

Грибков Игорь Николаевич – e-mail: gribkov@avid.ru; тел.: +73422813530; зам. начальника отдела расчетно-экспериментальных работ и проектирования систем автоматического управления.

Саженов Алексей Николаевич – e-mail: sazhenkov@avid.ru; тел.: +73422409783; к.т.н.; помощник генерального конструктора.

Ламанова Надежда Геннадьевна – ПНИПУ; e-mail: nglaman@mail.ru; г. Пермь, Россия; тел.: +73422391303; доцент кафедры «Прикладная математика».

Inozemtsev Aleksandr Alexandrovich – UEC-Aviadvigatel JSC; e-mail: office@avid.ru; Perm, Russia; phone: + 73422813854; dr. of eng. sc.; Corresponding Member of the RAS; Managing Director-General Designer of UEC-Aviadvigatel JSC; head of the Aviation Engines Chair in the Perm National Research Polytechnic University.

Pleshivykh Artur Sergeevich – e-mail: arthur.p.s.1995@mail.ru; phone: +73422813530; engineer of Design of Design and Experimental Works and Control Systems Development Department; graduate student of the Applied Mathematics chair in the Perm National Research Polytechnic University;

Gribkov Igor Nikolaevich – e-mail: gribkov@avid.ru; phone: +73422813530; deputy head of Design and Experimental Works and Control Systems Development department.

Sazhenkov Alexey Nikolaevich – e-mail: sazhenkov@avid.ru; phone: +73422409783; cand. of eng. sc.; assistant General Designer.

Lamanova Nadezhda Gennad'evna – Perm National Research Polytechnic University; e-mail: nglaman@mail.ru; Perm, Russia; phone: +73422391303; assistant professor of the Applied Mathematics chair.

УДК 007.52:621.865.8:004.896

DOI 10.18522/2311-3103-2022-2-78-88

В.В. Свиридов**ФОРМАЛИЗОВАННЫЙ ПОДХОД К СИНТЕЗУ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ В УСЛОВИЯХ НЕДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СРЕДЫ**

Бурное развитие «многоагентных систем», как самостоятельного и многопланового раздела искусственного интеллекта, привлекает к себе многих исследователей в различных сферах деятельности. Темпы прогресса в развитии информационных технологий, распределённых информационных систем, компьютерной техники определяют возможности применения технологий робототехники в Вооружённых силах Российской Федерации. Представленные в статье факторы санкционируют необходимость внедрения в войска новых интеллектуальных технологий – автономных робототехнических комплексов (систем). Развитие методов искусственного интеллекта позволяет сделать новый шаг к изменению стиля взаимодействия комплексов между собой в составе робототехнической системы. Возникла идея создания так называемых "автономных комплексов", которые породили уже новый стиль адаптивного группового управления. Вместо взаимодействия, иницируемого пользователем-оператором путём команд и прямых манипуляций, комплексы самостоятельно вовлекаются в совместный процесс решения общей задачи в условиях недетерминированной динамической среды. В статье предложен формализованный подход к конструированию вариантов архитектур группового взаимодействия автономных робототехнических комплексов в системе, основанного на законе открытого управления, т.е. индуцированных и достоверных предпочтений каждого комплекса к действию, удовлетворяющих условиям совершенного согласования их деятельности, путём идентификации параметров, при которых максимизируется целевая функция в различных режимах функцио-

нирования робототехнической системы. Представлена формализованная постановка задачи синтеза системы адаптивного группового управления автономными робототехническими комплексами в условиях априорной неопределённости. Архитектура группового взаимодействия комплексов адаптивно выстраивается исходя из условий внешней среды и внутреннего состояния системы, в которых каждый комплекс группы функционирует для достижения общей цели (решения системной задачи) в рассматриваемый момент времени.

Робототехнический комплекс; внешняя среда; внутренняя среда; индуцированные предпочтения; централизованное и децентрализованное управление; адаптивное групповое взаимодействие; распределённая система управления; архитектура.

V.V. Sviridov

THE FORMALIZED APPROACH TO SYNTHESIS OF ARCHITECTURE IN THE SYSTEM OF ADAPTIVE GROUP CONTROL OF ROBOTIC COMPLEXES IN THE CONDITIONS OF THE NONDETERMINISTIC DYNAMIC ENVIRONMENT

The rapid development of "multi-agent systems" as an independent and multifaceted section of artificial intelligence attracts many researchers in various fields of activity. The pace of progress in the development of information technologies, distributed information systems, and computer technology determines the possibilities of using robotics technologies in the Armed Forces of the Russian Federation. The factors presented in the article authorize the need to introduce new intelligent technologies into the troops - autonomous robotic complexes (systems). The development of artificial intelligence methods makes it possible to take a new step towards changing the style of interaction of complexes with each other as part of a robotic system. The idea of creating so-called "autonomous complexes" arose, which gave rise to a new style of adaptive group management. Instead of interaction initiated by the user-operator through commands and direct manipulations, complexes are independently involved in the joint process of solving a common problem in a non-deterministic dynamic environment. The article proposes a formalized approach to the design of architectures for group interaction of autonomous robotic complexes in a system based on the law of open control, i.e. induced and reliable preferences of each complex for action, satisfying the conditions of perfect coordination of their activities, by identifying parameters at which the objective function is maximized in various modes of functioning of the robotic system. A formalized formulation of the problem of synthesis of the adaptive group control system of autonomous robotic complexes under conditions of a priori uncertainty is presented. The architecture of group interaction of complexes is adaptively built based on the conditions of the external environment and the internal state of the system, in which each complex of the group functions to achieve a common goal (solving a system problem) at the time under consideration.

Robotic complex; environment; internal environment; induced preferences; centralized and decentralized management; adaptive group interaction; distributed control system; architecture.

Введение. Главным приоритетом Российской Федерации в области военного строительства является создание современной армии, основу которой составляют системы и комплексы вооружения, военной и специальной техники, обеспечивающие адекватное реагирование на весь спектр угроз военной безопасности, не только существующих, но и вероятных в будущем. Решение этой задачи осуществляется в рамках проведения согласованной и сбалансированной военно-технической политики, основы которой утверждены Президентом Российской Федерации 26 января 2011 года.

Как отмечается в [1], существенно изменился характер современных войн, которые стали высокотехнологичными, дистанционными, динамичными и скоротечными, требующими принципиально новых подходов, как к их ведению, так и военно-техническому обеспечению.

В современных условиях назрела необходимость выработки новых подходов к организации обеспечения Вооружённых Сил России современным вооружением, военной и специальной техникой. Это обусловлено следующими факторами [2]:

- ◆ заданием высоких требований к тактико-техническим характеристикам образцов вооружения с учетом развития форм и способов вооружённой борьбы;
- ◆ сокращением сроков подготовки войск (сил) к ведению военных действий и высокой интенсивностью и скоротечностью вооружённых конфликтов;
- ◆ повышением уязвимости объектов к воздействию средств поражения противника и действиям террористических групп в районах действия войск;
- ◆ увеличением длительности и сложности технологического цикла производства основных видов вооружения и военной техники.

Результаты анализа существующих систем и средств охраны показали необходимость создания и внедрения в войска нового поколения систем и технических средств охраны, оснащения подразделений современными средствами (комплексами) наблюдения и разведки с автоматизацией сбора и обработки информации, необходимость в автоматизации процессов управления силами и средствами охраны в позиционных районах войск. Одним из путей решения перечисленных выше проблем является применение в войсках робототехнических комплексов (систем) военного назначения.

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 16 декабря 2015 года № 623 робототехнические комплексы (системы) военного, специального и двойного назначения определены как приоритетное направление развития науки, технологий и техники в Российской Федерации [3]. Необходимо, чтобы системы робототехнические (СРТ) и робототехнические комплексы (РТК) [4] обладали свойствами: многофункциональности, совместимости и интегрируемости с существующими и перспективными средствами (системами) охраны объектов, обладали адаптивностью, коммуникативностью, способностью к автономному (самостоятельному) выполнению задач в условиях неопределенной динамично развивающейся обстановки.

Активное развитие методов и технологий распределённого искусственного интеллекта, например, многоагентные системы (МАС) [5–8], достижения в области аппаратных и программных средств поддержки концепции распределённости и открытости привели к осознанию важности того, что РТК должны адаптироваться к условиям сложной внешней среды, осуществлять групповое взаимодействие, интегрироваться в системы, совместно решающие сложные задачи.

В настоящее время в рамках МАС используются следующие подходы к формализации задач, решаемых на уровне кооперации агентов. Совместное поведение различных объектов изучается в рамках многих научных дисциплин. Выделим среди них те, которые представляются наиболее адекватными при решении задач коллективного управления интеллектуальными агентами [9]:

- ◆ *распределенный искусственный интеллект* [10, 11]. Эта область искусственного интеллекта занимается самыми общими аспектами коллективного поведения агентов. Здесь основу составляют результаты, полученные в теории распределенных систем и теории принятия решений;
- ◆ *теория игр* [12]. Аппарат теории игр часто используется для исследования коллективов интеллектуальных агентов. Многие ситуации, возникающие в многоагентной системе, находят подходящие аналоги в теории игр. Исследуются кооперативные игры, различные стратегии ведения торгов (переговоров) и др., которые являются аналогами ряда моделей коллективного поведения агентов;
- ◆ *теория коллективного поведения автоматов* [13] исследует поведение больших коллективов автоматов с примитивными функциями. Поведение автомата может рассматриваться как недетерминированное, что позволяет строить различ-

ные вероятностные модели. Допускается обучение автомата при помощи штрафов и поощрений. Автомат может быть наделен памятью, в которой он в некоторой форме запоминает предыдущие штрафы и поощрения, и может использовать эту информацию для улучшения своего и коллективного поведения в соответствии с некоторой функцией дохода;

♦ *биологические, экономические и социальные модели* [14].

За прошедшее время подходы к решению подобных задач значительно изменились, требуя, в частности, новых способов формализации, математических моделей и алгоритмов адаптивного группового управления РТК. Концепции, базовые понятия, принципы построения, перспективы практического применения и другие аспекты создания робототехнических систем рассмотрены во многих современных работах, в том числе Вяткина А.Ю., Смирнова Д.В., Кочетова И.А., Городецкого В.И., Карсаева О.В., Самойлова В.В., Пантелеева А.В., Скавинской Д.В., Серебрякова С.В., Бухвалова О.Л., Скобелева П.О. и других исследователей. Однако математический аппарат и программные средства, приемлемые для адаптивного группового управления поведением РТК, составляющих систему, в реальном времени и оперативной оценки ресурсов, необходимых для решения прикладной задачи, к настоящему времени в полном объеме ещё не созданы.

Синтез архитектуры системы группового управления РТК, а также рациональное поведение отдельного комплекса при решении общей целевой задачи в априори неопределённой среде, существенно зависят от концептуальной модели РТК и формализма особенностей её описания, математической модели кооперации комплексов при совместном их функционировании в системе, а также от ряда других факторов. Для этого необходимо и достаточно, чтобы РТК является автономным, т.е. обладал способностью вырабатывать рациональное решение к действию и формировать свои действия для достижения поставленной цели без вмешательства человека или других вспомогательных систем и, при этом, выполнял самоконтроль своего внутреннего состояния.

Формальная постановка задачи исследования. Пусть существует система робототехническая (СРТ) – \mathcal{R} , состоящая из группы автономных РТК – R_j ($j = \overline{1, N}$), функционирующая в условиях недетерминированной динамической среды и решающая системную задачу противодействия наземному нарушителю. Качественное выполнение поставленной перед СРТ задачи зависит от её внутреннего состояния Q и внешней среды E , в которой функционируют комплексы $R_j \in \mathcal{R}$ ($j = \overline{1, N}$).

Эффективность функционирования СРТ ВН оценивается в соответствии с критериями:

$$P_{\text{пор.нар.}} \geq P_{\text{пор.нар.}}^{\text{треб}}; \quad t_{\text{пор.нар.}} \rightarrow \min; \quad C \rightarrow \min. \quad (1)$$

где $P_{\text{пор.нар.}}$ – вероятность поражения нарушителя (группы нарушителей), т.е. выполнения системой задачи; $t_{\text{пор.нар.}}$ – время, за которое система решит поставленную задачу; C – экономическая эффективность функционирования системы.

СРТ ВН решает задачи охраны и обороны объекта в следующих режимах функционирования при выполнении условий (1):

♦ *режим «А»*, при котором показателем эффективности функционирования СРТ ВН является стоимость выполнения задачи (C), т.е. определяется суммарным количеством боеприпасов, затраченных каждым РТК ВН для достижения общей цели;

♦ *режим «Б»*, при котором показателем эффективности функционирования СРТ ВН является вероятность решения поставленной задачи $P_{\text{пор.нар.}}$;

♦ режим «В», при котором показателем эффективности функционирования СРТ ВН является оперативность решения задачи $t_{\text{порнар}}$.

Состояние внешней среды \mathbf{E} вокруг j -го комплекса в момент времени t описывается матрицей состояний: действий нарушителя \mathbf{g} и условиями местности \mathbf{m} , в которой функционирует РТК ВН R_j ($j = \overline{1, N}$):

$$E_j(t) = \begin{vmatrix} e_j^{1,1} & e_j^{1,2} & \dots & e_j^{1,v} \\ e_j^{2,1} & e_j^{2,2} & \dots & e_j^{2,v} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e_j^{b,1} & e_j^{b,2} & \dots & e_j^{b,v} \end{vmatrix}, \quad (2)$$

где $e_j^{g,m}(t)$, при $g = (\overline{1, \dots, v})$, $m = (\overline{1, \dots, b})$ - характеристики участка внешней среды вокруг j -го комплекса.

Состояние внешней среды, в которой функционирует система \mathfrak{R} в момент времени t , описывается вектор-функцией $E(t) = \langle E_1(t), E_2(t), \dots, E_N(t) \rangle$.

В начальный момент времени t_0

$$E(t_0) = \langle E_1(t_0), E_2(t_0), \dots, E_N(t_0) \rangle, \quad (3)$$

в конечный момент времени t_k

$$E(t_k) = \langle E_1(t_k), E_2(t_k), \dots, E_N(t_k) \rangle. \quad (4)$$

Состояние внешней среды \mathbf{E} изменяется в процессе группового взаимодействия \mathbf{B} комплексов $R_j \in \mathfrak{R}$ ($j = \overline{1, N}$).

Действия нарушителя \mathbf{g} ограничены моделью его воздействия по объектам, а условия местности \mathbf{m} – условиями, при которых функционирует объект охраны:

$$E(t) = \{E^{\text{ДОП.}}(t)\} \subset \{E\}. \quad (5)$$

Внутреннее состояние \mathbf{Q} системы \mathfrak{R} зависит от тактико-технического состояния каждого комплекса $R_j \in \mathfrak{R}$ ($j = \overline{1, N}$) и возможностей их группового взаимодействия \mathbf{B} в условиях внешней среды \mathbf{E} .

Состояние каждого РТК ВН R_j ($j = \overline{1, N}$) в момент времени t описывается матрицей состояний:

$$R_j(t) = \begin{vmatrix} r_j^{1,1} & r_j^{1,2} & \dots & r_j^{1,h} \\ r_j^{2,1} & r_j^{2,2} & \dots & r_j^{2,h} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_j^{l,1} & r_j^{l,2} & \dots & r_j^{l,h} \end{vmatrix}, \quad (6)$$

где $r_j^{i,k}(t)$, при $i = (\overline{1, \dots, l})$, $k = (\overline{1, \dots, h})$ – переменные количественные и качественные характеристики, определяющие техническое состояние и тактические возможности j -го комплекса в текущий момент времени t , при функционировании во внешней среде \mathbf{E} (например, количество энергоресурса, скорость наведения оружия, количество боеприпасов и др.).

Состояние системы задаётся вектор-функцией $\mathfrak{R}(t) = \langle R_1(t), R_2(t), \dots, R_N(t) \rangle$. Начальное состояние СРТ ВН, в момент времени t_0 , описывается:

$$\mathfrak{R}(t_0) = \langle R_1(t_0), R_2(t_0), \dots, R_N(t_0) \rangle, \quad (7)$$

конечное состояние системы, в момент времени t_k

$$\mathfrak{R}(t_k) = \langle R_1(t_k), R_2(t_k), \dots, R_N(t_k) \rangle. \quad (8)$$

Состояния комплексов с течением времени изменяются не только при выполнении ими действий D_j ($j=1 \dots N$), но и при влиянии на них параметров внешней среды E .

Каждый комплекс, входящий в систему, в момент времени t имеет ряд допустимых состояний:

$$R_j(t) = \{R_j^{don}(t)\} \subset \{R\}, \quad j = \overline{1, N}. \quad (9)$$

Действия D_j ($j=1 \dots N$), выполняемые комплексом $R_j \in \mathfrak{R}$ ($j = \overline{1, N}$), описываются с помощью непрерывными вектор-функциями $D_j(t) = [d_{1,j}(t), d_{2,j}(t), \dots, d_{p,j}(t)]^T$, а множество действий, которые может выполнять комплекс при решении групповой задачи, описывается p -мерным пространством $\{D\}_j$.

Действия, выполняемые группой комплексов, т.е. системой \mathfrak{R} описываются непрерывной вектор-функцией $D_{\mathfrak{R}}(t) = \langle D_1(t), D_2(t), \dots, D_j(t) \rangle$.

Групповое взаимодействие B при множестве действий комплексов, описываются как:

$$B = \{D_{\mathfrak{R}}\} = \{D\}_1 \cup \{D\}_2 \cup \dots \cup \{D\}_N. \quad (10)$$

Необходимо отметить, что совокупность действий, выполняемых группой комплексов, для достижения общей цели (решении общей задачи) представляет собой групповое управление комплексами $R_j \in \mathfrak{R}$ ($j = \overline{1, N}$). Решения к действию u_j комплексов $R_j \in \mathfrak{R}$ ($j = \overline{1, N}$) вырабатываются распределённой системой группового управления, а сами действия D_j выполняются комплексами R_j .

Взаимодействие B комплексов группы в системе \mathfrak{R} при решении общей задачи зависит от вида управления: централизованного и децентрализованного.

При *централизованном управлении* [15], групповое взаимодействие комплексов зависит от выработки центральным устройством рационального решения к действию для группы РТК, на основании предпочтений комплексов группы. Роль центрального устройства управления может выполнять пункт управления СРТ ВН, либо ведущий РТК ВН. Выбор комплексов для качественного решения задачи в момент времени t осуществляется исходя из технического состояния и тактических возможности j -го комплекса в момент времени t , при функционировании во внешней среде E . Взаимодействие комплексов при централизованном управлении в момент времени t описывается вектор-функцией:

$$B_{\mathfrak{R}}(t) = \{D_{\mathfrak{R}}(t)\} \cap \langle \{D\}_1(t) \cup \{D\}_2(t) \cup \dots \cup \{D\}_N(t) \rangle. \quad (11)$$

По-сути, выражение (11) представляет собой структуру робототехнической системы в момент времени t , которую формирует центральное устройство управления, с учётом выражения (1).

Изменение этой структуры взаимодействия группы комплексов, описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\dot{S}_{\mathfrak{R}}(t) = f(B_{\mathfrak{R}}(t), E(t), Q(t), t). \quad (12)$$

В стационарной внешней среде решения к действию, т.е. алгоритмы функционирования, комплексы выбирают из базы данных в соответствии с обстановкой, а взаимодействие РТК ВН осуществляется в соответствии с выражением (11).

В неопределённой динамической среде, где изменяется либо тактика действий противника, либо условия местности, а как следствие и состояние самих комплексов, структура системы может меняться и описываться выражением (12).

При децентрализованном управлении (стайное, коллективное, роевое) [16] группой комплексов, подсистема управления каждого комплекса $R_j \in \mathfrak{R} (j = \overline{1, N})$, с учётом его состояния выражение (6) и данных от средств разведки о внешней среде E (выражение 2) в области функционирования комплекса, с учётом ограничений (4) и (8), вырабатывает решение к действию, описываемое вектор-функцией: $Y_j(t) = [y_{1,j}(t), y_{2,j}(t), \dots, y_{e,j}(t)]^T$, на основании которого комплекс $R_j (j = \overline{1, N})$ формирует свои действия D_j .

Решение общей групповой задачи строится на коммуникативном согласовании скоординированных действий комплексов, входящих в робототехническую систему \mathfrak{R} .

Распределённая система управления в момент времени t , на основании решений Y_j , вырабатывает общий замысел (сценарий) достижения общей цели комплексами, который описывается непрерывной вектор-функцией: $Y_{\mathfrak{R}}(t) = \langle Y_1(t), Y_2(t), \dots, Y_N(t) \rangle$,

В соответствии с замыслом $Y_{\mathfrak{R}}(t)$ организуется взаимодействие комплексов $R_j (j = \overline{1, N})$, т.е. формируется структура кластера комплексов S_j^K , задействованных для решения общей задачи, которая описывается вектор-функцией:

$$S_k(t) = \{B_k(t)\} = \langle \{D\}_1(t) \cup \{D\}_2(t) \cup \dots \cup \{D\}_N(t) \rangle, \quad (13)$$

а изменение этой структуры в зависимости от условий (выражения 1, 2, 6) описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\dot{S}_k(t) = f(E(t), Q(t), B(t), t). \quad (14)$$

Таким образом, при децентрализованном групповом управлении комплексами $R_j \in \mathfrak{R} (j = \overline{1, N})$ в зависимости от изменяющихся с течением времени внешних и внутренних условий происходит адаптация структуры группы РТК ВН путём выработки распределённой системой управления решения, реализуемым определённым типом взаимодействия (роевым, стайным или коллективным) комплексов.

Целью группового управления комплексов $R_j \in \mathfrak{R} (j = \overline{1, N})$ на интервале времени $[t_0, t_k]$ является формирование распределённой системой управления комплексами такой структуры, с учётом ограничений (1), (5), (9), при которой организуется качественное взаимодействие комплексов $R_j \in \mathfrak{R} (j = \overline{1, N})$, обеспечивающих эффективное выполнение СРТ общей групповой задачи в различных режимах функционирования.

Тогда, на основе закона открытого управления [15] процедура взаимодействия комплексов, максимизирующая целевую функцию системы $\mathfrak{Z}_{gr}(B)$ на множестве решений, принимаемых комплексами, удовлетворяющих условиям совершенного согласования.

Имеет место следующий факт: для того, чтобы решение каждого комплекса являлось доминантной стратегией комплексов, необходимо и достаточно, чтобы механизм группового взаимодействия был механизмом открытого управления [17–19], тогда, для режимов «А», «Б», «В», соответственно функционал качества системы определяется выражением (15):

$$\mathfrak{Z}_{gr}(B) = \begin{cases} \int_{t_0}^{t_k} f(Q(C), E(C), Y(C), S(C), t) dt \rightarrow \underset{y \in Y(C)}{Arg \sup}(y, C); \\ \int_{t_0}^{t_k} f(Q(P_{nop.}), E(P_{nop.}), Y(P_{nop.}), S(P_{nop.}), t) dt; \rightarrow \underset{y \in Y(P_{nop.})}{Arg \sup}(y, P_{nop.}); \\ \int_{t_0}^{t_k} f(Q(t), E(t), Y(t), S(t), t) dt \rightarrow \underset{y \in Y(t)}{Arg \sup}(y, t). \end{cases} \quad (15)$$

Основное назначение адаптивного группового управления РТК при различных режимах функционирования состоит в том, чтобы обеспечить скоординированное поведение комплексов на коммуникативном уровне при решении общей и/или своих частных задач в априори неопределённой среде

Архитектура системы адаптивного группового управления робототехническими комплексами представлена на рис. 1.

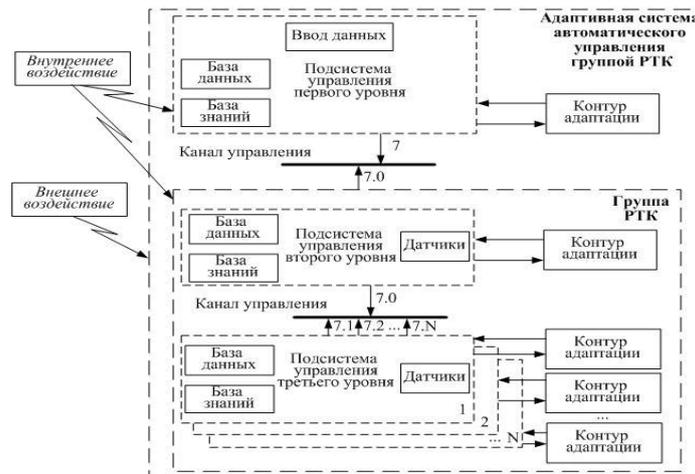


Рис. 1. Способ адаптивного группового управления робототехническими комплексами

На основании представленного подхода к синтезу архитектуры системы адаптивного группового управления робототехническими комплексами [20], требованиями к системе группового управления и задачами, решаемыми группой РТК [21], разработанного алгоритма и программы ЭВМ группового поведения РТК [22] и сформирован вариант облика системы робототехнической.

Заключение. Предложенный подход к синтезу архитектур системы адаптивного группового управления РТК предназначен для достижения основной цели адаптивного управления сложной системой – максимизации качества её функционирования, решения проблемы, состоящей из совокупности задач: формализации и описания процесса автоматического управления состоянием системы, автоматической оценки состояния системы по результатам наблюдения, автоматической идентификации характеристик системы, а также автоматического формирования управляющих команд по изменению её состояния и структуры в условиях недетерминированной динамической среды.

В процессе функционирования системы группового управления контуры адаптации, обеспечивающие решение проблемы управления качеством функционирования подсистем управления, оценивают состояние каждой подсистемы управления в условиях неопределённости, вызванной недостатком априорных сведений об истинном состоянии и состоянием динамической внешней среды.

Предложенный формализованный подход к синтезу «плавающей» архитектуры системы адаптивного группового управления робототехническими комплексами в условиях недетерминированной динамической среды позволит ускорить разработку робототехнических систем, реализующих адаптивное групповое управление РТК, предназначенных для решения задач охраны критически важных объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Савин Л.В.* Вариант будущей войны: роение боевых роботов // Стратегическая стабильность. - 2017. - № 1 (78). – С. 24-35.
2. Стратегическое ракетное вооружение. Методология, опыт, проблемы. Кн. 1. – М.: 4ЦНИИ, 2003. – 652 с.
3. Указ Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 года N 899 "Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации". - <http://docs.cntd.ru/document/902287707>.
4. ГОСТ Р 60.0.0.4-2019 ИСО 8373.2012. Роботы и робототехнические устройства.
5. *Городецкий В.И., Лебедев А.Н.* Планирование и составление расписаний автоматическое удовлетворение ограничений на временную структуру процесса // Проблемы информатизации. – 1994. – № 3-4. – С. 49-55.
6. Групповое управление подвижными объектами в неопределённых средах / под. ред. В.Х. Пшихопова. – М.: Физматлит, 2015. - 305 с.
7. *Пантелеев М.Г.* Формальная модель опережающего интерактивного планирования действий интеллектуальных агентов реального времени // XIV национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2014 (24-27 октября 2014 г., Казань, Россия): Тр. конференции. В 3-т. Т. 1. – Казань: Изд-во РИЦ «Школа», 2014. – С. 323-333.
8. *Maes P.* Agent that Reduce Work and Information Overload // Communication of the ACM. – July 1994. – Vol. 37, No. 7. – P. 30-40.
9. *Городецкий В.И., Грушинский М.С., Хабалов А.В.* Многоагентные системы. – 2014. – 34 с.
10. *Wooldridge M. and Jennings N.* Towards a Theory of Cooperative Problem Solving.
11. *Wooldridge M. and Jennings N.R.* Agent Theories, Architectures, and Languages: A Survey // Intelligent Agents. ECAI-94 Workshop on Agent Theories, Architecture and Languages. Amsterdam, The Netherlands, August 8-9, 1994, (Eds. M.J. Wooldridge and N.R. Jennings): Proceedings. – Springer Verlag, 1994. – P. 3-39.

12. *Luce and Raiffa H. Games and Decisions*, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1957.
13. *Варшавский В.И., Поспелов Д.А.* Оркестр играет без дирижера. – М.: Наука 1984.
14. *Новиков Д.А.* Теория управления организационными системами. – М.: МПСИ, 2005. – 584 с.
15. *Капустян С.Г.* Многоуровневая организация коллективного взаимодействия в группах интеллектуальных роботов // Известия ТРТУ. – 2004. – № 9. – С. 149-158.
16. *Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Распределенные системы планирования действий коллективов роботов: монография. – М.: Янус-К, 2002. – 292 с.
17. *Бурков В.Н.* Основы математической теории активных систем. – М.: Наука, 1977. – 255 с.
18. *Бурков В.Н., Новиков Д.А.* Теория активных систем: состояние и перспективы. – М.: СИНТЕГ, 1999. – 128 с.
19. *Петраков С.Н.* Механизмы планирования в активных системах: неманипулируемость и множества диктаторства. – М.: ИПУ РАН, 2001. – 135 с.
20. *Свиридов В.В., Свиридова Ю.А.* Способ адаптивного группового управления робототехническими комплексами и система для его осуществления // Патент на изобретение №2758870 от 02 ноября 2021 г.
21. *Свиридов В.В.* Методический подход к рациональному применению разнородных робототехнических комплексов для решения задач охраны и обороны критически важных объектов РВСН от воздействия диверсионно-разведывательных групп противника // Военная мысль. – 2021. – № 6. – С. 57-64. – ISSN 0236-2058.
22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020614057 Российская Федерация. Программа для ЭВМ «Расчёт адаптивного группового управления робототехническими комплексами военного назначения на основе гибкости структуры системы управления к изменяющимся внешним условиям, с оценкой боевой эффективности» / Свиридов В.В., Повшенко Г.Т., Федосеенко Н.В. (RU). – Заявка №2020612894 ; дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ 26.03 2020 г.

REFERENCES

1. Savin L.V. Variant budushchey voyny: roenie boevykh robotov [Variant of future war: swarming of fighting robots], *Strategicheskaya stabil'nost'* [Strategic stability], 2017, No. 1 (78), pp. 24-35.
2. Strategicheskoe raketnoe vooruzhenie. Metodologiya, opyt, problem [Strategic missile armament. Methodology, experience, problems]. Book 1. Moscow: 4TSNII, 2003, 652 p.
3. Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 7 iyulya 2011 goda N 899 "Ob utverzhdenii prioritnykh napravleniy razvitiya nauki, tekhnologiy i tekhniki v Rossiyskoy Federatsii i perechnya kriticheskikh tekhnologiy Rossiyskoy Federatsii" [The decree of the President of the Russian Federation of July 7, 2011 N 899 "About the statement of the priority directions of development of science, technologies and equipment in the Russian Federation and the list of critical technologies of the Russian Federation"]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902287707>.
4. GOST R 60.0.0.4-2019 ISO 8373.2012. Roboty i robototekhnicheskie ustroystva [GOST P 60.0.0.4-2019 ISO 8373.2012. Robots and robotic devices].
5. *Gorodetskiy V.I., Lebedev A.N.* Planirovanie i sostavlenie raspisaniy avtomaticheskoe udovletvorenie ogranicheniy na vremennuyu strukturu protsessa [Planning and drawing up schedules automatic satisfaction of restrictions on temporary structure of process], *Problemy informatizatsii* [Informatization problems], 1994, No. 3-4, pp. 49-55.
6. Gruppovoe upravlenie podvizhnymi ob"ektami v neopredelennykh sredakh [Group management of mobile objects in uncertain environments], ed. by V.Kh. Pshikhopova. Moscow: Fizmatlit, 2015, 305 p.
7. *Panteleev M.G.* Formal'naya model' operezhayushchego interaktivnogo planirovaniya deystviy intellektual'nykh agentov real'nogo vremeni [Formal model of the advancing interactive planning of actions of intellectual agents of real time], *XIV natsional'naya konferentsiya po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem KII-2014 (24-27 oktyabrya 2014 g., Kazan', Rossiya): Tr. Konferentsii* [XIV national conference on artificial intelligence with the international participation of KII-2014 (on October 24-27, 2014, Kazan, Russia): Conference works]. In 3 vol. Vol. 1. Kazan': Izd-vo RITS «Shkola», 2014, pp. 323-333.

8. *Maes P.* Agent that Reduce Work and Information Overload, *Communication of the ACM*, July 1994, Vol. 37, No. 7, pp. 30-40.
9. *Gorodetskiy V.I., Grushinskiy M.S., Khabalov A.V.* Mnogoagentnye sistemy [Mnogoagentnye of system], 2014, 34 p.
10. *Wooldridge M. and Jennings N.* Towards a Theory of Cooperative Problem Solving.
11. *Wooldridge M. and Jennings N.R.* Agent Theories, Architectures, and Languages: A Survey, *Intelligent Agents. ECAI-94 Workshop on Agent Theories, Architecture and Languages. Amsterdam, The Netherlands, August 8-9, 1994*, (Eds. M.J. Wooldridge and N.R. Jennings): Proceedings. Springer Verlag, 1994, pp. 3-39.
12. *Luce and Raiffa H.* Games and Decisions, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1957.
13. *Varshavskiy V.I., Pospelov D.A.* Orkestr igraet bez dirizhera [The orchestra plays without conductor]. Moscow: Nauka 1984.
14. *Novikov D.A.* Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami [Theory of management of organizational systems]. Moscow: MPSI, 2005, 584 p.
15. *Kapustyan S.G.* Mnogourovnevaya organizatsiya kollektivnogo vzaimodeystviya v gruppakh intellektual'nykh robotov [Multilevel organization of collective interaction in groups of intelligent robots], *Izvestiya TRTU [Izvestiya TSURE]*, 2004, No. 9, pp. 149-158.
16. *Kalyaev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G.* Raspredelemnnye sistemy planirovaniya deystviy kollektivov robotov: monografiya [The distributed systems of planning of actions of collectives of robots [Text] the monograph]. Moscow: YANUS-K, 2002, 292 p.
17. *Burkov V.N.* Osnovy matematicheskoy teorii aktivnykh system [Bases of the mathematical theory of active systems]. Moscow: Nauka, 1977, 255 p.
18. *Burkov V.N., Novikov D.A.* Teoriya aktivnykh sistem: sostoyanie i perspektivy [Theory of active systems: state and prospects]. Moscow: SINTEG, 1999, 128 p.
19. *Petrakov S.N.* Mekhanizmy planirovaniya v aktivnykh sistemakh: nemanipuliruemost' i mnozhestva diktatorstva [Planning mechanisms in active systems: nonmanipulability and sets of dictatorship]. Moscow: IPU RAN, 2001, 135 p.
20. *Sviridov V.V., Sviridova Yu.A.* Sposob adaptivnogo gruppovogo upravleniya robototekhnicheskimi kompleksami i sistema dlya ego osushchestvleniya [Sposob of adaptive group management of robotic complexes and system for its implementation], Patent for the invention No. 2758870 of November 02, 2021.
21. *Sviridov V.V.* Metodicheskiy podkhod k ratsional'nomu primeneniyu raznorodnykh robototekhnicheskikh kompleksov dlya resheniya zadach okhrany i oborony kriticheskikh vazhnykh ob"ektov RVSN ot vozdeystviya diversionno-razvedyvatel'nykh grupp protivnika [Methodical approach to rational application of diverse robotic complexes for the solution of problems of protection and defense of crucial objects of RVSN against influence of diversionary and prospecting groups of the opponent], *Voennaya mysl'* [Military Thought], 2021, No. 6, pp. 57-64. ISSN 0236-2058.
22. *Sviridov V.V., Povshenko G.T., Fedoseenko N.V. (RU).* Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2020614057 Rossiyskaya Federatsiya. Programma dlya EVM «Raschet adaptivnogo gruppovogo upravleniya robototekhnicheskimi kompleksami voennogo naznacheniya na osnove gibkosti struktury sistemy upravleniya k izmenyayushchimsya vneshnim usloviyam, s otsenkoy boevoy effektivnosti» [Certificate on the state registration of the computer program No. 2020614057 Russian Federation. The computer program "Calculation of adaptive group management of military robotic complexes on the basis of flexibility of structure of a control system to the changing external conditions, with an assessment of fighting efficiency"]. Demand No. 2020612894; date of registration in the Register of the computer programs 26.03 2020.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.А. Котов.

Свиридов Виктор Викторович – Филиал Военной академии РВСН имени Петра Великого; e-mail: sviridov@list.ru; г. Серпухове, Россия; к.т.н.; с.н.с.

Sviridov Viktor Viktorovich – Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces named after Peter the Great; e-mail: sviridov@list.ru; Serpukhov, Russia; cand. of eng. sc.; senior researcher.