

Феоктистов Александр Геннадьевич – Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН; e-mail: agf65@yandex.ru; 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134; тел.: +79247116704; к.т.н.; доцент; в.н.с.

Костромин Роман Олегович – e-mail: romang70055@gmail.com; тел.: +79041150109; аспирант.

Сидоров Иван Александрович – e-mail: yvan.sidorov@gmail.com; тел.: +79027668364; к.т.н.; научный сотрудник.

Горский Сергей Алексеевич – e-mail: gorskysergey@mail.ru; тел.: +79149230010; к.т.н.

Feoktistov Aleksandr Gennadyevich – Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of SB RAS; e-mail: agf65@yandex.ru; 134, Lermontov street, Irkutsk, 664033, Russia; phone: +79247116704; cand. of eng. sc.; associate professor; leading researcher.

Kostromin Roman Olegovich – e-mail: romang70055@gmail.com; phone: +79041150109; post-graduate student.

Sidorov Ivan Aleksandrovich – e-mail: yvan.sidorov@gmail.com; phone: +79027668364; cand. of eng. sc.; research officer.

Gorsky Sergey Alexeevich – e-mail: gorskysergey@mail.ru; phone: +79149230010; cand. of eng. sc.

УДК 007.52

DOI 10.23683/2311-3103-2018-8-69-83

Л.А. Мартынова

**МЕТОД РАЗРЕШЕНИЯ КОНФЛИКТА В МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЕ
УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО
АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
ВЫЧИСЛЕНИЙ***

Целью исследования является повышение эффективности функционирования автономного обитаемого подводного аппарата (АНПА) за счет разрешения конфликта в его мультиагентной системе управления, связанного с энергопотреблением подсистемами АНПА. При переходе от исключительного использования аккумуляторной батареи к дополнительному использованию аккумуляторной батареи возникла необходимость разрешения противоречия между предоставлением энергоресурса разнородными источниками и его потребления. Сложность решения задачи заключалась в непредсказуемости использования различных скоростных режимов, оказывающих влияние на энергорасход АНПА. Предложенный метод разрешения конфликта основан на декомпозиции потребителей энергоресурса и прогнозировании возможности выполнения поставленной перед АНПА задачи, связанной с преодолением заданного расстояния в пределах заданного времени. Для этого в работе разработан метод, в основу которого положены алгоритмы: – прогнозирования достаточности энергоресурса для преодоления заданной дистанции; – определения допустимого текущего расхода энергоресурса и соответствующего ему скоростного режима; – оценки времени, необходимого для преодоления оставшейся дистанции. Перечисленные алгоритмы характеризуются набором параметров, которые были оптимизированы в зависимости от сложившихся условий в ходе выполнения аппаратом задания. В качестве критерия оптимальности использована вероятность преодоления заданной дистанции в пределах заданного времени. При оптимизации параметров учитывались: – текущий уровень заряда аккумуляторной батареи; – текущий уровень запаса электрохимического генератора; – время, в течение которого аппарат уже преодолел часть заданной дистанции. По этим данным последовательно определялись: – оставшаяся дистанция; – время, затраченное на преодоление оставшейся дистанции; – запас энергоресурса, израсходован-

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 17-08-00666.

ный на преодоление оставшейся дистанции. При движении в высокоскоростном режиме определялись: – оставшееся время потребления от аккумуляторной батареи; – расходующий за это время энергоресурс; – оставшийся после высокоскоростного режима энергоресурс аккумуляторной батареи. При движении аппарата в штатном режиме рассчитывались: – потребление энергоресурса от электрохимического генератора с учетом одновременного заряда аккумуляторной батареи; – время заряда аккумуляторной батареи; – время на преодоление оставшейся дистанции; – скорость, с которой необходимо двигаться, чтобы преодолеть оставшуюся дистанцию; – оценка достаточности энергоресурса на преодоление оставшейся дистанции; – удельный энергорасход, соответствующий необходимой скорости; – момент перехода в режим экономичного хода. По результатам работы предложенного алгоритма определялся текущий допустимый расход энергоресурса, которому соответствовали: – текущий источник (аккумуляторная батарея или электрохимический генератор); – текущий скоростной режим (штатный или высокоскоростной); – прогнозируемая вероятность преодоления заданной дистанции. Тестирование предложенного метода осуществлялось с использованием специально разработанной математической модели функционирования аппарата и его системы энергообеспечения с двумя разнородными источниками энергоресурса. Программная реализация математической модели позволила провести численные эксперименты с использованием предложенного метода в различных гидрологических условиях, результаты которых показали неоспоримое преимущество предложенного метода, существенно повышающего вероятность выполнения аппаратом поставленной перед ним задачи.

АНПА; система управления; система энергопотребления; мультиагентная система; конфликт; метод; алгоритм; имитационная модель.

L.A. Martynova

THE METHOD OF RESOLUTION OF THE CONFLICT IN THE MULTIAGENT CONTROL SYSTEM OF THE AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE WITH THE USE OF DISTRIBUTED CALCULATIONS

The purpose of the study is to increase the efficiency of the unattended underwater vehicle (AUV) functioning by resolving the conflict in its multi-agent control system, which is related to power consumption by the AUV subsystems. In the transition from exclusive use of the battery to additional use of the battery, arose the need to resolve the contradiction between the provision of energy resources by diverse sources and its consumption. The complexity of solving the problem consisted in the unpredictability of the use of various speed regimes that affect the AUV's energy consumption. The proposed method for resolving the conflict is based on the decomposition of energy resource consumers and forecasting the possibility of accomplishing the task assigned to the AUV related to overcoming a given distance within a given time. For this purpose, we developed a method based on the following algorithms of: forecasting the sufficiency of energy resources to overcome a given distance; determining the permissible current consumption of energy resources and the corresponding speed regime; estimating the time needed to overcome the remaining distance. The listed algorithms are characterized by a set of parameters that have been optimized depending on the prevailing conditions during the execution of the task by the device. As a criterion of optimality, the probability of overcoming a given distance within a given time is used. When optimizing the parameters the following items have been taken into account: current battery level; current level of the electrochemical generator's reserve; time during which the device has already overcome part of the specified distance. According to these data, the following have been determined successively: remaining distance; time taken to overcome the remaining distance; reserve of energy resource expended on overcoming the remaining distance. When driving in high-speed mode, we determined the following: remaining time of consumption from the battery; energy resource consumed during this time; battery energy reserve remaining after the high-speed mode. When the vehicle is moving in its normal mode, the following parameters are calculated: consumption of energy resources from the electrochemical generator taking into account the simultaneous charge of the battery; battery charge time; time to overcome the remaining distance; speed at which you need to move to overcome the remaining distance; estimation of suf-

efficiency of an energy resource on overcoming of the remained distance; specific power consumption corresponding to the required speed; moment of transition to the economy run mode. Based on the results of the proposed algorithm, the current allowable energy resource consumption is determined, which corresponds to: current source (battery or electrochemical generator); current speed mode (full-time or high-speed); predicted probability of overcoming a given distance. The proposed method is tested using a specially developed mathematical model for the functioning of the apparatus and its energy supply system with two heterogeneous energy sources. The software implementation of the mathematical model allows to carry out numerical experiments using the proposed method under various hydrological conditions, the results of which show the undeniable advantage of the proposed method, which significantly increases the probability of the apparatus performing the task assigned to it.

AUV; control system; energy consumption system; multi-agent system; conflict; method; algorithm; imitation model.

Введение. Одним из направлений применения развивающейся в настоящее время мультиагентной технологии [1–3] является построение системы управления (СУ) робототехнического комплекса (РТК) [4], в частности, автономного обитаемого подводного аппарата (АНПА) [5–7]. При реализации мультиагентного подхода в системе управления АНПА каждой его подсистеме ставится в соответствие агент, выраженный самостоятельной программой и функционирующий на отдельном вычислительном модуле. Функционирование каждой агент-программы основано на заложенных в нее алгоритмах и данных, которые в нее поступают от других агентов-программ. Совместное функционирование агентов-программ обеспечивается использованием распределенных вычислений [8].

Наряду с неоспоримыми преимуществами мультиагентной технологии при ее использовании возникает ряд задач, характерных исключительно для мультиагентного подхода. Одной из таких задач является задача разрешения конфликта между агентами системы в том случае, если происходит попытка использования несколькими агентами одного и того же ресурса. Наиболее острым источником конфликтных ситуаций является агент системы энергообеспечения (СЭО), поскольку вопрос энергоресурса является ключевым для АНПА: его запас изначально ограничен, но настолько, чтобы его оказалось достаточно для благополучного завершения поставленной перед АНПА задачи, именуемой миссией.

Однако на практике по различным причинам может возникнуть необходимость повышенного потребления энергии одной из подсистем, например, в условиях сильного течения, неисправности, утечки и т.д. В этом случае происходит перерасход электроэнергии отдельными системами, что из-за ограниченности ресурса приводит к снижению эффективности выполнения миссии. В связи с этим возникает задача такого разрешения конфликта путем перераспределения потребления энергоресурса между подсистемами-агентами, при котором не происходило бы снижение эффективности выполнения миссии.

Целью работы явилось решение задачи разрешения конфликта, связанного с энергопотреблением в мультиагентной СУ с учетом ограничений, присущих мультиагентным системам, на вычислительные ресурсы каждой подсистемы и ограничений на темп и объем передачи информации между ними.

Постановка задачи. Пусть на борту АНПА имеется полный ресурс Q , включающий в себя запас хранилища Q_X и запас АБ Q_{AB} .

Пусть количество подсистем-потребителей N .

В процессе выполнения миссии возможны высокоскоростные режимы, требующие повышенного потребления, обеспечиваемого исключительно возможностями АБ. После окончания высокоскоростного режима необходимо в обязательном порядке зарядить АБ на случай повторного ее использования для движения АНПА в высокоскоростном режиме. Количество высокоскоростных режимов и их

продолжительность заранее неизвестны. Также неизвестны условия, в которых предполагается выполнение миссии, прежде всего - наличие течения и его значения его параметров. Необходимо так вести расход энергоресурса в процессе выполнения миссии, чтобы его оказалось достаточно для прибытия в заданную в миссии конечную маршрутную точку, преодолев при этом заданную дистанцию D_3 .

В формализованном виде задача будет иметь следующий вид.

Необходимо определить q_i при условии, что

$$q_i \geq q_{i_0} \quad \forall i = 1, \dots, N,$$

где q_{i_0} – минимально необходимый энергоресурс для функционирования i -й подсистемы АНПА.

Распределение ресурса должны быть таким, чтобы выполнялись условия:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \Delta q_i \cdot t_i \leq Q_{ПОЛ} & \forall i = 1, \dots, N \\ \sum_{i=1}^N t_i \leq T_3 \end{cases}$$

Выбор Q ввиду неизвестности ряда факторов выбирается, исходя из максимизации функционала:

$$P = F(Q_x, Q_{AB}, D_3, N, V_{шт}, V_\phi, T_\phi, N_\phi) \rightarrow \max,$$

где P – вероятность выполнения миссии, заключающейся в преодолении заданной дистанции D_3 ;

$V_{шт}$ – скорость АНПА в штатном режиме, $V_{шт} = f(q, D)$;

V_ϕ – скорость на высокоскоростном участке;

T_{ϕ_j} – продолжительность j -го высокоскоростного участка, $j=1, \dots, N_\phi$;

N_ϕ – количество высокоскоростных участков.

Необходимо так распорядиться энергоресурсом, чтобы:

- ◆ его оказалось достаточно для прибытия в конечную точку;
- ◆ время выполнения миссии оказалось в пределах заданного.

Если предположить, что в каждый момент времени имеется возможность использования ресурса $Q(t)$, то

$$\sum_{i=1}^N q_i \leq Q(t) \quad \forall i = 1, \dots, N. \quad (1)$$

Объем энергопотребления q_i определяется так, чтобы в максимальной степени использовать отпущенный энергоресурс, что означает минимизацию функционала:

$$\sum_{i=1}^N q_i - Q(t) \rightarrow \min \quad \forall i = 1, \dots, N. \quad (2)$$

$Q(t)$ – это ресурс, который может быть использован АНПА в текущий момент времени t . Тогда общее условие распределения ресурса между подсистемами можно записать в виде неравенства как совокупность потребления каждой подсистемой АНПА.

При решении задачи оптимального потребления энергоресурса возникает многовариантность решений, поскольку количество неизвестных N превышает количество уравнений. Решение задачи простым перебором возможных вариантов приводит к существенным затратам времени, вычислительных ресурсов и оперативной памяти вычислительного модуля СЭО.

Использование традиционных итерационных методов решения задачи, например, градиентных, наискорейшего спуска и т.д., в данном случае потребовало бы постоянного обмена информацией между независимыми агентами-подсистемами, что привело бы к существенным временным задержкам при передаче информации и затратам вычислительных ресурсов.

Еще один возможный вариант решения задачи опирается на наличие у СЭО полной информации по всем потребителям во всех режимах их функционирования, однако и этот вариант также исключен в силу ограниченности информационных и вычислительных ресурсов самой СЭО.

Поэтому задача состояла в поиске такого подхода к решению задачи разрешения конфликта, связанного с энергопотреблением, при котором происходила бы минимизация обмена информацией между агентами и минимизация вычислений, при максимально полном использовании отпущенного в момент t энергоресурса.

Особенности функционирования мультиагентной системы управления СУ АНПА, как и любого другого робота, состоит из подсистем, основными из которых являются:

- ◆ подсистема навигации; ей соответствует агент «Локализация»;
- ◆ подсистема освещения окружающей обстановки; ей соответствует агент «Наблюдатель»;
- ◆ подсистема движительно-рулевая и механизмов; ей соответствует агент «Управление движением»;
- ◆ подсистема энергообеспечения; ей соответствует агент «Заряд батареи»;
- ◆ подсистема гидроакустической связи;
- ◆ подсистема радиосвязи;
- ◆ подсистема приведения к причальному устройству;
- ◆ система управления.

На рис. 1 приведена диаграмма обмена информацией между подсистемами.

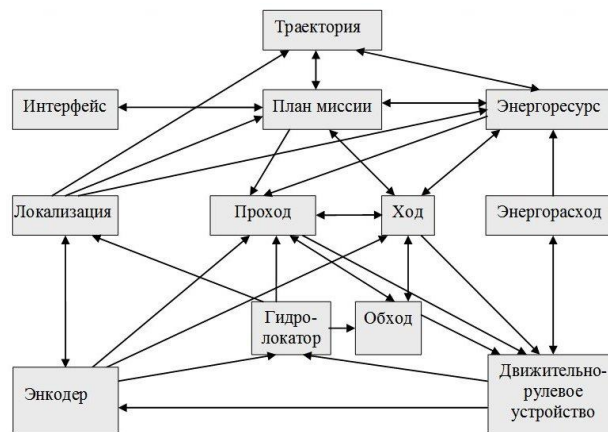


Рис. 1. Диаграмма обмена информацией между подсистемами

Функционирование агента СЭО опишем на примере двух сценариев – получения миссии на выполнение и собственно, в процессе выполнения миссии.

Сценарий 1. После передачи плана миссии в СУ АНПА агента СЭО производится оценка достаточности энергоресурса для выполнения миссии. При этом оценивается расстояние для прохождения миссии и скоростные режимы, исходя из времени на прохождение каждого участка. Затем производится расчет необходи-

мых ресурсов с учетом удельного расхода энергоресурса на единицу времени или на единицу расстояния. Агент СЭО производит анализ возможности выполнения миссии путем сравнения потребностей в энергоресурсе с возможностями АНПА по запасам энергоресурса. Если ресурса достаточно для выполнения миссии, принимается, что миссия может быть выполнена, в противном случае выдается сообщение о невозможности выполнения миссии агенту «План миссии», который, в свою очередь, передает его агенту «Интерфейс» для корректировки миссии.

Сценарий 2. В ходе движения АНПА в программе-агенте «Энергоресурс» постоянно происходит оценка достаточности оставшегося энергоресурса для выполнения миссии с учетом текущем расходе энергоресурса при текущем скоростном режиме. Агент «Энергоресурс» производит расчет оставшегося энергоресурса и сравнивает его с необходимым запасом для завершения выполнения миссии. Если остаток близок к критическому, то миссия прекращается, о чем последовательно передается сообщение агенту «План миссии», затем агенту «Интерфейс». Если же оставшегося ресурса достаточно для выполнения миссии, то агент «Ход» вырабатывает параметры движения для обеспечения выполнения АНПА миссии. Вырабатываемые параметры движения АНПА передаются агенту «Движительно-рулевое устройство». Датчики агента «Движительно-рулевое устройство» постоянно передают данные о формируемых в процессе движения параметрах агенту «Энкодер».

В приведенных сценариях принятие решения агентом СЭО о разрешении повышения потребления принимается на основе весовых коэффициентов, присвоенных каждому агенту и каждому потребителю. Значения коэффициентов меняются с течением времени, соответственно, меняются с течением времени и приоритеты. Общий подход к разрешению конфликтных ситуаций изложен в [9]

В настоящей работе пристальное внимание уделено принятию решения агентом СЭО, как наиболее ярким источником возникновения конфликта, и предложен метод разрешения конфликта, основанный на оптимизации использования разнородных источников питания с учетом результатов прогнозирования энергозатрат на весь период выполнения миссии.

В целях повышения дальности выполнения миссии и снижения массогабаритов предложено использование электрохимического генератора (ЭХГ) в дополнение к АБ, поскольку ЭХБ является наиболее экономичным, но для обеспечения движения АНПА на высоких скоростях его энергии недостаточно, и АНПА переходит на питание от АБ [10–11].

Возникновение и разрешение конфликта. Если текущего запаса АНПА достаточно при текущем удельном потреблении электроэнергии для преодоления оставшейся дистанции, то конфликтная ситуация не возникает. Конфликтная ситуация возникает тогда, когда несколько агентов запрашивают ресурс, и в процессе анализа, выполняемого агентом СЭО, выясняется, что его недостаточно, чтобы обеспечить все запросы потребителей, и при этом благополучно закончить миссию.

Для разрешения конфликта в алгоритме функционирования агента СЭО формируются весовые коэффициенты по каждому потребителю в зависимости от текущей ситуации, прием эти коэффициенты – динамически меняющиеся.

Так, например, могут быть установлены такие приоритеты:

- ◆ оторваться от преследования – пропорционален дистанции до преследователя – если далеко, то приоритет низкий, если близко – то наивысший 1,0;
- ◆ пересечь неблагоприятный район – в зависимости от размеров района, текущего положения в пересекаемом районе 0,5;
- ◆ максимально быстро сблизиться с интересующим объектом – 0,3.

Как уже было отмечено, при принятии решения относительно возможного повышения потребления электроэнергии учитывается текущий расход подсистемами.

Приоритетом при разрешении конфликтных ситуаций является достаточность энергоресурса для завершения миссии. Весовой коэффициент этого решения рассчитывается обратно пропорционально оставшемуся расстоянию: чем меньше запасов энергии на покрытие заданного расстояния, тем выше приоритет. Если энергии достаточно с большим запасом, то приоритет принимался низким, если же оставшегося запаса с трудом хватает на покрытие оставшегося расстояния, то приоритет принимался высоким. При расчете учитывались лишь текущий расход, оставшийся ресурс и оставшееся расстояние – без попытки оптимизации расхода с тем, чтобы гарантированно выполнить миссию.

Метод разрешения конфликта. Введем понятие весовой функции k_{A_i} каждой i -ой подсистемы. Тогда выражение для энергопотребления i -ой подсистемой имеет вид:

$$q_{A_i} = k_{A_i} \cdot Q(t). \quad (3)$$

Будем рассматривать каждую i -ю подсистему АНПА в виде совокупности аппаратно-программных средств (АПС) и характеризовать ее необходимым минимальным объемом энергоресурса для работы аппаратных средств, являющимися потребителями энергоресурса. Разделим условно потребителей в рамках i -ой подсистемы на дискретных и непрерывных. Под дискретными потребителями будем понимать такие аппаратные средства, для функционирования которых в обязательном порядке необходим минимальный энергоресурс q_{D_i} , и увеличение q_{D_i} никак не сказывается на результатах функционирования аппаратного средства. Под непрерывными будем понимать такие аппаратные средства, постепенное увеличение энергопотребления q_{H_i} которых приводит к улучшению характеристик функционирования данного аппаратного средства. Примером непрерывного потребителя может служить аппаратура излучения, у которой различные уровни излучаемой мощности оказывают влияние лишь на дальность распространения гидроакустического сигнала и не сказываются на работоспособности самой аппаратуры излучения.

Тогда потребление энергоресурса каждой подсистемой q_i можно представить в виде:

$$q_{A_i} = q_{D_i} + q_{H_i}. \quad (4)$$

Однако, наряду с дискретными потребителями, у непрерывных потребителей также имеется минимальный порог энергоресурса, обеспечивающий их функционирование. Поэтому для функционирования непрерывных потребителей энергоресурс q_{H_i} включает в себя две составляющие: минимально необходимый для функционирования энергоресурс q_{Hm_i} , и дополнительный q_{Hd_i} :

$$q_{H_i} = (q_{Hm_i} + k_{m_i} \cdot q_{Hd_i}), \quad (5)$$

где k_{m_i} – коэффициент пропорциональности допустимого объема энергоресурса и степени функционирования непрерывного потребителя, который для общности будем считать линейным.

Тогда (4) перепишем в виде:

$$q_{A_i} = q_{D_i} + (q_{H_{m_i}} + k_{m_i} \cdot q_{H_{\partial_i}}). \quad (6)$$

С учетом сказанного функционал (2) может быть выражен в виде:

$$\sum_{i=1}^N \left(\sum_{m=1}^{M_{D_i}} q_{D_m} + \sum_{m=1}^{M_{H_i}} (q_{H_m} + k_m \cdot q_{H_{\partial_i}}) \right) - Q(t) \rightarrow \min \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (7)$$

Предполагаем, что в общем случае каждая i -я подсистема АНПА имеет несколько состояний K_i , отличающихся минимально необходимым потреблением:

$$q_{A_i} = \{ q_{k_1}, \dots, q_{k_i} \} \quad \forall i = 1, \dots, N.$$

Тогда для разрешения конфликта в мультиагентной системе необходимо выполнить действия в следующей последовательности.

Последовательность действия при разрешении конфликта

1. Пусть в ходе выполнения миссии в определенные моменты времени t СЭО имеет информацию о допустимом текущем расходе $Q(t)$. Каждый i -ый агент постоянно определяет и сообщает агенту СЭО значения весовой функции соответствующей ему подсистемы АНПА, определяя ее по аналогии с подходом, описанным ранее в [9].

2. По формуле (3) определяется объем энергоресурса q_{A_i} , который может быть использован i -ой подсистемой АНПА.

3. Для каждой i -ой подсистемы оценивается режим, в котором она может работать, исходя из выполнения неравенства:

$$q_{k_i} \leq q_{A_i} \leq q_{k_{i+1}}, \quad (8)$$

где q_{k_i} , $q_{k_{i+1}}$ – варианты режимов потребления энергоресурса i -ой подсистемой. Результатом оценки является определение режима k_i и энергоресурса q_{k_i} .

4. Из полученного значения q_{k_i} исключается объем энергии для обеспечения дискретных потребителей i -ой подсистемы, в результате чего определяется объем ресурса q_{H_i} , который можно использовать непрерывными потребителями для необходимого минимального потребления:

$$q_{H_i} = q_{k_i} - \sum_{m=1}^{M_{D_i}} q_{D_m}. \quad (9)$$

6. Определяется объем ресурса, который можно использовать непрерывными потребителями для повышения своего потенциала от минимального уровня путем исключения из оставшегося энергоресурса минимального потребления непрерывными потребителями.

$$q_{H_{\partial_i}} = q_{H_i} - \sum_{m=1}^{M_{H_i}} q_{H_m}. \quad (10)$$

7. Характеризуем каждую i -ую подсистему N весовым коэффициентом k_{H_i} . Тогда энергоресурс q_{ij} каждого j -го аппаратного средства непрерывной подсистемы дополняется до допустимого уровня q_{H_i} в соответствии с весовыми коэффициентами:

$$q_{ij} = k_{H_j} \cdot q_{H\delta_i}.$$

8. Таким образом, ресурс, потребляемый в момент t i -ой подсистемой АНПА, определяется выражением

$$q_i(t) = \sum_{m=1}^{M_d} q_{D_m} + \sum_{m=1}^{M_{II}} (q_{H_m} + k_m \cdot q_{H\delta_i}). \quad (11)$$

Таким образом, с использованием выражений (3) - (11) будут получены значения $q_i(t)$ по каждой подсистеме АНПА, удовлетворяющие условию (2).

По полученным результатам в мультиагентной системе со стороны СЭО выдаются соответствующие команды на использование энергоресурса.

Для проверки работоспособности предложенного метода распределения энергоресурса между потребителями, исключающими возникновение конфликта между ними, была разработана математическая модель с реализацией предложенного метода, которая, в свою очередь, была программно реализована и использована для проведения численных экспериментов.

Последовательность вычислений при оценке энергоресурса

Анализ текущего состояния ЭХГ и АБ

Расчет оставшейся дистанции ΔD на момент времени t :

$$\Delta D(t) = D_3 - D(t). \quad (12)$$

Расчет оставшегося времени на преодоление оставшейся дистанции ΔD :

$$\Delta T = T_3 - T_{MIS}. \quad (13)$$

Расчет удельного потребления от ЭХГ

$$q_{АНПА}(t) = k_X \cdot q_X. \quad (14)$$

Расчет удельного потребления от АБ

$$q_{АНПА}(t) = k_{AB} \cdot q_{AB}. \quad (15)$$

Расчет скорости движения в форсаж-режиме

$$V_{АНПА}(t) = k_{\Phi} \cdot q_{АНПА}(t). \quad (16)$$

Прогнозирование преодоления заданной дистанции в пределах заданного периода времени

Определение времени ΔT , необходимого для преодоления дистанции ΔD со скоростью $V_{АНПА}$:

$$\Delta T = \Delta D / V_{АНПА}(t). \quad (17)$$

Определение необходимого запаса энергоресурса для преодоления дистанции ΔD :

$$Q_{АНПА} = q_{АНПА} \Delta T + q_{AB3} \cdot T_{AB3}. \quad (18)$$

Определение времени, необходимого для преодоления оставшейся дистанции ΔD с текущим потреблением $q_{АНПА}(t)$:

$$\begin{aligned} \Delta Q(t) &= Q_{АНПА} + Q_3 \\ \Delta T &= Q_{АНПА} / q_{АНПА}(t) + Q_3 / q_{AB3}. \end{aligned} \quad (19)$$

Расчет допустимого расхода $q_{АНПА}$ с тем, чтобы покрыть заданную дистанцию D_3 при удельном расходе $q_{АНПА}(t)$

$$q_{АНПА} = \Delta Q(t) / \Delta T. \quad (20)$$

Определение времени потребления от АБ с учетом текущего заряда ЛИАБ и удельного расхода энергии:

$$\begin{aligned} q_{АБ} &= D_{АБ} / V_{АБ}. \\ \Delta T_{АБ} &= \Delta Q_{АБ}(t) / q_{АБ}. \end{aligned} \quad (21)$$

Расчет времени потребления от ЭХГ

Определение времени потребления от ЭХГ с учетом оставшихся ресурсов ЭХГ и удельного расхода энергии:

$$\begin{aligned} q_X &= D_{ШГ} / V_{ШГ}. \\ \Delta T_X &= \Delta Q_X(t) / q_{ШГ}. \end{aligned} \quad (22)$$

Расчет допустимой скорости с тем, чтобы выполнить задание за заданный промежуток времени T_3 :

$$V_{АНПА}(t) = \Delta D / T_3. \quad (23)$$

Расчет момента перехода в режим экономичного хода

Для того, чтобы время преодоления заданной дистанции было минимальным, то есть чтобы

$$t_{ШГ} + t_{\phi} + t_{ЭХ} \rightarrow \min. \quad (24)$$

Необходимо чтобы выполнялся функционал, отражающий покрытие заданной дистанции за минимальное время:

$$V_{ШГ} \cdot t_{ШГ} + V_{\phi} \cdot t_{\phi} + V_{ЭХ} \cdot t_{ЭХ} - D_3 \rightarrow \min. \quad (25)$$

при выполнении ограничений в виде условий:

$$\begin{aligned} V_{ШГ} \cdot t_{ШГ} + V_{\phi} \cdot t_{\phi} + V_{ЭХ} \cdot t_{ЭХ} &> D_3. \\ t_{ШГ} + t_{\phi} + t_{ЭХ} &< T_3. \end{aligned}$$

Введем обозначение:

$$q_{\Sigma} \cdot \Delta t_{\Sigma} = q_{ШГ} \cdot \Delta t_{ШГ} + q_{\phi} \cdot \Delta t_{\phi}. \quad (26)$$

Тогда (23) перепишем в виде:

$$q_{\Sigma} \cdot \Delta t_{\Sigma} + q_{ЭХ} \cdot \Delta t_{ЭХ} = \Delta Q. \quad (27)$$

Если ограничение наложено на время, то есть:

$$\Delta t_{\Sigma} + \Delta t_{ЭХ} \leq T_3. \quad (28)$$

то из (13) получаем выражение для расчета периода времени:

$$\Delta t_{ЭХ} = \frac{\Delta Q - q_{\Sigma} \cdot T_3}{q_{ЭХ} - q_{\Sigma}}, \text{ и тогда время перехода в режим экономичного хода}$$

определяется выражением:

$$t_{ЭХ} \leq T_3 - \Delta t_{ЭХ}. \quad (29)$$

Если ограничение указано по дистанции D_3 , которую необходимо преодолеть, то введем обозначение:

$$V_{\Sigma} \cdot \Delta t_{\Sigma} = V_{ШГ} \cdot \Delta t_{ШГ} + V_{\phi} \cdot \Delta t_{\phi}. \quad (30)$$

Уравнение преодоления заданной дистанции D_3 имеет вид:

$$V_{\Sigma} \Delta t_{\Sigma} + V_{ЭХ} \Delta t_{ЭХ} = D_3. \quad (31)$$

Тогда выражая из (18) Δt_{Σ} и подставляя его в (17), получаем выражение для расчета периода времени:

$$\Delta t_{\text{ЭХ}} = \frac{\Delta Q - D_3 \frac{q_{\Sigma}}{V_{\Sigma}}}{q_{\text{ЭХ}} - V_{\text{ЭХ}} \frac{q_{\Sigma}}{V_{\Sigma}}}, \quad (32)$$

время $t_{\text{ЭХ}}$ определяется по выражению (29).

Описание математической модели

При имитационном моделировании основное внимание было уделено моделированию процессов функционирования системы управления АНПА, построенной на мультиагентной основе.

При моделировании функционирования мультиагентной СУ АНПА в рамках каждого агента – подсистемы СУ АНПА был сформирован алгоритм выполнения основных, характерных для данного агента функций. Подробное описание мультиагентной системы управления АНПА выполнено автором ранее и приведено в [12–13]. Поскольку агенты мультиагентной системы управления представляют собой самостоятельные программы, общающиеся между собой посредством передачи информации, то в системе моделирования были реализованы распределенные вычисления. При этом были решены задачи, характерные для реализации распределенных вычислений – задача синхронизации и логических часов [14–24].

Результаты моделирования. Результаты проведенных численных экспериментов с использованием разработанной математической модели, в основу которой положены подходы, связанные с реализацией распределенных вычислений, функционирования мультиагентной СУ АНПА и АНПА в целом и предложенного метода распределения энергоресурса между подсистемами АНПА, в частности, позволили провести сравнительный анализ различных алгоритмов функционирования СЭО в различных условиях.

В качестве показателя эффективности в работе использована вероятность успешного выполнения миссии, заключающаяся в преодолении заданной дистанции в заданное время с вероятностью не ниже заданной.

В процессе численного моделирования рассматривались алгоритмы оценки текущего расхода с учетом прогнозирования достаточности энергоресурса для благополучного завершения миссии в различных условиях течения – как попутного, так и встречного направлений.

Результаты исследований приведены на рис. 2.

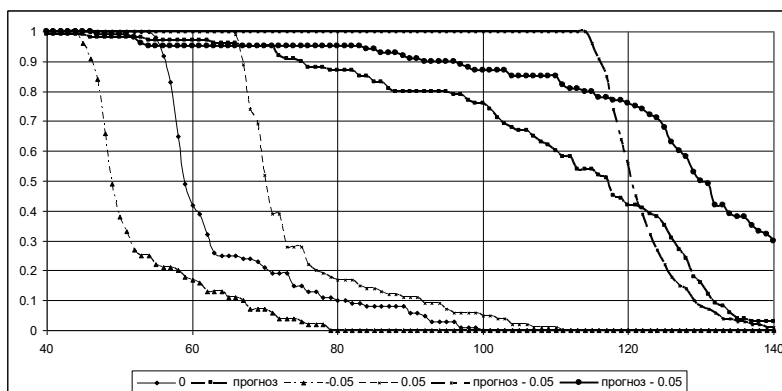


Рис. 2. Результаты численного эксперимента

На рис. 2 представлены две серии кривых: первая серия, расположенная слева, соответствует исходному варианту расхода ресурса без его оптимального распределения, серия кривых справа – с использованием оптимального распределения. Центральная кривая каждой серии соответствует отсутствию течения, крайняя левая кривая - встречному течению, кривая справа - попутному течению.

Заключение. Предложенный алгоритм принятия решения относительно достаточности энергоресурса с учетом прогнозирования момента переключения режимов привел к повышению эффективности функционирования АНПА.

Разработанная математическая модель функционирования мультиагентной системы управления АНПА и ее программной реализации позволили провести исследования функционирования СЭО АНПА и разрешения конфликтных ситуаций.

Разработанный метод разрешения конфликта позволил при принятых исходных данных, допущениях и ограничениях повысить вероятность выполнения миссии в среднем на 0,2.

Полученные результаты создают все предпосылки для реализации предложенного алгоритма в проектируемой мультиагентной системе управления конкретного разрабатываемого образца АНПА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Машошин А. И., Скобелев П. О.* Применение мультиагентных технологий к управлению группой автономных необитаемых подводных аппаратов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 1. – С. 45-59.
2. *Ржевский Г.А., Скобелев П.О.* Как управлять сложными системами? Мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления предприятиями. – Самара: Офорт, 2015. – 290 с.
3. *Городецкий В.И., Грушинский М.С., Хабалов А.В.* Многоагентные системы (обзор) // Новости искусственного интеллекта. – 1998. – № 2. – С. 64-116.
4. *Innocenti B.* A multi-agent architecture with distributed coordination for an autonomous robot. Ph.D. dissertation – Universitat de Girona, 2009. – 147 p.
5. *Мартынова Л.А., Гриненков А.В., Пронин А.О., Куликовских Ю.В.* Исследование функционирования мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата с помощью имитационного моделирования // Научные исследования в космических исследованиях Земли. – 2017. – Т. 9, № 5. – С. 52-65.
6. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / под ред. Агеева М.Д. – М.: Наука, 2005. – 306 с.
7. *Мартынова Л.А., Машошин А.И.* Построение системы управления автономных необитаемых подводных аппаратов на базе мультиагентной технологии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 2 (175). – С. 38-48.
8. *Мартынова Л.А.* Организация распределенных вычислений в имитационной системе моделирования работы автономного необитаемого подводного аппарата. Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 2 (187). – С. 100-112.
9. *Мартынова Л.А.* Метод координации функционирования агентов в мультиагентной системе управления АНПА // International Conference on Naval Architecture and Ocean Engineering. – СПб: СПбГМТУ, 2016. – С. 470-480.
10. *Костенко В.В., Михайлов Д.Н.* Определение параметров энергосилового установок автономного необитаемого подводного аппарата по заданной дальности хода. // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 3 (140). – С. 70-73.
11. *Герасимов В.А., Филоженко А.Ю., Чепурин П.И.* Структура системы электроснабжения автономного необитаемого подводного аппарата // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 3 (140). – С. 47-55.
12. *Мартынова Л.А., Конюхов Г.В., Рухлов Н.Н., Пронин А.О.* Имитационная система функционирования группы автономных необитаемых подводных аппаратов на мультиагентной основе // Материалы Международной конференции по морской робототехнике в освоении океана «Морская робототехника 2017», 9-11 октября 2017, Санкт-Петербург, Россия.

13. Мартынова Л.А., Гриненков А.В., Пронин А.О., Куликовских Ю.В. Имитационное моделирование функционирования мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Труды восьмой Всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2017). – СПб.: Изд-во ВВМ, 2017. – С. 474-479.
14. Chandy K. M., Lamport L. Distributed snapshots: determining global states of distributed systems // ACM Transactions on Computer Systems. – 1985. – No. 3 (1). – P. 63-75.
15. Chandy K.M., Misra J. The Drinking Philosophers Problem ACM TOPLAS, 6:4. October 1984. – P. 632-646.
16. Charron-Bost B. Concerning the size of logical clocks in distributed systems // Information Processing Letters. – 1991. – No. 39. – P. 11-16.
17. Charron-Bost B., Tel G., Mattem F. Synchronous, asynchronous, and causally ordered communication // Distributed Computing. – 1996. – No. 9 (4). – P. 173-191.
18. Fidge C. Logical time in distributed computing systems // IEEE Computer. – August 1991. – P. 28-33.
19. Fowler J., Zwaenepoel W. Causal distributed breakpoints // Proceeding: of the 10th International Conference on Distributed Computing System. – 1990. – P. 134-141.
20. Mattern F. Virtual time and global states of distributed systems // Proceedings of die Parallel and Distributed Algorithms Conference (Cosnard, Quinton, Raynal, Robert Eds.). North-Holland. 1988. – P. 215-226.
21. Raymond K. Tree-based algorithm for distributed mutual exclusion // ACM Transactions on Computer Systems. – 1989. – No. 7. – P. 61-77.
22. Raynal M. A simple taxonomy of distributed mutual exclusion algorithms // Operating Systems Review. – 1991. – No. 25 (2). – P. 47-50.
23. Ricart G., Agrawala A.K. An optimal algorithm for mutual exclusion in computer networks // Communications of die ACM. –1981. – No. 24 (1). – P. 9-17.
24. Косяков М.С. Введение в распределенные вычисления. – СПб.: НИУ ИТМО, 2014. – 155 с.

REFERENCES

1. Mashoshin A.I., Skobelev P.O. Primenenie mul'tiagentnykh tekhnologiy k upravleniyu gruppoy avtonomnykh neobitayemykh podvodnykh apparatov [Application of multi-agent technologies to the management of a group of autonomous uninhabited submarines], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki* [Izvestiya SFedU. engineering sciences], 2016, No. 1. pp. 45-59.
2. Rzhhevskiy G.A., Skobelev P.O. Kak upravlyat' slozhnymi sistemami? Multiagentnye tekhnologii dlya sozdaniya intellektual'nykh sistem upravleniya predpriyatiyami [How to manage complex systems? Multi-agent technologies for the creation of intelligent enterprise management systems] Samara: Ofort [Etching], 2015, 290 p.
3. Gorodetskiy V.I., Grushinskiy M.S., Khabalov A.V. Mnogoagentnye sistemy (obzor). [Multiagent systems (review)], *Novosti iskusstvennogo intellekta* [News of Artificial Intelligence], 1998, No.2, p.64-116.
4. Innocenti B. A multi-agent architecture with distributed coordination for an autonomous robot. Ph.D. dissertation – Universitat de Girona, 2009, pp.147.
5. Martynova L.A., Grinenkov A.V., Pronin A.O., Kulikovskikh Yu.V. Issledovaniye funktsionirovaniya multiagentnoy sistemy upravleniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata s pomoshch'yu imitatsionnogo modelirovaniya.[Investigation of the functioning of a multi-agent control system of an autonomous uninhabited underwater vehicle using simulation simulation], *Naukoyemkiye tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli* [High technology in space exploration of the Earth], 2017, Vol. 9, No. 5, pp. 52-65.
6. Avtonomnyye podvodnyye roboty. Sistemy i tekhnologii. [Autonomous underwater robots. Systems and technologies], ed. by Ageyeva M.D. Moscow: Nauka, 2005, 306 p.
7. Martynova L.A., Mashoshin A.I. Postroeniye sistemy upravleniya avtonomnykh neobitayemykh podvodnykh apparatov na baze mul'tiagentnoy tekhnologii [Construction of a control system for autonomous uninhabited underwater vehicles based on multi-agent technology], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki* [Izvestiya SFedU. engineering sciences], 2016, No. 2 (175), pp. 38-48.

8. *Martynova L.A.*. Organizatsiya raspredelennykh vychisleniy v imitatsionnoy sisteme modelirovaniya raboty avtonomnogo neobitayemogo podvodnogo apparata [The organization of distributed computing in the simulation system of modeling the operation of an autonomous uninhabited underwater vehicle], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, [Izvestiya SFedU. engineering sciences], 2017, No. 2 (187), pp. 100-112.
9. *Martynova L.A.*. Metod koordinatsii funktsionirovaniya agentov v mul'tiagentnoy sisteme upravleniya ANPA [The method of coordinating the functioning of agents in the ANPA multi-agent control system], *International Conference on Naval Architecture and Ocean Engineering*. Saint Petersburg: SPbGMTU, 2016, pp. 470-480.
10. *Kostenko V.V., Mikhaylov D.N.*. Opredeleniye parametrov energosilovoy ustanovki avtonomnogo neobitayemogo podvodnogo apparata po zadannoy dalnosti khoda [Determination of the parameters of the power-plant of an autonomous uninhabited underwater vehicle for a given range of travel], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki* [Izvestiya sfedu. engineering sciences], 2013, No. 3 (140), pp. 70-73.
11. *Gerasimov V.A., Filozhenko A.Yu., Chepurin P.I.* Struktura sistemy elektrosnabzheniya avtonomnogo neobitayemogo podvodnogo apparata. [The structure of the power supply system of an autonomous uninhabited underwater vehicle], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki* [Izvestiya sfedu. engineering sciences], 2013, No. 3 (140), pp. 47-55.
12. *Martynova L. A., Konyukhov G.V., Rukhlov N.N., Pronin A.O.* Imitatsionnaya sistema funktsionirovaniya gruppy avtonomnykh neobitayemykh podvodnykh apparatov na mul'tiagentnoy osnove [Simulation system of functioning of a group of autonomous unmanned underwater vehicles on a multi-agent basis], *Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii po morskoy robototekhnike v osvoyenii okeana «Morskaya robototekhnika 2017* [Materials of the International Conference on Marine Robotics in Ocean Development "Marine Robotics 2017], Sankt-Peterburg. Russia.
13. *Martynova L.A., Grinenkov A.V., Pronin A.O., Kulikovskikh Yu.V.* Imitatsionnoye modelirovaniye funktsionirovaniya mul'tiagentnoy sistemy upravleniya avtonomnogo neobitayemogo podvodnogo apparata [Simulation modeling of functioning of a multi-agent control system of an autonomous uninhabited underwater vehicle], *Trudy Vos'moy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Imitatsionnoye modelirovaniye. Teoriya i praktika» (IMMOD-2017)* [Proceedings of the eighth All-Russian scientific-practical conference "Imitation modeling. Theory and practice "(IMMOD-2017)]. St. Petersburg: Izd-vo VVM, 2017, pp.474-479.
14. *Chandy K.M., Lamport L.* Distributed snapshots: determining global states of distributed systems, *ACM Transactions on Computer Systems*, 1985, No. 3 (1), pp. 63-75.
15. *Chandy K.M., Misra J.* The Drinking Philosophers Problem *ACM TOPLAS*, 6:4, October 1984, pp. 632-646.
16. *Charron-Bost B.* Concerning the size of logical clocks in distributed systems, *Information Processing Letters*, 1991, No. 39, pp. 11-16.
17. *Charron-Bost B., Tel G., Mattem F.* Synchronous, asynchronous, and causally ordered communication, *Distributed Computing*, 1996, No. 9 (4); pp. 173-191.
18. *Fidge C.* Logical time in distributed computing systems, *IEEE Computer*, August 1991, pp. 28-33.
19. *Fowler J., Zwaenepoel W.* Causal distributed breakpoints, *Proceeding: of the 10th International Conference on Distributed Computing System*, 1990, pp. 134-141.
20. *Mattern F.* Virtual time and global states of distributed systems, *Proceedings of die Parallel and Distributed Algorithms Conference (Cosnard, Quinton, Raynal, Robert Eds.)*. North-Holland, 1988, pp. 215-226.
21. *Raymond K.* Tree-based algorithm for distributed mutual exclusion, *ACM Transactions on Computer Systems*, 1989, No. 7, pp. 61-77.
22. *Raynal M.* A simple taxonomy of distributed mutual exclusion algorithms, *Operating Systems Review*, 1991, No. 25 (2), pp. 47-50.
23. *Ricart G., Agrawala A.K.* An optimal algorithm for mutual exclusion in computer networks, *Communications of die ACM*, 1981, No. 24 (1), pp. 9-17.
24. *Kosyakov M. S.* Vvedeniye v raspredelennyye vychisleniya [Introduction to distributed computing]. Saint Petersburg: NIU ITMO, 2014, 155 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Г.С. Малышкин.

Мартынова Любовь Александровна – Акционерное общество «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: martynowa999@bk.ru; 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30; тел.: 89219411395; д.т.н.; с.н.с.; в.н.с.

Martynova Liubov Alexandrovna – Concern CSRI Elektropribor, JSC; e-mail: martynowa999@bk.ru; 30, Malaya Posadskaya street, Saint Petersburg 197046, Russia; phone: 89219411395; dr. of eng. sc.; leading researcher.

УДК 004.75; 519.687.1

DOI 10.23683/2311-3103-2018-8-83-94

А.Б. Клименко, И.Б. Сафроненкова

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ В СРЕДАХ ТУМАННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА БАЗЕ ОНТОЛОГИЙ*

Концепция туманных вычислений относительно нова, но внедряется практически повсеместно. Это связано с интенсивным ростом объемов обрабатываемых данных, поскольку используемые прежде классические, «облачные» архитектуры становятся недостаточными в условиях Интернета Вещей. Задача распределения вычислительной нагрузки в гетерогенной вычислительной среде не нова и решалась неоднократно. Однако, известные модели задачи, как правило, не учитывают особенностей сред туманных вычислений, таких, как: – неравноправность вычислительных узлов; – обязательное участие облачного слоя в решении вычислительных задач. Данная статья акцентирует внимание на формальной постановке задачи распределения вычислительной нагрузки с учетом особенностей среды туманных вычислений в случае применения стратегии «разгрузки» устройств. В этом случае предполагается перераспределение части графа задач на некоем подмножестве вычислительных устройств туманного слоя. К постановке задачи распределения вычислительной нагрузки в гетерогенной среде добавляется ограничение, свойственное среде туманных вычислений. Задача является многокритериальной, с многими ограничениями, определяемыми спецификой проектируемой системы, и потому относится к классу сложных, что ставит вопрос о получении качественных решений в ограниченные временные сроки. В данной статье предлагается подход на базе уменьшения пространства поиска для сформулированной задачи оптимизации путем усечения множества кандидатов вычислительных устройств. Для этого используется онтологический подход: разработана структура онтологии, позволяющей классифицировать перераспределяемый подграф относительно имеющихся ресурсов. На основе разработанной онтологии сформированы правила, применяемые к выбору узлов-кандидатов для размещения подграфа задач, что в итоге позволяет значительно сократить пространство поиска решений.

Распределение вычислительной нагрузки; туманные вычисления; распределенные вычисления; Интернет Вещей; онтология; задача оптимизации.

A.B. Klimenko, I.B. Safronenkova

ONTOLOGY BASED WORKLOAD ALLOCATION PROBLEM SOLVING IN FOG COMPUTING ENVIRONMENT

Fog computing concept is quite new but applied almost everywhere. This is due to the fact of intensive processed data capacity growth, so the cloud computing architectures, which were used successfully before, become insufficient in the conditions of Internet of Things (IoT). A workload allocation problem in heterogeneous computing environment is not new and has been solved many times. However, the known problem models neglect some special aspects of fog computing such as: inequality of computation nodes; mandatory participation of cloud layer in the computing

* Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 17-08-01605 и в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН на 2018г., № гр. проекта 01201354238.