

Раздел I. Перспективы применения робототехнических комплексов

УДК 005.216: 621.86

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-6-19

В.К. Абросимов, А.Н. Седов

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ КОЛЛЕКТИВНОЙ МИССИИ МНОГОАГЕНТНОЙ ГЕТЕРОГЕННОЙ ГРУППОЙ

Целью исследования является определение критериев, параметров и показателей эффективности выполнения коллективных миссий группами, включающими в свой состав объекты управления разной функциональности и целевой нагрузки. В качестве примера миссии рассматривается самая актуальная военно-техническая задача последнего времени – мониторинга протяженных пространств. Особенностью постановки задачи является предположение о наличии опасных зон в области мониторинга. Любое противодействие потенциально критичных объектов, способное существенно ограничить возможности и даже лишить работоспособности средства мониторинга, оказывает влияние на постановку и выполнение группой миссии и неизбежно приводит к пересмотру как коллективных стратегий управления группой, так и индивидуальных стратегий средств мониторинга, маршрутов их движения, алгоритмов принятия решений и др. Средства мониторинга моделируются как интеллектуальные агенты, обученные в парадигме «коллективизма». Указанное обеспечивает общий ресурс ситуационной осведомленности группы, организацию переговоров агентов и взаимопомощи друг другу при возникновении проблемных ситуаций. Разработан общий подход к оценке эффективности решения коллективных задач гетерогенной группой разнотипных и разнородных агентов с учетом целевой функции, ресурсоемкости всей миссии организацией активного взаимодействия агентов между собой. Характеристику эффективности миссии предложено формировать как взвешенную сумму нормированных показателей параметров функций агентов с весами "значимость функции для миссии" и "ценность объекта" для группировки. Показано, что потеря эффективности выполнения коллективной миссии при возникновении проблемных ситуаций с агентом (активное воздействие противника, поломка, отсутствие необходимого функционала, ресурсов и др.) может быть возмещена требуемым функционалом других агентов группы с соответствующей реконfigurацией задач.

Агент; группа; объект управления; критерий; эффективность; коллективизм.

V.K. Abrosimov, A.N. Sedov

EFFICIENCY OF THE COLLECTIVE MISSION BY A MULTIGENT HETEROGENEOUS GROUP

The article deals with study of the criteria, parameters and performance indicators for the implementation of the collective mission of extended space monitoring by a group that includes control objects with different functionality. The most urgent military-technical task of recent times – monitoring of extended spaces- is considered as an example of a mission. A feature of the article is the assumption about of hazardous zones in the monitoring area. Any counteraction from potentially critical objects may significantly limit the capabilities and even disable the monitoring tools. This proviso affects for implementation of the mission by the group and leads to a revision of the group collective strategies and individual strategies for monitoring tools, their movement routes, and decision-making algorithms and etc. Monitoring tools are modeled as intelligent agents trained by the "collectivism" paradigm. It provides a common resource of situational awareness of the group, the organization of

negotiations between agents and mutual assistance to each other in the event of problem situations. A general approach has been developed to evaluate the effectiveness of solving collective problems by a heterogeneous group of agents, taking into account the objective function, resource intensity of the entire mission and organizing active interaction between agents. It is proposed that the mission efficiency characteristic expressed as a weighted sum of the normalized indicators of the parameters of the agents' functions with the weights "significance of the function for the mission" and "value of the object". It is shown that the loss of efficiency in the performance of a collective mission in the event of problematic situations with an agent (active enemy action, breakdown, lack of the necessary functionality, resources, etc.) can be compensated by the required functionality of other agents of the group with the appropriate reconfiguration of tasks.

Agent; group; control object; criterion; efficiency; collectivism.

Введение. К числу важных военно-технических задач относятся задачи мониторинга протяженных пространств. В процессе мониторинга исследуется текущая ситуация в выделенной зоне ответственности, могут обнаруживаться искомые объекты, распознаваться и идентифицироваться критические события, фиксироваться нежелательные явления и др. Возникающие в процессе мониторинга ситуации часто требуют использования нескольких объектов управления с разной степенью функциональности, перераспределения задач в формате on-line, обмена информацией и командами управления. Поэтому все большее внимание уделяется групповому управлению. Ключевую роль при этом играет интеллектуализация объектов управления, способность обучаться, функционировать в заранее неопределенных условиях, зачастую при объективно пассивном или целенаправленно активном противодействии внешней среды.

Научно-технические задачи последнего времени выдвигают на основные роли в группах интеллектуальные объекты управления с различным функционалом. Указанное связано с тем, что целеполагание в сложной недоопределенной среде может быть задано только в общем виде. Это обуславливает требования многофункциональности и адаптивности (неясно, какие проблемы могут возникнуть при выполнении миссии, какие факторы будут воздействовать и др.). В этих миссиях задачи возлагаются на многофункциональные группы, состоящие из разнотипных, часто разнородных объектов управления с различным функционалом. Управление в группах таких объектов является в настоящий момент важнейшей задачей, направленной на преодоление технологических барьеров в сфере искусственного интеллекта и роботизации. Любое действие, противодействие, иное событие здесь будет влиять на постановку и собственно выполнение группой миссии и может приводить к пересмотру и перестроению как коллективных стратегий управления группой, так и индивидуальных стратегий отдельных объектов, маршрутов их движения, алгоритмов принятия решений и др.

В практическом плане наиболее интересно исследование процессов группового управления в группах наземных робототехнических средств, беспилотных летательных аппаратов, автономных необитаемых надводно-подводных аппаратов, которые могут действовать совместно в процессе выполнения задач с пилотируемой техникой различных типов базирования-воздушным, наземным, морским, подводным. Такие группы называют гетерогенными, в отличие от гомогенных групп, в состав которых входят объекты управления из одного множества. Управление в гетерогенных группах предлагается называть коллективным, что отличает его от группового управления в гомогенных группах [1, 2].

В работе [2] объекты управления предложено рассматривать как интеллектуальных агентов. Действительно, обученные определенным парадигмам поведения в сложных противодействующих средах системы управления объектов могут описывать возможности агентов, а необходимые ресурсы для их функционирования можно представлять как их потребности. Указанное позволяет рассматривать:

а) гетерогенную группу как многоагентную систему;

б) алгоритмы системы управления объектом – как обучение агентов соответствующему поведению;

в) взаимодействие в такой группе как взаимодействие в многоагентной системе;

г) обмен информацией и принятие решений объектами управления – как проведение переговоров агентов с выработкой решающих правил.

Ниже предлагается именно такой подход.

К числу основных задач в группах относятся задачи обмена информацией между членами группы и выработки так называемого коллективного поведения. Как следствие, формируется определенная иерархичность группы. В рамках различных допустимых иерархий агенты либо выделяют Лидера, который управляет группой и определяет соответствующие приоритеты, либо проводят так называемые «переговоры» по распределению задач и преодолению возникающих проблемных ситуаций [3].

Среда функционирования гетерогенных групп редко является нейтральной; существуют объективные возмущающие природные, а чаще целенаправленно противодействующие факторы, существенно ограничивающие возможности агентов по реализации миссии. Для выработки групповых стратегий управления в работе [2] предложена специальная парадигма «коллективизма». В ее основу закладывается принцип «сотрудничества» агентов друг с другом, по которому при необходимости и возникновении заранее определенных условий объекты оказывают друг другу помощь своим функционалом и ресурсами, порой даже пренебрегая решением собственных задач. В рамках парадигмы "коллективизма" обучаются агенты трех видов: "альтруисты", всегда готовые оказать помощь другим членам группы как функционалом, так и ресурсами, "прагматики", оказывающие помощь при наступлении определенных условий и "эгоисты", имеющие высокий статус и не предназначенные для оказания помощи.

К числу практически важных проблемных вопросов исследования коллективного поведения в гетерогенных группах относятся вопросы оценки их эффективности. Эффективность отдельного агента обычно оценивают таким критерием, как «удовлетворенность агента» [4]. Как правило, показатели удовлетворенности связываются с так называемыми «поощрениями» за качественно выполненную работу, статус в группе и др. Вопросы же эффективности выполнения всей миссии до настоящего времени, как представляется, слабо исследованы. Отдельные результаты, см, например [5–7], описывающие методики количественной оценки миссии организации, методы повышения эффективности групповой деятельности команд и др., во-первых, описывают другие объекты исследования, а во-вторых – неприменимы вследствие принципиальной разницы решаемых задач. Действительно, сравнение эффективности двух групп агентов управления на основе "лепестковых" диаграмм или диаграмм типа "несимметричная звезда" возможно и правильно для человеческих коллективов, но позволяет работать только на шкалах порядка и не решает задач количественных оценок эффективности.

1. Краткий обзор литературы. Несмотря на активное использование в литературе по групповому управлению термина «эффективность», чаще всего оно употребляется без четких математических обоснований. Так в работе [1] подчеркивается необходимость руководствоваться критерием эффективности и указывается, что в групповой робототехнике существует два вида критериев эффективности: первого рода – степень достижения цели и второго рода – оценка эффективности в некотором заданном пути достижения цели. Но это никак не приближает к оценке реальной эффективности, особенно применительно к группам.

Достаточно стандартным подходом является выбор в качестве критерия эффективности времени решения задачи группой [8], суммарной длины траектории, необходимой для перемещения всех объектов (роботов) группы из начального по-

ложения в целевое [9] и др. При этом предполагается, что эффективность может быть повышена за счет рационального планирования и распределения заданий в группе роботов, повышения автономности и адаптивности управления на уровне отдельных агентов, адекватным прогнозом внешней ситуации и учетом ее объективной неопределенности, перераспределением нагрузки между роботами [10]. На повышение эффективности решения коллективных задач группами роботов различных типов указывают авторы работы [11], выдвигая в качестве критериев также оперативность решения соответствующих задач.

Интересный парадокс зафиксирован в работе [12]. Авторы в качестве критерия эффективности традиционно выбирают время решения задачи группой. Но подчеркивается, что в многообъектных системах возможен различный характер поведения этого критерия эффективности в зависимости от числа элементов: в общем случае время выполнения задачи небольшим количеством элементов группы сокращается с ростом их числа; далее, оно слабо колеблется у некоторой постоянной величины, а затем роботы начинают «мешать друг другу» и время решения задач увеличивается, а эффективность убывает.

В работе [13] эффективность применительно к промышленным роботам связывается с их производительностью, что очевидно. Но группы роботов, исследуемые в настоящей работе, имеют совершенно иной характер и задачи, чем группы промышленных роботов. Авторы работы [14] полагают, что эффективность напрямую связана с оптимизацией, в свою очередь зависящую от знания окружающей среды. Оценка функциональных характеристик роботов осуществляется на основе нечеткой модели, состоящей из отдельных нечетких классификаторов; каждый из них позволяет получить количественную оценку одного из параметров. В статье [15] опровергается распространенное мнение о том, что добавляя отдельные ресурсы к слабым в функциональном отношении роботам, в конечном итоге можно достичь заданной и высокой общей производительности системы. В результате в группу включаются более дорогие объекты управления, суммарная эффективность которых становится ниже.

Наиболее близко к рассматриваемой тематике относятся идеи авторов работ [16] и [17]. В статье [16] правильно связываются вопросы снижения эффективности решения групповых задач с возможным отказом отдельных роботов в условиях отсутствия централизованной системы принятия решений и возможности обмена информацией на уровне роя малых объектов. А автор работы [17] не только связывает эффективность решения групповых задач с количеством агентов, но также и выделяет показатель производительности, учитывающий все затраты, связанные с задачей. Выводятся аналитические выражения, которые можно использовать для прогнозирования оптимальных границ производительности системы с учетом конкретного описания задачи для различных стратегий поиска решения. Важно, выигрыш в производительности зависит от относительных значений различных составляющих стоимости.

В практическом плане указанный класс задач достаточно сильно коррелирует с задачами контроля состояния сельскохозяйственных полей [18]. Однако в таких задачах приоритет отдается исследованию эффективности самих аппаратов [19], а методы оценивания эффективности – с удовлетворенностью агентов, которые представляют беспилотные летательные аппараты. Эффективность же миссии напрямую связывается с уровнем специального вегетационного индекса, который слишком отдаленно связан с возможностями средств мониторинга.

Постановка задачи. Вопрос оценки эффективности коллективной миссии рассмотрим на примере мониторинга протяженного пространства, в котором находится активные средства противодействия противника, группой разнотипных объектов управления (наземные средства и беспилотники двух видов).

Дано:

1. Протяженное пространство площадью S .
 2. На пространстве S возможно нахождение двух типов объектов- не критич-ных A и критичных B , способных оказывать на средства мониторинга негативное воздействие и с вероятностью P_B снижать их работоспособность.

3. Для реализации миссии выделяются следующие средства мониторинга:

а) наземное средство (НС), способное передвигаться с низкой скоростью, обнаруживать, но не распознавать и идентифицировать объекты, и имеющее низкие возможности по нейтрализации объектов класса B ($P_{НС} \ll P_B^*$).

б) воздушное средство (ВС), обученное в парадигме "альтруист", способное передвигаться с ограниченной скоростью, обнаруживать, распознавать и идентифицировать объекты, и имеющее значительные возможности по нейтрализации объектов класса B ($P_{ВС} \gg P_B^*$).

в) воздушное средство (ВС-А), обученное в парадигме "прагматик", способное передвигаться с высокой скоростью, обнаруживать, распознавать и идентифицировать объекты, но имеющее ограниченные возможности по нейтрализации объектов класса B ($P_{ВСА} < P_B^*$).

д) функция эффективности выполнения миссии формируется как обследованная площадь S за заданное время T с обнаружением и идентификацией всех объектов и, при необходимости, воздействием на все критические объекты класса B .

Требуется.

1. Разработать подход к определению эффективности мониторинга протяженного пространства гетерогенной группой средств мониторинга.

2. Осуществить мониторинг пространства площадью S .

3. Обнаруженные объекты распознать и идентифицировать.

4. Если объект относится к классу A , о его статусе и расположении необходимо сообщить лицу принимающему решение.

5. Если объект относится к классу B , на него необходимо оказать воздействие с вероятностью снижения опасности P_B^* .

6. Оценить характер поведения функции эффективности выполнения миссии.

2. Системный аспект эффективности выполнения миссии. Выполнение миссии M группой агентов можно считать эффективным с интегральным критерием \mathcal{E}_M , если в процессе ее выполнения а) обеспечено высокое качество решения распределенных среди агентов задач I_M^Σ с максимальным использованием функционала агентов; б) затрачен минимум ресурсов R_M^Σ всех задействованных в миссии агентов и в) проявлена высокая степень коллективизма агентов в группе (C_M^Σ). Условно можно записать простой кортеж условий:

$$\mathcal{E}_M \Leftrightarrow \{I_M^\Sigma, R_M^\Sigma, C_M^\Sigma\}. \quad (1)$$

Здесь и далее логический символ-мнемоник \Leftrightarrow означает "то же, что и.."

Миссия, как правило, включает в себя решение нескольких $i \in I$ задач (рис. 1). Указанные задачи решаются $k \in K$ объектами, включаемыми в гетерогенную группу. Так, стандартная миссия мониторинга протяженных пространств объектов управления декомпозируется на задачи перемещения в пространстве, наблюдения, обнаружения, распознавания, идентификации агентов, событий, ситуаций, информирования путем передачи информации лицам, принимающим решения, возврата на базу и др.

Каждый k -ый агент обладает определенным функционалом F , включающим J функций

$$F_k \Leftrightarrow \{f_{1k}, f_{2k}, \dots, f_{jk}, \dots, f_{Jk}\}, \quad (2)$$

где f_{jk} – j -ая функция k -го объекта. Так, в задачах мониторинга протяженных пространств выделяется следующая функциональность:

- ◆ наземный робот-перемещается, наблюдает, обнаруживает, при наличии на борту специальных программ и средств обработки информации распознает, идентифицирует, классифицирует, при необходимости оказывает воздействие на среду (робот с манипулятором – осуществляет действия);

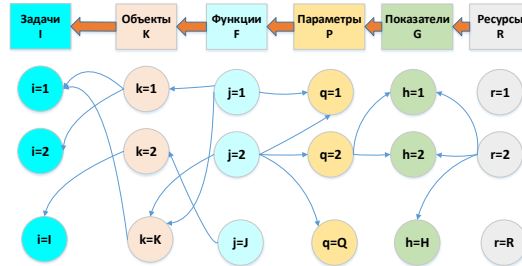


Рис. 1. К взаимосвязи агентов, решающих задачи миссии \mathcal{M}

- ◆ воздушный беспилотник- перемещается в воздушном пространстве, наблюдает, обнаруживает, при наличии на борту специального ПО и средств обработки распознает, идентифицирует классифицирует, при необходимости оказывает воздействие на среду (боевой беспилотник- атакует);

- ◆ морской надводный беспилотный аппарат- перемещается по воде, наблюдает, обнаруживает, при наличии на борту специальных программ и средств обработки распознает, идентифицирует классифицирует, при необходимости оказывает воздействие на среду (боевой комплекс – стреляет);

- ◆ подводный необитаемый аппарат-погружается, перемещается под водой, наблюдает, обнаруживает, запоминает информацию, всплывает, передает информацию.

Каждая j -ая функция может быть описана совокупностью соответствующих измеряемых параметров P :

$$P \Leftrightarrow \{p_{1jk}, p_{2jk}, \dots, p_{qjk}, \dots, p_{Qjk}\}, \quad (3)$$

где p_{qjk} – q -ый параметр j -ой функции k -го объекта.

Так, к параметрам функции «мониторинг» можно отнести площадь/объем пространства мониторинга и оперативность обследования заданной площади территории. Основным параметром функции «обнаружение агентов интереса» является вероятность обнаружения агентов. В функциях распознавания (идентификации) как параметр выступает качество правильного распознавания (идентификации), то есть вероятность ошибок первого и второго рода (принять при в процессе распознавания и идентификации правильный объект за неправильный и неправильный за правильный). Можно привести и другие примеры.

Каждый параметр из P может быть описан совокупностью показателей, которые выражаются в виде числовых или лингвистических оценок:

$$G \Leftrightarrow \{g_{1qjk}, g_{2qjk}, \dots, g_{hqjk}, \dots, g_{Hqjk}\}, \quad (4)$$

где g_{hqjk} – h -ая оценка g -го показателя q -го параметра j -ой функции k -го объекта. Так, показателем параметра «площадь территории» является числовая величина площади (пример: кв. км). Показателем параметра «вероятность обнаружения агентов» является лингвистическое выражение «очень высокая» либо соответствующая цифра и др. Достижение заданных значений показателей g_{hqjk}^* при решении i -той задачи миссии должно быть обеспечено определенными ресурсами $r_{ik} \in R_k^\Sigma$. Естественно, что суммарные ресурсы каждого k -го агента по решению всех задач, возлагаемых на него, также ограничены $R_k^\Sigma \leq R_k^{\Sigma*}$.

Практика показывает, что множество функций F , параметров функций P и показателей H параметров G для каждого k -того агента конечно.

3. Функциональность миссии. В процессе выполнения назначенной i -ой задачи агент $k \in K$ вносит в эффективность соответствующий вклад $\Delta \mathcal{E}_{ik}$, затрачивая ресурс r_{ik} . Поэтому текущая функция $\mathcal{E}_{\mathcal{M}}$ эффективности выполнения миссии \mathcal{M} в части решения всех задач $I_{\mathcal{M}}^{\Sigma}$ может формироваться как суммарное приращение эффективности, обеспечиваемое вкладом всех K агентов в решение всех поставленных им задач. В работе [2] обосновывается, что не все задачи для выполнения миссии могут быть равнозначными. Кроме того, и ценность агентов может быть различной и связываться с их стоимостью, наличием установленной аппаратуры, парадигмой обученности и др. Введем весовой коэффициент $\varphi_{i\mathcal{M}}$ значимости i -той задачи для выполнения миссии \mathcal{M} и коэффициент β_k для обозначения ценности k -того агента для группировки. Тогда

$$\mathcal{E}_{\mathcal{M}}(t) = \sum_I \varphi_{i\mathcal{M}} * \sum_K \{\beta_k * \Delta \mathcal{E}_{ik}(t)\}, \quad (5)$$

где $\Delta \mathcal{E}_{ik}(t)$ – текущее приращение эффективности миссии при решении i -ой задачи k -ым агентом.

На рис. 1 условно показана взаимосвязь ресурсов R , обеспечивающих получение $h \in H$ показателей G , описывающих $q \in Q$ параметров P , характеризующих $j \in J$ функций F , присущих агентам из множества K . С учетом того, что критериями эффективности по сути являются параметры функций агентов, процесс выполнения миссии сводится к получению заданных значений показателей параметров g_{hqjk}^* при решении всех $i \in I$ задач всеми $k \in K$ объектами с использованием F_k функций.

Перечисленные выше функции агентов существенно различаются как по смыслу (движение, распознавание, воздействие на среду и др.), так и по размерности показателей (скорость движения, оперативность выполнения задачи, вероятность распознавания, надежность успешного воздействия на среду и др.). Для объединения разнотипных сущностей в когнитивном моделировании и теории принятия решений существует единственный методический прием – взвешенная сумма нормированных величин. Для этого приведем к нормальному виду на интервале $[0,1]$ текущие значения $g_{hqjk}(t)$ показателей G параметров Q функций F , осуществив следующее преобразование нормирования

$$g_{hqjk}^n(t) = g_{hqjk}(t) / g_{hqjk}^{max}. \quad (6)$$

Приращения эффективности $\Delta \mathcal{E}_{ik}(t)$ обеспечиваются за счет приращения значений показателей $g_{hqjk}(t)$. Поэтому

$$\Delta \mathcal{E}_{ik}(t) = \sum_J \sum_Q \sum_H \{\Delta g_{hqjk}^n(t)\}. \quad (7)$$

В начальный момент времени эффективность выполнения миссии $\mathcal{E}_{\mathcal{M}}(t_0) = 0$. Далее, по мере выполнения миссии, функция эффективности увеличивается, стремясь к заданной, которую можно выразить таким образом:

$$\mathcal{E}_{\mathcal{M}}^* = \sum_I \varphi_{i\mathcal{M}} * \sum_K \{\beta_k * \sum_J \sum_Q \sum_H g_{hqjk}^{n*}(t)\}. \quad (8)$$

4. Ресурсоемкость миссии. Введем понятие «ресурсоемкости» миссии, под которой будем понимать общую сумму всех ресурсов, затраченных на выполнение задач всеми объектами, участвующими в выполнении задач миссии.

$$R_{\mathcal{M}} = \sum_I \varphi_{i\mathcal{M}} * \sum_K \{\beta_k * R_{ik}^{\Sigma}\} \rightarrow \min. \quad (9)$$

В начале миссии ресурсы k -ного агента могут быть использованы а) для обеспечения приращений показателей $\Delta g_{hqjk}^n(t)$ и б) для помощи другим объектам. В любом случае суммарные ресурсы каждого агента ограничены определен-

ным минимумом R_k^{\min} , определяемого пределом выживаемости объекта. Так, применительно к БПЛА фактор выживания заключает в наличии «неприкосновенного запаса» ресурса $R_{\text{БПЛА}}^{\min}$, необходимого для решения задачи самостоятельного возвращения в исходную точку начала маршрута.

Примеры:

а) возникновение тумана снижает возможности функции распознавания агентов оптической системой технического зрения и оба параметра эффективности этой функции а) дальность потенциального распознавания б) вероятность распознавания;

б) ночные условия выполнения задач приводит к преждевременному расходу ресурса агента (например, топлива) и невыполнению агентом задачи.

в) повреждение боевого агента системой противодействия противника приводит к потере возможности его влияния (воздействия) на противника.

г) если поставленные задачи для БПЛА требуют значительных ресурсов, то при условии $r_{ik}(t) < R_k^{\min}$, выполнение задач прекращается и БПЛА возвращается на базу.

Естественно, нужно стремиться к минимизации общих затрачиваемых ресурсов $R_M \rightarrow \min$.

5. Коллективизм миссии. Рассмотрим сначала человеческий коллектив. Коллективы не формируются спонтанно, они образуются в процессе выполнения общих миссий. Характеристики коллективов обычно выражаются лингвистическими переменными: сплоченный, работоспособный, разносторонний, дружеский и др. Коллективы выполняют различные миссии, но в рамках одной предметной области. Лидер в коллективе появляется постепенно и его возникновение, как показывают результаты гуманитарных и социологических исследований, часто бывает неожиданным; далеко не все участники коллективов обладают лидерскими задатками.

Целесообразно провести некоторые аналогии для технических задач.

Принципиально потеря эффективности выполнения всей миссии $\Delta \bar{E}_M^-$ складывается из потерь эффективности $\Delta \bar{E}_{iz}^-$, которые возникают за счет невыполнения i -тых задач отдельными $z \in Z \subset K$ -тыми объектами

$$\Delta \bar{E}_M^- = \sum_I \varphi_{iM} * \sum_Z \{\beta_z * \Delta \bar{E}_{iz}^-(t)\}, \quad (10)$$

В свою очередь потеря эффективности при выполнении i -ой задачи конкретным z -ым агентом складывается из нескольких составляющих:

- ◆ возможной потери работоспособности за счет поломки или активного влияния внешней среды;
- ◆ сохранения функциональности, но изменения значений параметров функций в негативном для эффективности миссии направлении;
- ◆ сокращения ресурсов для решения собственных задач за счет предоставления их другим агентам.

Тогда, с учетом (8)

$$\sum_Z \beta_z * \Delta \bar{E}_{iz}^-(t) = \sum_Z \{\beta_z * \sum_J \sum_Q \sum_H \{\Delta g_{hjqz}^n(t)\}\}. \quad (11)$$

Здесь $\Delta \bar{E}_{iz}^-(t)$ потеря эффективности выполнения миссии за счет z -го агента при решении i -ой задачи, а Δg_{hjqz}^n — степень снижения эффективности миссии на величину h -того показателя q -того параметра j -ой функции z -го агента при выполнении i -ой задачи миссии.

В соответствии с парадигмой коллективизма [2] при формировании гетерогенной группы в нее включаются разнотипные и разнородные объекты, объединенные по информации и управлению с возможностью функциональной взаимопомощи друг другу. Такие решения способны компенсировать потерю $\Delta \bar{E}_M^-$ эффективности выполнения миссии.

С учетом включения в группу агентов $ka \in K$, обученных в парадигме коллективизма со статусом альтруистов «А» с оказанием помощи в размере $\Delta g_{hqjza}^{n+}(t)$, и $ku \in K$ с статусом прагматиков «U» с оказанием помощи в размере $\Delta g_{hqjzu}^{n+}(t)$ можно записать выражение, обеспечивающее приращение эффективности от альтруистов и прагматиков:

$$\Delta \mathcal{E}_M^+ = \sum_{KA} [\beta_{ka} * \sum_j \sum_Q \sum_H \{\Delta g_{hqjka}^{n+}(t)\}] + \sum_{KU} [\beta_{ku} * \sum_j \sum_Q \sum_H \{\Delta g_{hqjku}^{n+}(t)\}]. \quad (12)$$

Выполнение условия

$$\Delta \mathcal{E}_M^+ \geq \Delta \mathcal{E}_M^- \quad (13)$$

означает, что положительное приращение эффективности миссии превышает отрицательные потери. Поскольку положительный эффект должен достигаться путем использования ресурсов других агентов, то выражение (13) можно рассматривать как подтверждение преимуществ использования парадигмы коллективизма. При этом степень коллективизма C_M^Σ данной гетерогенной группы при выполнении миссии \mathcal{M} целесообразно оценивать величиной отношения

$$C_M^\Sigma = \Delta \mathcal{E}_M^+ / \mathcal{E}_M^*, \quad (14)$$

т.е. долей эффективности оказанных сервисов помощи по отношению к заданному значению эффективности всей миссии.

Очевидно, что вся миссия будет считаться эффективной, если одновременно выполняются три условия:

$$\{ \mathcal{E}_M(t) \geq \mathcal{E}_M^* \} \wedge \{ R_M \rightarrow \min \} \wedge \{ C_M^\Sigma \rightarrow \max \}. \quad (15)$$

6. Удовлетворенность агентов. Суммарная степень коллективизма группы складывается не из индивидуальных оценок удовлетворенности входящих в нее агентов, а из совокупности сервисов, оказанных агентами друг другу. Здесь также могут использоваться критерии, связанные, прежде всего, с уровнем взаимопомощи; они могут формулироваться в терминах показателей параметров агента, затраченных на помощь другим объектам. В теории многоагентных систем активно используется понятие «удовлетворенности» объекта. Каждый агент имеет получает набор атрибутов, которые описываются показателями. В зависимости от значения показателя в данной ситуации агент может быть либо удовлетворен, либо неудовлетворен. Функции удовлетворенности задаются в кусочно-линейном виде и хранятся в онтологии [4]. Однако вопрос удовлетворенности агентов, функционирующих в составе гетерогенной группы, тем более в парадигме коллективизма, пока не исследован. Как представляется, понятие удовлетворенности агента для этих условий также может применяться. Но если для практически апробированных многоагентных систем решается, как правило, задача, когда агенты соревнуются за выполненные задач, имея соответствующие ресурсы [1, 4, 18 и др.], то для гетерогенных систем, реализующих принципы коллективизма, ситуация принципиально иная.

Удовлетворенность объекта-альтруиста ka складывается из двух составляющих – объема вклада в общую целевую функцию $\Delta \mathcal{E}_{ika}$ при решении i -ой задачи и объема услуг, оказанных $x \in X$ другим объектам $\Delta \mathcal{E}_{ika \rightarrow x}$. Согласно парадигме «коллективизма» в самом начале выполнения миссии объект-альтруист полностью неудовлетворен [2]. Его удовлетворенность ступенчато возрастает в функции объема предоставленных другим агентам сервисов. Если к агенту-альтруисту никто не обращается за ресурсом, то его удовлетворенность не меняется, оставаясь на уровне, достигнутом к моменту оказания последней услуги. Но ресурсы не бесконечны и они требуются также и самому агенту-альтруисту для собственного «выживания» (см. п. 3). Если в момент исчерпания части своего ресурса, потенциально возможного для помощи другим агентам, к агенту-альтруисту поступает запрос на его ресурсе, а он его выполнить не может, то его удовлетворенность падает, в зависимости от числа обращений и объема оказываемых услуг.

Как следует из изложенного, объект-альтруист будет стремиться к максимизации следующей функции удовлетворенности

$$W_{KA} = \max [\sum_I \varphi_{iM} * \sum_{KA} \{\beta_{ka} * \sum_X \sum_J \sum_Q \sum_H \{g_{hjqka \rightarrow x}^n(t)\}\}]. \quad (16)$$

Здесь X-количество агентов группы, которым оказано содействие. Выражение (16) справедливо и для агентов-прагматиков за тем исключением, что по мере выполнения i-ой задачи миссии удовлетворенность каждого ku-го объекта-прагматика понижается на величину оказанных сервисов. Поэтому прагматик будет стремиться к минимизации оказанных сервисов

$$W_{KA} = \min [\sum_I \varphi_{iM} * \{\beta_k * \sum_{KA} \sum_X \sum_J \sum_Q \sum_H \{g_{hjqku \rightarrow x}^n(t)\}\}], \quad (17)$$

Агент-эгоист полностью удовлетворен тогда, когда к нему нет обращений за помощью [2]. В соответствии с концепцией коллективизма, он никому не оказывает услуг и его удовлетворенность со временем не меняется. По сути он исключается из процессов анализа удовлетворенности, и, следовательно эффективности. Он призван обеспечивать ее и только этим влиять на ее изменение. При этом такие объекты не участвуют в оценке общей степени коллективизма группы.

В описание объекта управления как интеллектуального агента предлагается включать параметры, отражающие опыт и квалификацию агента [2]. Опыт агента может быть учтен посредством числа миссий, к выполнению которых он привлекался. Квалификация агента может быть ассоциирована с стандартным критерием много-агентных систем – степенью его удовлетворенности, суммируемой по числу миссий.

6. Результаты эксперимента. Для оценки эффективности решения групповых задач с использованием библиотеки Matlab была разработана специальная модель реализации миссий \mathcal{M} мониторинга протяженных пространств группами наземных и летательных аппаратов. Планирование миссии осуществлялось из условия выделения в зоне мониторинга площадей, соответствующих скоростным и интеллектуальным (обнаружения, распознавание и идентификация) возможностям аппаратов. При наличии предварительной информации о расположении на местности критичных объектов класса В эти районы считались приоритетными посредством задания коэффициентов φ_{iM} значимости задач для выполнения миссии. Заданием коэффициента β_k ценности k-го агента для группировки регулировалось распределение задач для более ценных (по стоимости и интеллектуальным возможностям) наземных и летательных аппаратов. Воздушные средства мониторинга обучались в парадигме «коллективизма». В процессе моделирования по мере выполнения задач и соответствующих вкладов средств мониторинга изменялась функция эффективности выполнения миссии за счет вкладов, а средствам мониторинга назначались условные «награды» за оказание соответствующей помощи другим средствам, отказа от собственных задач и решения невыполненных задач за других объектов. Для обеспечения адекватности модели вводились также и «штрафы» за нерешенные задачи (необнаружение критичного объекта класса "В", неправильная идентификация объектов и др.), а также за превышение общего времени мониторинга заданных значений.

В процессе экспериментов рассматривались различные сценарии, в том числе обучение средств мониторинга в различных парадигмах «коллективизма», варьирование скоростью движения как наземных, так и воздушных средств, различные «поощрения» и «наказания» агентов, высокая и низкая активность критичных объектов, а также их количество в зоне мониторинга. В результате установлено, что функция эффективности $\mathcal{E}_m(t)$ миссии мониторинга протяженных пространств имеет кусочно-непрерывный (при дискретных значениях времени) и, как правило, возрастающий характер (рис. 1). Она формируется за счет изменяющихся вкладов агентов $\Delta \mathcal{E}_k^T$ (обследованная площадь территории, обнаруженные и идентифицированные

объекты классов А и В, нейтрализованные объекты класса В). Резкие скачкообразные положительные изменения функции связаны с событиями, описываемые фактами (обнаружен объект, распознан объект, проведено действие по нейтрализации критичного объекта. Резкие отрицательные изменения значений функции эффективности связаны с форс-мажорными обстоятельствами вследствие пассивного или активного воздействия со стороны критичных объектов и, как следствие, снижением возможности выполнения задач средств мониторинга вплоть до потери работоспособности (пример: состояние НС в момент 5+ на рис. 1). В условиях неопределенности наличия в зоне мониторинга не критичных и критичных объектов время мониторинга, как правило, превышало изначально заданное значение и затрачивалось, главным образом, на смену маршрутов движения для нейтрализации критичных объектов теми средствами, которые имели соответствующие возможности; при этом их невыполненные задачи пришлось возлагать на другие средства мониторинга.

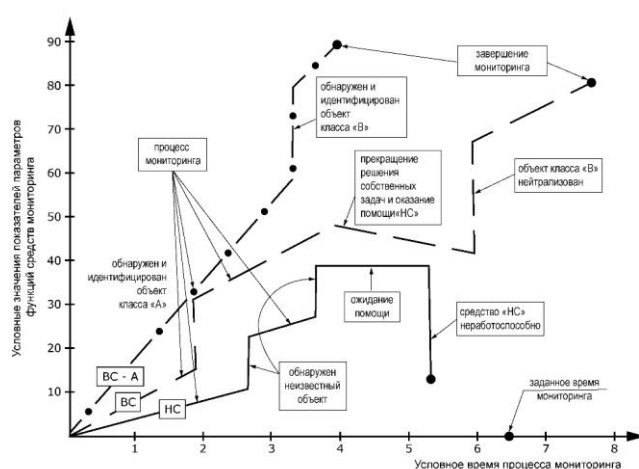


Рис. 1. Иллюстрация вкладов отдельных средств мониторинга в общую функцию эффективности выполнения коллективной миссии

Заключение. Анализ отечественной и зарубежной литературы показал, что вопросы оценки эффективности функционирования групп при выполнении ими коллективных миссий, тем более в условиях противодействующей среды, исследованы недостаточно. В настоящей работе рассмотрены вопросы формирования критериев, параметров и показателей эффективности выполнения коллективной миссии мониторинга протяженных пространств группой, включающей в свой состав объекты управления разной функциональности и целевой нагрузки.

Объекты управления удобно представлять как интеллектуальных агентов, гетерогенную группу как многоагентную систему, алгоритмы системы управления объектом-как обучение агентов соответствующему поведению, взаимодействие в группе как взаимодействие в многоагентной системе, обмен информацией и принятие решений объектами управления – как проведение переговоров агентов с выработкой решающих правил. Разработан общий подход к оценке эффективности решения коллективных задач группой разнотипных и разнородных агентов с учетом целевой функции, ресурсоемкости всей миссии и использования парадигмы коллективизма с активным взаимодействием агентов между собой.

Целевая функция миссии формируется по результатам решения совокупности задач, составляющих миссию, с использованием функционала всех задействованных в миссии агентов. Характеристику ее эффективности предложено форми-

ровать как взвешенную сумму нормированных показателей параметров функций агентов, где веса могут характеризовать значимость функции и ценность агентов для выполнения поставленных перед миссией задач.

Удовлетворенность агентов-альтруистов определяется объемом помощи, возрастет с оказанием числа фактов помощи и снижается при невозможности помощи. Удовлетворенность агентов-прагматиков также связана с условием предоставления услуг; но при этом функция удовлетворенности обратна принятой у агентов-альтруистов – уменьшается с увеличением объема и количества предоставляемых сервисов.

Показано, что потеря эффективности выполнения коллективной миссии при возникновении проблемных ситуаций с объектами (активное воздействие противника, поломка, отсутствие необходимого функционала, ресурсов и др.) может быть возмещена требуемым функционалом других агентов группы с соответствующей реконфигурацией задач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коллективы интеллектуальных роботов. Сферы применения / под ред. В.И. Сырямкина. – Томск: STT, 2018. – 140 с.
2. *Abrosimov V., Mochalkin A.* Collective behavior strategy development based on friendship of robots // Proceedings of 4th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE), Valenciennes, France. – P. 38-4. – DOI: <https://doi.org/10.1145/3191477.3191479>.
3. *Rzevski G., Skobelev P.* Managing Complexity. – Wit Pr/Computational Mechanics, 2014. – 216 p.
4. *Майоров И.В.* Мультиагентные модели и технологии ситуационного управления ресурсами предприятий в условиях неопределенности: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Самара: ФГБОУ ВО Самарский государственный технический университет, 2017. – 259 с.
5. *Колесников А.В.* Методика количественной оценки миссии организации // Вестник РЭУ им. Г.В. Плеханова. – 2017. – № 5 (95). – С. 119-125.
6. *Коротков Э.М.* Менеджмент: учебник для бакалавров. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ИД Юрайт, 2014. – 684 с.
7. *Сидоренков А.В., Ульянова Н.Ю.* Управление эффективностью групп и команд в организации: учеб. пособие. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2016. – 328 с.
8. *Карпов В.Э.* Коллективное поведение роботов. Желаемое и действительное // Современная мехатроника: Сб. научных трудов Всероссийской научной школы (г. Орехово-Зуево, 22-23 сентября 2011). – Орехово-Зуево, 2011. – С. 35-51. – URL: <https://publications.hse.ru/chapters/51216080> (дата обращения: 02.11.2022).
9. *Павлов А.С.* Методика планирования траектории движения группы мобильных роботов в неизвестной замкнутой среде с препятствиями // Системы управления, связи и безопасности. – 2021. – № 3. – С. 38-59.
10. *Melnik E., Safronkova I., Kapustyan S.* The Efficiency Improvement of Robots Group Operation by Means of Workload Relocation // Proceedings of the International Conference on Interactive Collaborative Robotics. – 2021. – P. 126-137. – DOI: 10.1007/978-3-030-87725-5.
11. *Taeyong C., Jongwoo P., Jeong-Jung K., Young-Sik S., Hyunuk S.* Work Efficiency Analysis of Multiple Heterogeneous Robots for Harvesting Crops in Smart Greenhouses // Agronomy. – 2022. – No. 12 (11):2844. – DOI: 10.3390/agronomy12112844.
12. *Бакиров А.К., Кирильченко А.А.* Проблемы управления распределенными мобильными системами. – М., 2000. – 23 с.
13. *Essers M.S., Vaneker T.N.J.* Developing Concepts for Improved Efficiency of Robot Work Preparation // Proceedings CIRP. – 2013. – Vol. 7. – P. 515-520. – DOI.org/10.1016/j.procir.2013.06.025.
14. *Beloglazov D., Pereverzev V., Soloviev V., Pshikhopov V., Morozov R.* Method of Formation of Quantitative Indicators of Complexity of the Environment by a Group of Autonomous Mobile Robots // Journal of Robotics. – 2020. – No. 3. – P. 1-14 DOI: 10.1155/2020/6874291.
15. *Altshuler H., Wagner I.V., Bruckstein F.M.* With caution-decreasing a swarm robotics' efficiency by imprudently enhancing the robots' capabilities // IEEE Xplore Conference: Autonomous Robots and Agents. – 2009. – DOI: 10.1109/ICARA.2000.4804014.
16. *Elshamy W.* Adaptive Control in Swarm Robotics Computer Science. – 2021. – <https://www.semanticscholar.org/paper/Adaptive-Control-in-Swarm-Robotics-Elshamy/b112317012d4380a0311276936ddef7c8cddd16>.

17. Hayes A.T. How Many Robots? Group Size and Efficiency in Collective Search Tasks // Distributed Autonomous Robotic Systems. – 2002. – No. 5. – P. 289-298. – DOI: 10.1007/978-4-431-65941-9_29.
18. Мочалкин А.С., Воцук Д.С., Воцук Г.Ю., Майоров И.В. Разработка сетцентрической интеллектуальной системы адаптивного планирования действий группы автономных беспилотных аппаратов для согласованного выполнения поставленных задач // Управление и обработка информации в технических системах: Тез. докл. X Всероссийской науч.-практ. конф. Перспективные системы и задачи управления. – Ростов-на-Дону, 2015. – С. 166-172.
19. Майорова В.И., Банников А.М., Гришко Д.А., Жаринов И.С., Леонов В.В., А.Г. Топорков, Харлан А.А. Контроль состояния сельскохозяйственных полей на основе прогнозирования динамики индекса NDVI по данным космической мультиспектральной и гиперспектральной съёмки // Наука и образование. – 2013. – № 7. – С. 199-228.
20. Skobelev P. Multi-Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management // Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry / Eds.: P. Leitão, S. Karmouskos. – Elsevier, 2015. – P. 207-230.

REFERENCES

1. Kollektivny intellektual'nykh robotov. Sfery primeneniya [Teams of intelligent robots. Spheres of application], ed. by V.I. Syryamkina. Tomsk: STT, 2018, 140 p.
2. Abrosimov V., Mochalkin A. Collective behavior strategy development based on friendship of robots, *Proceedings of 4th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE), Valenciennes, France*, pp. 38-4. DOI: <https://doi.org/10.1145/3191477.3191479>.
3. Rzevski G., Skobelev P. Managing Complexity. Wit Pr/Computational Mechanics, 2014, 216 p.
4. Mayorov I.V. Mul'tiagentnye modeli i tekhnologii situatsionnogo upravleniya resursami predpriyatiy v usloviyakh neopredelennosti: dis. ... kand. tekhn. nauk [Multi-agent models and technologies of situational management of enterprise resources in conditions of uncertainty: cand. of eng. sc. diss.]: 05.13.01. Samara: FGBOU VO Samarskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet, 2017, 259 p.
5. Kolesnikov A.V. Metodika kolichestvennoy otsenki missii organizatsii [Methodology of quantitative assessment of the organization's mission], *Vestnik REU im. G.V. Plekhanova* [Bulletin of Plekhanov Russian University of Economics], 2017, No. 5 (95), pp. 119-125.
6. Korotkov E.M. Menedzhment: uchebnik dlya bakalavrov [Management: textbook for bachelors]. 3rd ed. Moscow: ID Yurayt, 2014, 684 p.
7. Sidorenkov A.V., Ul'yanova N.Yu. Upravlenie effektivnost'yu grupp i komand v organizatsii: ucheb. posobie [Managing the effectiveness of groups and teams in an organization: a textbook]. Rostov-on-Donu: Izd-vo YuFU, 2016, 328 p.
8. Karpov V.E. Kollektivnoe povedenie robotov. ZHelaemoe i deystvitel'noe [Collective behavior of robots. Wishful and valid], *Sovremennaya mekhatronika: Sb. nauchnykh trudov Vserossiyskoy nauchnoy shkoly (g. Orekhovo-Zuevo, 22-23 sentyabrya 2011)* [Modern mechatronics: Collection of scientific papers of the All-Russian Scientific School (Orekhovo-Zuevo, September 22-23, 2011)]. Orekhovo-Zuevo, 2011, pp. 35-51. Available at: <https://publications.hse.ru/chapters/51216080> (accessed 02 November 2022).
9. Pavlov A.S. Metodika planirovaniya traektorii dvizheniya gruppy mobil'nykh robotov v neizvestnoy zamknoy srede s prepyatstviyami [Methodology for planning the trajectory of a group of mobile robots in an unknown closed environment with obstacles], *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Control, communication and security systems], 2021, No. 3, pp. 38-59.
10. Melnik E., Safronenkova I., Kapustyan S. The Efficiency Improvement of Robots Group Operation by Means of Workload Relocation, *Proceedings of the International Conference on Interactive Collaborative Robotics*, 2021, pp. 126-137. DOI: 10.1007/978-3-030-87725-5.
11. Taeyong C., Jongwoo P., Jeong-Jung K., Young-Sik S., Hyunuk S. Work Efficiency Analysis of Multiple Heterogeneous Robots for Harvesting Crops in Smart Greenhouses, *Agronomy*, 2022, No. 12 (11):2844. DOI: 10.3390/agronomy12112844.
12. Bakirov A.K., Kiril'chenko A.A. Problemy upravleniya raspredelennymi mobil'nymi sistemami [Problems of management of distributed mobile systems]. Moscow, 2000, 23 p.
13. Essers M.S., Vaneker T.N.J. Developing Concepts for Improved Efficiency of Robot Work Preparation, *Proceedings CIRP*, 2013, Vol. 7, pp. 515-520. DOI: [10.1016/j.procir.2013.06.025](https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.025).
14. Beloglazov D., Pereverzev V., Soloviev V., Pshikhopov V., Morozov R. Method of Formation of Quantitative Indicators of Complexity of the Environment by a Group of Autonomous Mobile Robots, *Journal of Robotics*, 2020, No. 3, pp. 1-14 DOI: [10.1155/2020/6874291](https://doi.org/10.1155/2020/6874291).

15. *Alitshuler H., Wagner I.V., Bruckstein F.M.* With caution-decreasing a swarm robotics' efficiency by imprudently enhancing the robots' capabilities, *IEEE Xplore Conference: Autonomous Robots and Agents*, 2009. DOI: 10.1109/ICARA.2000.4804014.
16. *Elshamy W.* Adaptive Control in Swarm Robotics Computer Science, 2021. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Adaptive-Control-in-Swarm-Robotics-Elshamy/b112317012d4380a0311276936ddefd7c8cddd16>.
17. *Hayes A.T.* How Many Robots? Group Size and Efficiency in Collective Search Tasks, *Distributed Autonomous Robotic Systems*, 2002, No. 5, pp. 289-298. DOI: 10.1007/978-4-431-65941-9_29.
18. *Mochalkin A.S., Voshchuk D.S., Voshchuk G.Yu., Mayorov I.V.* Razrabotka setetsentricheskoy intellektual'noy sistemy adaptivnogo planirovaniya deystviy gruppy avtonomnykh bespilotnykh apparatov dlya soglasovannogo vypolneniya postavlennykh zadach [Development of a network-centric intelligent system for adaptive planning of actions of a group of autonomous unmanned vehicles for the coordinated performance of assigned tasks], *Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh: Tez. dokl. X Vserossiyskoy nauch.-prakt. konf. Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya* [Management and processing of information in technical systems: Abstracts of the X All-Russian Scientific and Practical Conference Perspective systems and management tasks.]. Rostov-on-Don, 2015, pp. 166-172.
19. *Mayorova V.I., Bannikov A.M., Grishko D.A., Zharinov I.S., Leonov V.V., A.G. Toporkov, Kharlan A.A.* Kontrol' sostoyaniya sel'skokhozyaystvennykh poley na osnove prognozirovaniya dinamiki indeksa NDVI po dannym kosmicheskoy mul'tispektral'noy i giperspektral'noy s"emki [Monitoring the state of agricultural fields based on forecasting the dynamics of the NDVI index according to the data of space multispectral and hyperspectral surveys], *Nauka i obrazovanie* [Science and Education], 2013, No. 7, pp. 199-228.
20. *Skobelev P.* Multi-Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management, *Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry*, Eds.: P. Leitão, S. Karnouskos. Elsevier, 2015, pp. 207-230.

Статью рекомендовал к опубликованию д.в.н., доцент А.А. Селиванов.

Абросимов Вячеслав Константинович – Главный научно-исследовательский испытательный межвидовой центр перспективного вооружения Министерства обороны РФ; e-mail avk787@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +7916 815 35 12; д.т.н.; с.н.с.; в.н.с.

Седов Александр Николаевич – НПК "Сетецентрические платформы"; e-mail: a-mochalkin@mail.ru; г. Самара, Россия; тел.: +79613848484; Генеральный директор.

Abrosimov Vyacheslav Konstantinovich – Chief Research and Testing Interspecific Armament Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation; e-mail avk787@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79168153512; dr. of eng. sc.; senior researcher; leading researcher.

Sedov Alexander Nikolaevich – NPK "Network-centric platforms"; e-mail a-mochalkin@mail.ru; Samara, Russia; phone: +79613848484; CEO.

УДК 621.337.11:004.942:519.876.5

DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-19-31

П.П. Чернусь, П.П. Чернусь, А.А. Яковлев, Р.В. Сахабудинов, А.С. Голосий

СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОДВОДНОГО ОБЪЕКТА

Представлены результаты разработки и синтеза гидравлической системы стабилизации подводного объекта. Для полноты и точности математического моделирования в гидравлической системе учтены силы сухого трения между поршнем и стенками гидроцилиндра, силы сухого трения между штоком и гидроцилиндром, которые в сумме определяют общую силу сухого трения в активном гидроцилиндре, общие силы сухого трения в пассивном гидроцилиндре, ускорения движения. Также учтены приведенная масса системы блоков и полиспаста, массы подвижных частей активного и пассивного гидроцилиндров. После расчета мас-