \mathcal{R} \rangle$, в котором компонент \mathcal{B} отвечает за поведение, а \mathcal{R} – за управление. Согласно [21],

$$\mathcal{B} = \langle P, T, F, W, C, E, D_C, V, Z_0 \rangle,$$

где P , T – множество позиций и множество переходов отдельных NCES, описывающих все возможные конфигурации системы; $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ – множество обычных дуг конфигураций; $W : (P \times T) \cup (T \times P) \rightarrow \{0, 1\}$ – функция весов дуг, если $a \in F$, то $W(a) = 1$, иначе $W(a) = 0$; $C \subseteq P \times T$, $E \subseteq T \times P$ – множество условных и событийных дуг конфигураций; $D_C : F \cap (P \times T) \rightarrow \{\langle l_i, h_i \rangle\}$, $l_i \in \mathbb{N}$, $h_i \in \mathbb{N}$, $l_i \leq h_i$, $i = 1, 2, \dots, |F \cap (P \times T)|$ – функция, задающая нижнее (l_i) и верхнее (h_i) временные ограничения на переходах (задержки срабатывания); $V : T \rightarrow \{AND, OR\}$ – функция, задающая режим (логическое условие) срабатывания перехода для событийных дуг; Z_0 – множество начальных разметок конфигураций. Временные ограничения определены следующим образом: при появлении метки в позиции $p \in P$ включается таймер этой позиции $D(p)$, при удалении метки таймер позиции сбрасывается. Таймеры всех позиций отсчитывают время с одинаковой скоростью, $D(p) \in \mathbb{N}$. Переход $t \in T$ с временными ограничениями $\langle l, h \rangle$ может сработать только в случае, если для его входных позиций p_i (т. е. $\forall p_i W(p_i t) = 1$) выполняется условие $l \leq D(p_i) \leq h$. Второй элемент

R-TNCES, модуль управления $\mathcal{R} = \{r_i\}, i = 1, 2, \dots, |\mathcal{R}|$, представляет собой множество «реконфигурационных функций» r_i , каждая из которых определяет условие реконфигурации, изменение структуры (исходную и целевую конфигурации) и состояние системы (маркировку и значения таймеров для каждой позиции в исходной и целевой конфигурациях). Статья [21] предлагает метод верификации моделей, описанных при помощи этого математического аппарата, и демонстрирует его использование на примере производственной системы.

В работе [22] предложен механизм координации распределённой реконфигурируемой системы, взаимодействующие компоненты которой описаны моделью R-TNCES. Статья [23] развивает и обобщает этот подход для ДСС, описываемых при помощи NCES. Показано использование математического аппарата NCES для описания компонентов модульных распределённых ДСС. Введено понятие виртуального контроллера реконфигурируемой ДСС, задача которого состоит в том, чтобы перевести систему при реконфигурации в требуемое состояние оптимальным образом (кратчайшей допустимой последовательностью срабатываний переходов). В работе [24] для моделирования поведения ДСС при изменении её структуры предложено использовать рекурсивные сети Петри, а также представлен метод для верификации таких моделей. Этот метод, как и ранее рассмотренные подходы, подразумевает, что все возможные изменения структуры системы описаны заранее.

Таким образом, предлагаемые в статьях [21–24] подходы к выполнению реконфигурации требуют предварительного описания всех возможных изменений структуры (конфигураций) системы. При проектировании верхних уровней СГУ это возможно лишь для простых ситуаций (например, выбывание агента из группы) и ведёт к необходимости формирования метамодели высокой размерности, что существенно усложняет процесс разработки. Проанализируем существующие методы проектирования реконфигурируемых систем с точки зрения их потенциала по снижению трудоёмкости процесса разработки и обеспечению адаптивности, а также автономности проектируемой системы управления.

МЕТОДОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ СИСТЕМ

В работах [28, 29] С. Ху и Б. Зейглер описывают собственную методологию проектирования распределённых робототехнических систем и демонстрируют её применение при разработке СГУ для выполнения группового действия следования за ведущим. Методология предполагает проектирование системы на базе объектно-ориентированных программных моделей при помощи фреймворка DEVS (Discrete Event System Specification) [30] и состоит из стадий моделирования, симуляции (тестирования в виртуальном окружении) и исполнения на реальном аппаратном обеспечении (роботах). На стадии моделирования путём комбинации

различных DEVS-моделей определяют структуру и поведение системы, после чего на стадии симуляции системе проверяют на корректность. Для проверки проводят несколько различных типов симуляции: централизованную (модели роботов и окружения обрабатывает один вычислительный узел), распределённую (каждую модель обрабатывает отдельный вычислительный узел), симуляцию с интеграцией целевого аппаратного обеспечения. Верифицированная таким образом система переносится на роботов, а модели «соотносятся» с реальными сенсорными и коммуникационными подсистемами. Предлагаемое решение задачи следования для группы из двух роботов представляет собой систему DEVS-моделей, обладающую переменной структурой – в процессе функционирования изменяются связи между моделями. Отметим, что это решение призвано продемонстрировать работу с фреймворком, а требуемые изменения связей между моделями должны быть заранее описаны (например, при помощи программной параметризации) и заложены в поведение моделей. Гибкость программных моделей и возможность параметризации существенно расширяют область их применения, однако такие модели требуют проработки своего математического описания, например, на базе теории категорий [31].

Определённый интерес представляет методология проектирования реконфигурируемых сетей беспроводных датчиков с использованием графической нотации UML (Unified Modeling Language), описанная в работе [32]. Статья посвящена «мультиагентной архитектуре» сети, которая динамически адаптирует своё поведение в соответствии с окружением. Такая сеть должна поддерживать несколько уровней реконфигурации – аппаратную (включение-выключение узлов сети), программную (изменение поведения узлов) и протокольную (изменение передаваемых между узлами сообщений). Для описания поведения узлов используются вложенные конечные автоматы. Методология включает два уровня – абстракции и реализации. Уровень абстракции содержит UML-описание программных моделей сущностей системы: датчиков и их элементов, узлов, управляющих и подчинённых агентов, а также абстрактных интерфейсов реконфигурации. Уровень реализации включает шаги составления требований, проработки архитектуры сети, валидации, тестирования в модельном окружении и генерации исходных текстов программ (рис. 2). При получении неудовлетворительных результатов на любом шаге, кроме последнего, происходит возврат на предыдущий шаг. Для описания поведения компонентов системы использована высокоуровневая параметризация моделей – описанные на уровне абстракции сущности и алгоритмы получают свою реализацию на шаге проектирования архитектуры. Такая высокоуровневая параметризация требует от проектанта не только максимально полного описания поведения агентов, но и тщательной проработки архитектуры системы. Это оправдано для рассматриваемой в работе предметной области (сеть беспроводных датчиков), по-

сколькo малая вычислительная мощность агентов ограничивает архитектурные решения. Гибкость, которая необходима при проектировании способной обеспечить выполнение широкого круга задач СГУ, может быть достигнута путём модификации данной методологии.

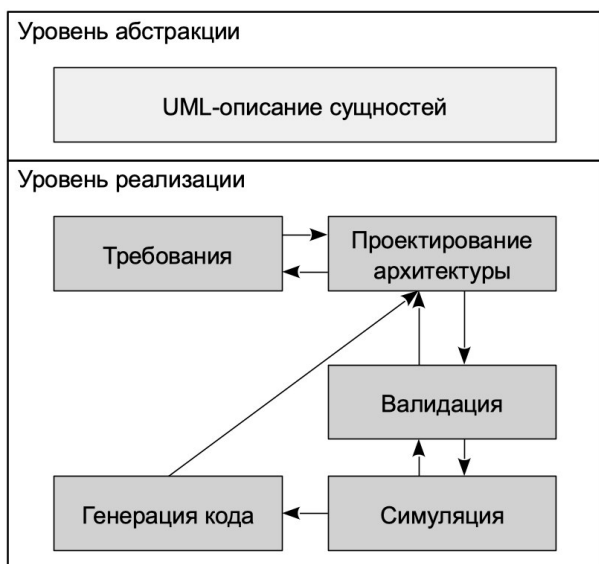


Рис. 2. Методология проектирования реконфигурируемых сетей беспроводных датчиков [32]

Таким образом, рассмотренные подходы к созданию реконфигурируемых систем управления основаны на предположении, что при проектировании системы возможно описать все варианты изменения её структуры в виде некоторой метамодели (аналитической, теоретико-множественной или программной). Подобное допущение априори не применимо при проектировании СГУ для мобильных роботов, действующих в недетерминированной изменяющейся среде. Число вариантов изменения структуры слишком велико, а описание даже относительно простых ситуаций, таких как выбывание агентов, ведёт к значительному увеличению размерности модели. Перечисленное означает, что рассмотренные подходы не способны обеспечить необходимый уровень автономности и адаптивности – возникновение в процессе выполнения групповой операции незаложенных в модели ситуаций потребует вмешательства человека-оператора. Рассмотрим способы повышения автономности и адаптивности, применяемые в области проектирования реконфигурируемых вычислительных систем (РВС) [33–36], и оценим их применимость при проектировании СГУ.

Изменение связей и перераспределение вычислительных задач при отказах узлов (процессоров) высокопроизводительных вычислительных систем повышают отказоустойчивость и надёжность системы [37, 38]. В случае применения в вычислительной системе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) становится возможным существенное повышение производительности за счёт превращения массива ПЛИС

(«вычислительного поля») в специализированные вычислители для параллельного выполнения шагов конкретной вычислительной задачи [33, 34]. Иными словами, для повышения производительности (достижения оптимального отображения вычислительного графа задачи на структуру РВС, [39, 40]) выполняют реконфигурацию структуры вычислительной системы. Пользователь такой реконфигурируемой системы должен не только описать вычислительную задачу, но и сформировать на базе РВС проблемно-ориентированную многопроцессорную систему, адекватную решаемой задаче. В статье [34] представлен программный комплекс средств разработки прикладных программ, призванный упростить работу пользователя. Таким образом, в области проектирования РВС существуют методы обеспечения надёжности за счёт перераспределения вычислительных задач при изменениях структуры и методы повышения производительности путём реконфигурации вычислительной системы. Использование этих методов и специализированных инструментов для работы с РВС позволяет достичь высокого уровня автономности и адаптивности системы.

Проведём здесь аналогию с функционированием СГУ уровня **Б** мультиагентной робототехнической системы. Групповое действие должно быть выполнено подгруппой агентов с результатом, заданным спецификацией. Для выполнения группового действия (например, выхода на рубеж [6]) агентам необходимо выполнить на своих бортовых вычислителях некоторую последовательность информационно-расчётных задач (ИРЗ), которую определяет алгоритм работы СГУ уровня **Б**. В процессе выполнения группового действия из-за некоторого внешнего воздействия могут изменяться структура подгруппы (например, добавление или выбывание агентов, потеря связи между частями подгруппы) или спецификация группового действия. Это ведёт к изменению необходимой последовательности выполнения ИРЗ и отображения вычислительного графа алгоритма работы СГУ на структуру подгруппы, что, естественно, требует динамической реконфигурации СГУ – адаптации к вызвавшему изменения воздействию. Тогда, рассматривая подгруппу как вычислительную систему, а групповое действие – как вычислительную задачу, можно утверждать, что при проектировании СГУ уровня **Б** применимы принципы построения РВС, а для математического описания процессов динамической реконфигурации – модели и методы теории высокопроизводительных (параллельных) вычислений. Аналогичные рассуждения можно провести для управления выполнением операции на уровне **А** СГУ.

Сравним рассмотренные подходы с точки зрения их применимости для создания инструментов автоматизации проектирования верхних уровней СГУ. Методология проектирования на базе объектно-ориентированных программных моделей [28–30] характеризуется гибкостью используемых моделей и возможностью их параметризации, что увеличивает число описываемых этими моделями ситуаций и потенциально повышает

адаптивность проектируемой СГУ. Существенное повышение адаптивности и автономности также возможно благодаря применению подходов из области разработки РВС [33–38], однако требуется их модификация для рассматриваемой предметной области. Двухуровневая методология [32], использующая графическую нотацию UML, малоприменима при проектировании СГУ для мобильных роботов, но она предлагает наглядный способ визуализации программных моделей, что позволяет упростить процесс разработки. Таким образом, каждый из рассмотренных подходов обладает недостатками, что ограничивает их применение при создании инструментов автоматизации проектирования верхних уровней СГУ. Поэтому целесообразна разработка методологии проектирования на основе комбинации рассмотренных подходов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ показывает, что существуют математические модели распределённой системы с переменной структурой, которые могут быть использованы при автоматизированном проектировании верхних уровней СГУ как динамически реконфигурируемой системы. На стадии определения функционально-структурного облика и требований к компонентам СГУ наиболее применимы аналитические и теоретико-множественные модели, описывающие структурную динамику системы. На стадии поиска, синтеза и верификации конкретных проектных решений применимы модели реконфигурируемых ДСС. Анализ методов проектирования реконфигурируемых систем показывает, что существующие методы обладают недостатками. Сопоставление процессов функционирования РВС и СГУ позволяет сделать вывод о возможности использования некоторых принципов построения РВС при проектировании реконфигурируемой СГУ. По аналогии с функционированием РВС, конфигурация распределённой СГУ зависит от выполняемой агентами задачи. Если для описания объекта управления и требуемого поведения использованы параметризованные модели, то условия выполнения конкретной задачи определяют значения параметров модели. В случае изменения условий или задачи должна быть синтезирована новая конфигурация системы, что позволит обеспечить высокий уровень автономности и адаптивности СГУ. Рассмотренные подходы и математические модели могут служить основой для разработки методологии проектирования компонентов верхних уровней СГУ в рамках создания специализированной системы автоматизированного проектирования программно-алгоритмического обеспечения верхних уровней СГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тачков А.А. Анализ методов группового управления в робототехнических системах // *Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надёжности, устойчивости и эффективности систем*. Елец, 2019. С. 401–404.
2. Козов А.В., Волосатова Т.М., Тачков А.А. Направление автоматизации проектирования систем управления группами мобильных роботов // *Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надёжности, устойчивости и эффективности систем*. Елец, 2019. С. 335–339.
3. Волосатова Т.М., Козов А.В., Тачков А.А. Система группового управления мобильными роботами с позиций автоматизированного проектирования // *Информационные технологии*. 2020. Т. 26, № 5. С. 274–282.
4. Подход к формализации тактической задачи для группы наземных робототехнических комплексов военного назначения / А.А. Максимов, А.А. Тачков, А.Ю. Малыгин, Н.А. Рудианов // *Вопросы оборонной техники*. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 7–8 (109–110). С. 88–96.
5. Тачков А.А., Козов А.В., Панков С.Е. Транслятор тактической задачи в сеть Петри для группы наземных робототехнических комплексов // *Программные продукты и системы*. 2018. Т. 31, № 4. С. 728–733.
6. Козов А.В. Динамическая реконфигурация системы управления мобильными роботами при выполнении группового действия // *Экстремальная робототехника*. СПб., 2020. С. 78–83.
7. Соколов Б.В., Малюгин К.А. Комплексное моделирование процессов управления структурной динамикой информационной системы // *Информационно-управляющие системы*. 2003. № 2–3. С. 19–29.
8. Потрясаев С.А., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Содержательное и формальное описание проблемы структурно-функционального синтеза и управления развитием информационной системы наземно-космического мониторинга // *Труды СПИИРАН*. 2013. Т. 5, № 28. С. 82–106.
9. Методы, алгоритмы и технологии реконфигурации бортовых систем маломассовых космических аппаратов / А.Ю. Кулаков, А.Н. Павлов, С.А. Потрясаев, Б.В. Соколов // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2018. Т. 61, № 7. С. 596–603.
10. Павлов А.Н. Комплексное моделирование структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов // *Труды СПИИРАН*. 2013. № 5 (28). С. 143–168.
11. Кириллов А.Н. Метод динамической декомпозиции в моделировании систем управления со структурными изменениями // *Информационно-управляющие системы*. 2009. № 1 (38). С. 20–24.
12. Кириллов А.Н. Динамические системы с переменной структурой и размерностью // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2009. Т. 52, № 3. С. 23–28.
13. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. 280 с.
14. Ramadge P.J., Wonham W.M. Supervisory Control of a Class of Discrete Event Processes // *SIAM Journal*

on Control and Optimization. SIAM, 1987. Vol. 25, no. 1, pp. 206–230.

15. Wonham W.M., Cai K., Rudie K. Supervisory Control of Discrete-Event Systems: A Brief History // Annual Reviews in Control. Elsevier, 2018. Vol. 45, pp. 250–256.

16. Wonham W.M., Cai K. Supervisory Control of Discrete-Event Systems. Cham: Springer, 2018. 502 p.

17. Амбарцумян А.А. Супервизорное управление структурированными динамическими дискретно-событийными системами // Автоматика и телемеханика. 2009. № 8. С. 156–176.

18. Амбарцумян А.А. Сетевое управление на сетях Петри в структурированной дискретно-событийной системе // Управление большими системами. 2010. Т. 30.1. С. 506–535.

19. Амбарцумян А.А., Потехин А.И. Групповое управление в дискретно-событийных системах // Проблемы управления. 2012. № 5. С. 46–53.

20. Control Reconfiguration of Discrete Event Systems with Dynamic Control Specifications / R. Sampath, H. Darabi, U. Buy, J. Liu // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. IEEE, 2008. Vol. 5, no. 1, pp. 84–100.

21. R-TNCES: A Novel Formalism for Reconfigurable Discrete Event Control Systems / J. Zhang, M. Khalgui, Z. Li, O. Mosbahi, A.M. Al-Ahmari // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. 2013. Vol. 43, no. 4, pp. 757–772.

22. Reconfigurable Coordination of Distributed Discrete Event Control Systems / J. Zhang, M. Khalgui, Z. Li, G. Frey, O. Mosbahi, H.B. Salah // IEEE Transactions on Control Systems Technology. IEEE, 2014. Vol. 23, no. 1, pp. 323–330.

23. Reconfiguration Control of Dynamic Reconfigurable Discrete Event Systems Based on NCESs / J. Zhang., H. Li, G. Frey, Z. Li // IEEE Transactions on Control Systems Technology. IEEE, 2020. Vol. 28, no. 3, pp. 857–868.

24. A High Level Net for Modeling and Analysis Reconfigurable Discrete Event Control Systems / A. Kheldoun, K. Barkaoui, J. Zhang, M. Ioualalen // Computer Science and Its Applications. Springer, 2015, pp. 551–562.

25. Hanisch H.-M., Rausch M. Synthesis of Supervisory Controllers Based on a Novel Representation of Condition/Event Systems // 1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century. Vancouver, 1995. Vol. 4, pp. 3069–3074.

26. Дубинин В.Н. Асинхронное моделирование NCES-сетей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2009. № 2 (10). С. 3–14.

27. Дубинин В.Н. Об одной методике проектирования супервизорного управления для дискретно-событийных систем // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2009. № 3 (11). С. 12–24.

28. Hu X., Zeigler B.P. Model Continuity to Support Software Development for Distributed Robotic Systems: A Team Formation Example // Journal of Intelligent and Robotic Systems. Springer, 2004. Vol. 39. P. 71–87.

29. Hu X., Zeigler B.P., Mittal S. Variable Structure in DEVS Component-Based Modeling and Simulation // Simulation. 2005. Vol. 81, no. 2, pp. 91–102.

30. Zeigler B.P. Object-Oriented Simulation with Hierarchical, Modular Models: Intelligent Agents and Endomorphic Systems. Academic Press, 1990. 397 p.

31. Соколов А.П., Першин А.Ю. Графоориентированный программный каркас для реализации сложных вычислительных методов // Программирование. 2019. № 5. С. 43–55.

32. RWiN: New Methodology for the Development of Reconfigurable WSN / H. Grichi, O. Mosbahi, M. Khalgui, Z. Li // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2017. Vol. 14, no. 1, pp. 109–125.

33. Каляев И.А., Левин И.И. Высокопроизводительные модульно-наращиваемые многопроцессорные системы на основе реконфигурируемой элементной базы // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2007. Т. 8, № 2. С. 24–33.

34. Каляев И.А., Левин И.И. Реконфигурируемые мультимедийные вычислительные системы для решения потоковых задач // Информационные технологии и вычислительные системы. 2011. № 2. С. 12–22.

35. Dynamically Reconfigurable Systems. Architectures, Design Methods and Applications / ed. Platzner M., Teich J., Wehn N. Springer, 2010.

36. Филиппов А.К. Теоретические основы проектирования динамически реконфигурируемых систем обработки информации : учеб. пособие. Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010. 119 с.

37. Тарасов А.А. Стратегии функциональной перестройки отказоустойчивых информационных систем при различных видах деградации // Безопасность информационных технологий. 2013. Т. 19, № 2. С. 22–31.

38. Chean M., Fortes J.A.B. A Taxonomy of Reconfiguration Techniques for Fault-Tolerant Processor Arrays // Computer. 1990. Vol. 23, no. 1, pp. 55–69.

39. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 449 с.

40. Sakharov M.K., Karpenko A.P. Adaptive Load Balancing in the Modified Mind Evolutionary Computation Algorithm // Parallel computational technologies. 2018, pp. 165–175.

REFERENCES

1. Tachkov A.A. Analiz metodov gruppovogo upravleniia v robototekhnicheskikh sistemakh [Analysis of Methods for Grouped Control in Robotics Systems]. *Fundamentalno-prikladnye problemy bezopasnosti, zhivuchesti, nadezhnosti, ustoichivosti i effektivnosti sistem. Trudy 3-i Mezhdunar. nauchno-pract. konf.* [Proc. of 3d Int. Sci. and Pract. Conf. on Fundamental and Applied Problems of Systems' Security, Survivability, Reliability, Stability, and Efficiency]. Elets, 2019, pp. 401–404.

2. Kozov A.V., Volosatova T.M., Tachkov A.A. Napravleniia avtomatizatsii proektirovaniia sistem

upravleniia gruppami mobilnykh robotov [Directions of Computer-Aided System Engineering to Control Mobile Robot Groups]. *Fundamentalno-prikladnye problemy bezopasnosti, zhivuchesti, nadezhnosti, ustoichivosti i effektivnosti system. Trudy 3-i Mezhdunar. nauchno-pract. konf.* [Proc. of 3d Int. Sci. and Pract. Conf. on Fundamental and Applied Problems of Systems' Security, Survivability, Reliability, Stability, and Efficiency]. *Elets*, 2019, pp. 335–339.

3. Volosatova T.M., Kozov A.V., Tachkov A.A. Sistema gruppovogo upravleniia mobilnymi robotami s pozitsii avtomatizirovannogo proektirovaniia [The Control System for a Group of Mobile Robots from the Perspectives of Automated Designing]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies], 2020, vol. 26, no. 5, pp. 274–282.

4. Maksimov A.A., Tachkov A.A., Malykhin A.I., Rudianov N.A. Podkhod k formalizatsii takticheskoi zadachi dlia grupy nazemnykh robototekhnicheskikh kompleksov voennogo naznacheniiia [An Approach to Formalization of Mission Plan for Group of Military Unmanned Ground Vehicles]. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Ser. 16. Tekhnicheskie sredstva protivodeistviia terrorizmu* [Military Enginery. Scientific and Technical Journal. Counter-Terrorism Technical Devices. Issue 16.], 2017, no. 7–8 (109–110), pp. 88–96.

5. Tachkov A.A., Kozov A.V., Pankov S.E. Transliator takticheskoi zadachi v set Petri dlia grupy nazemnykh robototekhnicheskikh kompleksov [A Translator of a Tactical Task to a Petri Net for a Group of Unmanned Ground Vehicles]. *Programmnye produkty i sistemy* [Software and Systems], 2018, vol. 31, no. 4, pp. 728–733.

6. Kozov A.V. Dinamicheskaia rekonfiguratsiia sistem upravleniia mobilnymi robotami pri vypolnenii gruppovogo deistviia [A Dynamic Reconfigurable Control System for Mobile Robots During Grouped Operation Implementation]. *Ekstremalnaia robototekhnika* [Extreme Robotics. International Sci. and Technological Conference]. St. Petersburg, 2020. p. 78–83.

7. Sokolov B.V., Malyugin K.A. Kompleksnoe modelirovanie protsessov upravleniia strukturnoi dinamiko informatsionnoi sistemy [Integrated Modeling of Information System Structure Dynamics Control]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2003, no. 2–3, pp. 19–29.

8. Potriasaev S.A., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Soderzhatelnoe i formalnoe opisaniie problemy strukturno-funktionalnogo sinteza i upravleniia razvitiem informatsionnoi sistemy nazemno-kosmicheskogo monitoringa [Conceptual and Formal Description of Structure-Functional Synthesis and Development Control Problems of Space and Ground Based Data Monitoring Information Systems]. *Trudy SPIIRAN* [SPIIRAS Proceedings. Informatics and Automation], 2013, vol. 5, no. 28, pp. 82–106.

9. Kulakov A.I., Pavlov A.N., Potryasaev S.A., Sokolov B.V. Metody, algoritmy i tekhnologii rekonfiguratsii bortovykh sistem malomassorazmernykh kosmicheskikh apparatov [Methods, Algorithms, and Technologies for

Reconfiguration of On-Board Equipment of Small-Sized Spacecrafts]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2018, vol. 61, no. 7, pp. 596–603.

10. Pavlov A.N. Kompleksnoe modelirovanie strukturno-funktionalnoi rekonfiguratsii slozhnykh obektov [Integrated Modelling of the Structural and Functional Reconfiguration of Complex Objects]. *Trudy SPIIRAN* [SPIIRAS Proceedings. Informatics and Automation], 2013, no. 5 (28), pp. 143–168.

11. Kirillov A.N. Metod dinamicheskoi dekompozitsii v modelirovanii sistem upravleniia so strukturnymi izmeneniami [The Dynamic Decomposition Method in Control Systems Modeling with Structural Variations]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2009, no. 1 (38), pp. 20–24.

12. Kirillov A.N. Dinamicheskie sistemy s peremennoi strukturoi i razmernostiu [Dynamic Systems with Variable Structure and Dimension]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2009, vol. 52, no. 3, pp. 23–28.

13. Kaliaev I.A., Gaiduk A.R., Kapustian S.G. *Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniia v gruppakh robotov* [Models and Algorithms of Supervisory Control in Robot Groups]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 280 p.

14. Ramadge P.J., Wonham W.M. Supervisory Control of a Class of Discrete Event Processes. *SIAM Journal on Control and Optimization*. SIAM, 1987, vol. 25, no. 1, pp. 206–230.

15. Wonham W.M., Cai K., Rudie K. Supervisory Control of Discrete-Event Systems: A Brief History. *Annual Reviews in Control*. Elsevier, 2018, vol. 45, pp. 250–256.

16. Wonham W.M., Cai K. *Supervisory Control of Discrete-Event Systems*. Cham, Springer Publ., 2018. 502 p.

17. Ambartsumian A.A. Supervizornoe upravlenie strukturirovannymi dinamicheskimi diskretno-sobytiinymi sistemami [Supervisory Control of Structured Dynamic Discrete-Event Systems]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automatics and Telemechanics], 2009, no. 8, pp. 156–176.

18. Ambartsumian A.A. Setetsentricheskoe upravlenie na setiakh Petri v strukturirovannoi diskretno-sobytiinnoi sisteme [Network-Centric Control on Petri Nets for Structured Discrete-Event System]. *Upravlenie bolshimi sistemami* [Large-Scale Systems Control], 2010, vol. 30.1, pp. 506–535.

19. Ambartsumian A.A., Potekhin A.I. Gruppovoe upravlenie v diskretno-sobytiinykh sistemakh [Group Control of Discrete-Event Systems]. *Problemy upravleniia* [Control Sciences], 2012, no. 5, pp. 46–53.

20. Sampath R., H. Darabi, U. Buy, J. Liu. Control Reconfiguration of Discrete Event Systems with Dynamic Control Specifications. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. IEEE, 2008, vol. 5, no. 1, pp. 84–100.

21. Zhang J., M. Khalgui, Z. Li, O. Mosbahi, A.M. Al-Ahmari. R-TNCES: A Novel Formalism for Reconfigurable Discrete Event Control Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2013, vol. 43, no. 4, pp. 757–772.

22. Zhang J., M. Khalgui, Z. Li, G. Frey, O. Mosbahi, H.B. Salah Reconfigurable Coordination of Distributed Discrete Event Control Systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. IEEE, 2014, vol. 23, no. 1, pp. 323–330.
23. Zhang J., H. Li, G. Frey, Z. Li Reconfiguration Control of Dynamic Reconfigurable Discrete Event Systems Based on NCESS. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. IEEE, 2020, vol. 28, no. 3, pp. 857–868.
24. Kheldoun A., K. Barkaoui, J. Zhang, M. Ioualalen. A High Level Net for Modeling and Analysis Reconfigurable Discrete Event Control Systems. *Computer Science and its Applications*. Springer, 2015, pp. 551–562.
25. Hanisch H.-M., Rausch M. Synthesis of Supervisory Controllers Based on a Novel Representation of Condition/Event Systems. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century*. Vancouver, 1995, vol. 4, pp. 3069–3074.
26. Dubinin V.N. Asinkhronnoe modelirovanie NCESSetey [Asynchronous Modeling of NCESS-Networks]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki* [University Proceedings. Volga Region. Technical Sciences], 2009, no. 2 (10), pp. 3–14.
27. Dubinin V.N. Ob odnoi metodike proektirovaniia supervizionogo upravleniia dlia diskretno-sobytiinykh sistem [A Method of Supervision Management Design for Discrete-Event Systems]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki* [University Proceedings. Volga Region. Technical Sciences], 2009, no. 3 (11), pp. 12–24.
28. Hu X., Zeigler B.P. Model Continuity to Support Software Development for Distributed Robotic Systems: A Team Formation Example. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Springer, 2004, vol. 39, pp. 71–87.
29. Hu X., Zeigler B.P., Mittal S. Variable Structure in DEVS Component-Based Modeling and Simulation. *Simulation*, 2005, vol. 81, no. 2, pp. 91–102.
30. Zeigler B.P. *Object-Oriented Simulation with Hierarchical, Modular Models: Intelligent Agents and Endomorphic Systems*. Academic Press, 1990. 397 p.
31. Sokolov A.P., Pershin A.Iu. Grafoorientirovannyi programmnyi karkas dlia realizatsii slozhnykh vychislitelnykh metodov [Graph-Based Software Framework for Implementation of Complex Computational Methods]. *Programirovanie* [Programming and Computer Software Journal], 2019, no. 5, pp. 43–55.
32. Grichi H., O. Mosbahi, M. Khalgui, Z. Li RWiN: New Methodology for the Development of Reconfigurable WSN. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2017, vol. 14, no. 1, pp. 109–125.
33. Kaliaev I.A., Levin I.I. Vysokoproizvoditelnye modulno-narashchivaemye mnogoprotsessornye sistemy na osnove rekonfiguriruemoi elementnoi bazy [High-Performance Scalable Multiprocessor Systems based on Reconfigurable Gate Arrays]. *Vychislitelnye metody i programirovanie: novye vychislitelnye tekhnologii* [Numerical Methods and Programming: New Computing Technologies]. 2007, vol. 8, no. 2, pp. 24–33.
34. Kaliaev I.A., Levin I.I. Rekonfiguriruemye multikonveiernye vychislitelnye sistemy dlia resheniia potokovykh zadach [Reconfigurable Multipipeline Computing Systems for Data-Driven Tasks of Information Handling and Control Solution]. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitelnye sistemy* [Journal of Information Technologies and Computing Systems], 2011, no. 2, pp. 12–22.
35. Platzner M., Teich J., Wehn N. (eds.). *Dynamically Reconfigurable Systems. Architectures, Design Methods and Applications*. Springer, 2010.
36. Filippov A.K. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniia dinamicheskii rekonfiguriruemykh sistem obrabotki informatsii*. Ucheb. posobie [Theoretical Basis for Designing the Dynamic Reconfigurable Data-Processing Systems. Tutorial]. Vladimir, Vladim. State Un. Publ., 2010. 119 p.
37. Tarasov A.A. Strategii funktsionalnoi perestroiki otkazoustoichivyykh informatsionnykh sistem pri razlichnykh vidakh degradatsii [Strategies Functional Rearrangement of Fault-Tolerant Information Systems in Different Types of Degradation]. *Bezopasnost informatsionnykh tekhnologii* [IT Security], 2013, vol. 19, no. 2, pp. 22–31.
38. Chean M., Fortes J.A.B. A Taxonomy of Reconfiguration Techniques for Fault-Tolerant Processor Arrays. *Computer*, 1990, vol. 23, no. 1, pp. 55–69.
39. Karpenko A.P. *Sovremennye algoritmy poiskovoi optimizatsii. Algoritmy, vdokhnovlennyye prirodoy* [State-of-the-Art Algorithms for Retrieval Optimization. Algorithms Preprocessed by Nature]. Moscow, Bauman Moscow State Tech. Un. Publ., 2014. 449 p.
40. Sakharov M.K., Karpenko A.P. Adaptive Load Balancing in the Modified Mind Evolutionary Computation Algorithm. *Parallel Computational Technologies*, 2018, pp. 165–175.