

20. *Orlowska-Kowalska T., Szabat K.* Damping of torsional vibrations in two-mass system using adaptive sliding neuro-fuzzy approach, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2008, Vol. 4, No. 1, pp. 47-57.
21. *Eremenko Yu.I., Glushchenko A.I., Petrov V.A.* О нейросетевой адаптации параметров PI-регулятора контура тока системы управления прокатной клетью в реальном времени [About neural adaptation of the parameters of the PI-controller of current loop of a control system of a rolling mill in real time], *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* [Control systems and information technology], 2016, No. 3 (65), pp. 62-68.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор М.Е. Семенов.

**Еременко Юрий Иванович** – Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) ФГАОУ ВО НИТУ "МИСиС"; e-mail: erem49@mail.ru; 309516 Белгородская обл., г. Старый Оскол, м-н Макаренко, 42; тел.: +74725451210; кафедра автоматизированных и информационных систем управления; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

**Глушенко Антон Игоревич** – e-mail: strondutt@mail.ru; тел.: +74725451217; кафедра автоматизированных и информационных систем управления; к.т.н.; доцент.

**Петров Владислав Анатольевич** – e-mail: 79040882508@yandex.ru; тел.: +74725451217; кафедра автоматизированных и информационных систем управления; аспирант.

**Eremenko Yuri Ivanovich** – Sary Oskol technological institute n.a. A.A. Ugarov (branch) NUST "MISIS"; e-mail: erem49@mail.ru; 309516, Belgorod region, Sary Oskol, Makarenko microdistrict, 42; phone: +74725451210; the department of automated and information control system; head department; dr. of eng. sc.; professor.

**Glushchenko Anton Igorevich** – e-mail: strondutt@mail.ru; phone: +74725451217; the department of automated and information control system; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Petrov Vladislav Anatol'evich** – e-mail: 79040882508@yandex.ru; phone: +74725451217; the department of automated and information control system; postgraduate student.

УДК 004.75+004.052.3

DOI 10.23683/2311-3103-2017-9-53-64

**Э.В. Мельник, А.Б. Клименко, Д.Я. Иванов, В.А. Гандурин**

**МУЛЬТИАГЕНТНЫЙ МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ  
РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ СЕТЕВЫХ  
ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ С КЛАСТЕРИЗАЦИЕЙ  
НА ОСНОВЕ РЕПЛИКАЦИИ ДАННЫХ\***

*В настоящее время информационно-управляющие системы (ИУС) являются неотъемлемым компонентом любой сложной мехатронной системы, включая нефте- и газодобывающую промышленность, автономные и мобильные робототехнические системы, авиацию, энергетику и многое другое. Поскольку объекты, находящиеся под управлением ИУС в случае возникновения отказов могут представлять угрозы как для населения, так и для экологической обстановки, к таким системам предъявляются повышенные требования к надежности. Надежность является комплексным и многоаспектным понятием, и может быть оценена количественно, в то время как отказоустойчивость является средством обеспечения надежности и опирается на существование в системе избыточности. Сетецентрические информационно-управляющие системы с децентрализованным управлением являются перспективными в аспектах интегрируемости, масштабируемости и отказоустойчивости, в то время как резервирование производительности вычислительных узлов и применение принципов выравнивания нагрузки позволяют повысить значения веро-*

\* Работа выполнена в рамках проектов ЮНЦ РАН № 0256-2014-0008, 0256-2015-0080 (в рамках задания 007-01114-16 PR).

ятности безотказной работы системы. Возможность реконфигурации также является важной характеристикой таких систем. Формирование конфигураций СИУС является одной из ключевых задач при проектировании и разработки системы. Задача формирования конфигураций является многокритериальной со многими в общем случае равноправными ограничениями, но качество получаемых результатов имеет смысл оценивать прежде всего с точки зрения выравнивания нагрузки. В данной статье предложена новая модель задачи формирования конфигураций для сетевой информационно-управляющей системы, которая отличается от предложенной ранее наличием параметров, учитывающих сформированные кластеры вычисляющих узлов. Вопрос о необходимости новой формулировке обоснован тем, что, как правило, кластеры не объединены полносвязной коммуникационной средой, и в случае реконфигурации приоритет должен быть у решений, размещающих задачи управления в рамках одного кластера, если это возможно. Также сформулированная задача решена с использованием ранее предложенного метода повышения качества конфигураций путем уменьшения количества критериев оптимизации. Применение этого метода к решению сформулированной задачи позволило улучшить качество решений с точки зрения выравнивания нагрузки, при этом оставляя прочие критерии равноправными.

*Сетецентрическое управление; сетецентрический подход; информационно-управляющая система; отказоустойчивость; надежность; децентрализованное диспетчирование; формирование конфигураций; повышение качества конфигураций; многокритериальная оптимизация.*

**E.V. Melnik, A.B. Klimenko, D.Ya. Ivanov, V.A. Gandurin**

#### **MULTIAGENT APPROACH TO THE RECONFIGURABLE NET-CENTRIC INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS WITH CLUSTERIZATION RELIABILITY ENHANCEMENT BASED ON DATA REPLICATION**

*Contemporary information and control systems (ICSs) are an integral component of the wide range of complex mechatronic systems, including oil- and gas production, autonomous and mobile robotic systems, spacecraft, aircraft, energy production plants, etc. As such objects are the potential threats for the environment and people in case of failures, the high-level dependability is required. Dependability is a complex and multiaspect term. It can be measured and evaluated quantitatively, while fault-tolerance is a means to provide dependability and bases on the system redundancy. Network-centric ICSs with decentralized dispatching are quite promising from the integration, scalability and fault-tolerance, while the performance redundancy of the computational units and load-balancing allow to improve the reliability values. The reconfiguration potential is the important feature of the ICSs considered. Configuration forming problem is one of the key issues of the system design and development. This problem is multicriteria and multiconstraint. All constraints are mandatory in general, but the result should be evaluated from the load-balancing point of view. Current paper focuses on the configuration generation problem. The new problem model is presented here. It takes into account the system clustering and involves appropriate parameters. The clustering must be taken into consideration due to the lack of fully-interconnected network between them. So, in case of reconfiguration monitoring and control tasks must be assigned to the computational units in borders of current cluster, if it is possible. The configuration generation problem formulated is solved with the "criterion delegating approach", presented in previous work. The evolving of this approach allows improving the solutions quality from the load-balancing point of view.*

*Network-centric control; network-centric approach; information and control system; fault-tolerance; dependability; decentralized monitoring and control; configuration forming; multicriteria optimization.*

**Введение.** Современные сетевые информационно-управляющие системы (СИУС) являются неотъемлемыми составляющими компонентами многочисленных мехатронных комплексов, включая объекты космической и авиационной промышленности, энергетики, автономные робототехнические комплексы, объекты нефте- и газо-добывающей промышленности [1–3]. В подавляющем боль-

шинстве случаев функционирование подобных объектов является критичным к возникновению отказов, поскольку возникший отказ неизменно влечет серьезные последствия как в стоимостном аспекте, так и с точки зрения безопасности населения. В связи с этим к таким системам предъявляют повышенные требования к надежности [4].

Надежность (dependability) [5, 6] является комплексной и многоаспектной характеристикой системы. В соответствии с ГОСТ 27.002-89 надежность – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Очевидно, что надежность системы зависит от надежностных показателей составляющих компонентов. В соответствии с результатами проводимых исследований, ИУС мехатронного объекта обладает следующими важными характеристиками [7, 8]:

- ◆ отказ ИУС мехатронного объекта является критическим, после чего объект перестает функционировать;
- ◆ анализ статистики позволил сделать выводы о том, что успех миссии мехатронного объекта зависит от надежности ИУС до 50 %.

Вопросы повышения надежностных характеристик СИУС с резервированием производительности подробно рассмотрены в работах [9, 10]. В том числе, перспективным видится использование метода получения конфигураций системы с уменьшением количества критериев оптимизации, что представлено в работе [11] и будет более подробно описано в последующих разделах данной статьи.

Концепция построения СИУС с кластеризацией подробно описана в работах [1–3].

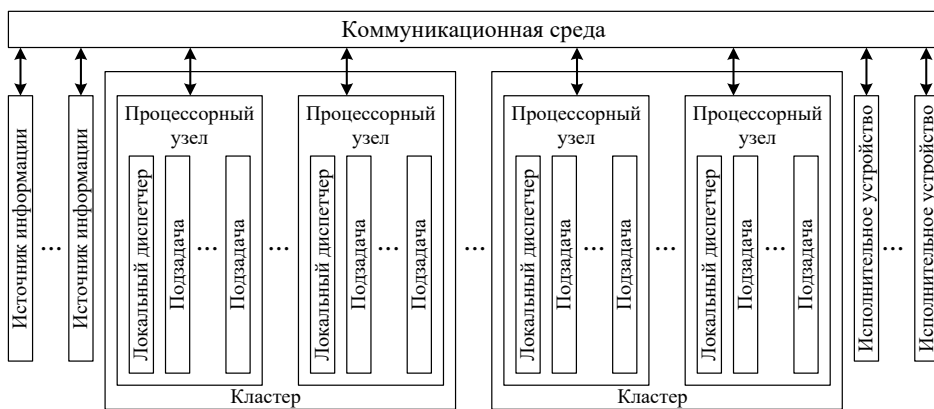


Рис. 1. Концепция построения СИУС

Работоспособность таких СИУС сохраняется как при изменении аппаратной структуры системы, так и при изменении решаемой задачи управления. Предложенные методы организации рассматриваемых СИУС позволяют удовлетворить предъявляемые к ним высокие требования по надежности за счет обеспечения выравнивания нагрузки и отказа от центрального диспетчирующего устройства, вместо которого применяется распределенное диспетчирование с помощью множества программных локальных диспетчеров (ЛД), каждый из которых запущен на отдельном процессорном узле (ПУ) СИУС. При этом диспетчирование СИУС осуществляется коллективом ЛД с использованием мультиагентного подхода.

В следующих разделах будут представлены:

- ◆ описание модели задачи получения конфигураций с учетом ограничений, налагаемых кластеризацией;
- ◆ описание метода повышения надежности СИУС посредством уменьшения числа критериев оптимизации и обобщенные описания алгоритмов работы СИУС;
- ◆ результаты экспериментального моделирования.

Заключение содержит выводы по проведенному исследованию, а также потенциальные направления дальнейших исследований.

### 1. Модель задачи получения конфигураций для СИУС с кластеризацией.

Описание модели задачи формирования конфигураций для СИУС с кластеризацией аналогично модели, представленной в работах [11–13], за исключением изменения некоторых параметров, связанных с наличием разбиения системы на кластеры. Представленная в данной статье модифицированная модель задачи получения конфигураций с учетом кластеризации СИУС отличается от ранее представленных моделей тем, что параметрически описывает принадлежность ВУ к тому или иному кластеру, а также включает в качестве параметров таблицы расстояний до кластеров, поскольку допускается отсутствие полносвязной КС между ними.

Пусть имеется  $N$  ЗУ с вычислительной сложностью  $g_i$ , описываемой информационным графом  $G$ , где вершины взвешены вычислительной сложностью задачи, ребра взвешены объемами передаваемых между ЗУ данных  $w_{xy}$ . Также будем считать, что если задачи, связанные информационно, решаются на одном ВУ без передачи данных в КС, время передачи данных равно 0, а в случае, когда происхо-

дит передача данных через КС, время передачи данных будет равно  $\frac{w_{xz}}{v}$ , где

$v$  – скорость передачи данных по сети. Для отражения факта передачи данных по сети введем функцию:

$$f(x, z) = \begin{cases} 0, & \text{если нет передачи данных по КС} \\ 1, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (1)$$

где  $x, z$  – номера задач, между которыми осуществляется передача данных.

Также имеется  $M$  ВУ с одинаковой производительностью  $m_j$ ,  $U = \{u_{ij}\}$  – множество значений долей производительности  $j$ -го ВУ, выделенной для  $i$ -й ЗУ,  $T$  – планируемое время завершения множества ЗУ,  $F = \{f_k\}$ ,  $k \in \{1, \dots, M\}$ , – множество одновременно отказавших ВУ. Будем полагать, что заранее известным считается множество кластеров проектируемой СИУС  $C$ , и при этом каждому кластеру может быть присвоен уникальный идентификатор  $c_l$ , являющийся произвольным числом.

Далее для каждого кластера из множества  $C$  производится составление таблиц расстояний до остальных кластеров системы. Под расстояниями в контексте данной работы можно понимать, например, количество транзитных участков сети, что связано с возможным географическим распределением кластеров. Пусть таблица расстояний имеет вид:  $D_l = \{c_b, c_z, S\}$ ,  $S$  – расстояние от кластера  $l$  до кластера  $z$ .

Таким образом, каждое ВУ будет описываться следующим кортежем:

$$\langle j, m_j, l, D_l \rangle, \text{ и } M = \{ \langle j, m_j, l, D_l \rangle \}.$$

Распределение ЗУ по ВУ описывается кортежем:

$a_i = \langle j, u_{ij}, t_i \rangle$ , где  $j$  – номер ВУ,  $u_{ij}$  – выделенный на задачу ресурс (доля от производительности ВУ),  $t_i$  – время начала решения  $i$ -й ЗУ.

Множество  $A=\{a_i\}$  определяет конфигурацию ИУС перед отказами, множество  $A'=\{a'_i\}$ , соответственно, после отказов и реконфигурации. Фактически,  $A'$  является решением задачи формирования конфигурации, и  $a'_i$  – кортежи, описывающие новые назначения ЗУ  $i$ .

Как и в работе [11], в качестве критериев оптимизации выбираются следующие.

Во-первых, в процессе реконфигурации не должно происходить перемещения ЗУ с работающих ВУ, или, по крайней мере, число таких должно быть минимальным из всех возможных. Это условие связано непосредственно с необходимостью обработки и перемещения на другой ВУ контекстных данных задачи, что крайне нежелательно из-за добавления операций в процедуру реконфигурации и увеличения нагрузки на коммуникационную среду.

Целевая функция, формализующая изложенное требование, будет приведена далее.

Для этого определим операцию вычитания для множеств  $A$  и  $A'$  таким образом, что:

$$a_i - a'_i = \begin{cases} 0, & \text{если } j \text{ равно } j'; \\ 1, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2)$$

Отметим, что равенство  $j$  и  $j'$  означает, что номер ВУ, на котором выполняется ЗУ, не изменился после реконфигурации.

Тогда первый компонент целевой функции будет иметь следующий вид:

$$F_1 = \sum_{i=1}^N (a_i - a'_i) \rightarrow MIN. \quad (3)$$

В идеальном случае должны быть перемещены только те ЗУ, которые до реконфигурации исполнялись на отказавшем ВУ.

Следующий критерий оптимизации является числом снятых с выполнения ЗУ. На практике часть ЗУ относятся к подмножеству задач, выполнение которых критично для функционирования системы, часть же реализует некоторые функции, которые опциональны. По этой причине в процессе реконфигурации с целью получения лучших решений может быть избрана стратегия снятия с выполнения некритических задач. С другой стороны, в аспекте оценивания отказоустойчивости системы имеет смысл сохранять наибольшее число некритических задач из возможных. Таким образом, целевая функция, отражающая снятие с выполнения некритических задач, примет вид:

$$F_2 = |A| - |A'| \rightarrow MIN. \quad (4)$$

Достижение минимума для формализованной таким образом целевой функции будет означать, что все некритические ЗУ сохранены и продолжат выполняться после реконфигурации.

В качестве третьего критерия было выбрано выравнивание нагрузки по ВУ. Критерий этот важен по причине экспоненциальной зависимости значений функции безотказной работы отдельно взятого ВУ от его температуры, которая, в свою очередь, зависит от нагрузки [14].

$$F_3 = \sum_{k=1}^K u'_{kj} - \sum_{l=1}^L u'_{lq} \rightarrow MIN, \quad \forall j, q, \quad (5)$$

где  $K$  число ЗУ назначенных на ВУ  $j$ ,  $L$  – число ЗУ, назначенных на ВУ  $q$ .

Помимо перечисленных критериев оптимизации необходимо сформулировать еще и критерий, связанный с кластеризацией системы. Поскольку ЗУ представлены информационным графом, при реконфигурации ЗУ, обменивающиеся

данными, должны размещаться либо в пределах одного кластера, либо, если это невозможно, на ВУ наиболее «близких» кластеров. На этом же принципе в настоящее время базируются набирающие популярность «туманные» вычисления, поскольку размещение обработки данных на расстояниях близких к источникам этих данных улучшает показатели латентности системы и снижает нагрузку на КС. Таким образом, будем полагать, что при реконфигурации задачи, связанные передачей данных, должны быть размещены на минимально близком расстоянии от ВУ, продолжающих выполнение ЗУ. Предполагая, что в пределах одного кластера КС является полносвязной, поиск нового расположения ЗУ должно в первую очередь производиться в пределах одного кластера с последующим переходом на ближайшие.

Определим функционал  $dist(l_1, l_2)$  как определяющий расстояние между кластерами с идентификаторами  $l_1$  и  $l_2$  соответственно на основе таблиц расстояний  $D_1$  или  $D_2$ , поскольку любой из этих таблиц достаточно для определения расстояния между кластерами. Тогда при реконфигурации должно соблюдаться следующее:

$$F_4 = \max_{j,k} (dist(l_j, l_k)) \rightarrow \min, \forall j, k, \quad (6)$$

где  $l_j$  – идентификатор кластера, где была размещена ЗУ до реконфигурации,  $l_k$  – идентификатор кластера размещения ЗУ после реконфигурации.

Основным ограничением в модели задачи формирования конфигураций является время завершения решения комплекса задач  $T$ :

$$t'_i + \frac{g_i}{u'_{ij} \cdot m_j} + f(i, k) \frac{w_{ik}}{v} \leq T, \forall i, j. \quad (7)$$

Кроме того, множество ВУ после реконфигурации не является эквивалентным множеству ВУ до реконфигурации, учитывая отказавшие ВУ:

$$M' = M - F, \quad (8)$$

где  $M'$ ,  $M$  и  $F$  – множества ВУ.

И, наконец, в качестве граничных условий были установлены следующие: все переменные положительны,  $0 < u_{ij} < 1$ ,  $0 < u'_{ij} < 1$ ,  $\forall i, j$ . Исходя из изложенного в данном разделе, векторное представление целевой функции будет включать выражения (3–6), с ограничениями (7, 8) и указанными граничными условиями.

Таким образом, сформулированная задача является многокритериальной с ограничениями, что делает нетривиальной процедуру поиска оптимальных решений.

2. Мультиагентный метод повышения надежности СИУС посредством уменьшения числа критериев оптимизации. Класс СИУС, рассматриваемый в данной статье, подробно описан в работах [15–18].

Особенностями таких СИУС являются:

- ◆ децентрализованное диспетчирование;
- ◆ резерв производительности;
- ◆ опционально кластерная организация вычислительной среды.

Децентрализованное диспетчирование традиционно реализуется на основе концепции многоагентных систем. Каждый ВУ представлен программным агентом, на которого возлагается ряд функций мониторинга и управления [11]. Такая организация диспетчирования СИУС улучшает многие ее характеристики, и в том числе, отказоустойчивость.

С другой стороны, резерв производительности с выравниванием нагрузки позволяет существенно повысить значения вероятности безотказной работы (ВБР) системы, о чем сказано в [10–12].

Реконфигурация рассматриваемого класса СИУС базируется на переносе выполнения задач с отказавшего узла на узлы функционирующие, при этом на этапе проектирования СИУС разрабатываются наборы конфигураций в соответствии с критериями (), изложенными в предыдущем подразделе.

Предлагаемый в рамках данной статьи метод повышения надежности СИУС основан на допущении о том, что при уменьшении количества критериев оптимизации качество решения с оптимизацией оставшихся критериев может быть улучшено. В данном случае критерий минимизации переноса задач с функционирующих узлов может быть удален при условии обеспечения репликации контекстных данных программными средствами.

При этом на агентов-представителей ВУ будет возложен дополнительный функционал, описанный ниже.

#### **Режим инициализации ИУС**

1. Агент организует просмотр списка конфигураций на предмет поиска тех ВУ, где могут быть перезапущены задачи его собственного ВУ в случае отказа других узлов. Формируется список в виде «номер задачи-идентификатор ВУ».
2. Если список не пуст, то производится рассылка сообщений агентам соответствующих ВУ о намерениях репликации данных.
3. Производится прием ответов, подтверждающих готовность агентов принимать реплики контекстных данных задач.
4. Если было принято сообщение о намерении производить репликацию от другого агента, отправляется подтверждение и выделяется объем памяти под хранение данных.

#### **Штатный режим**

1. Периодическая отправка контекстных данных задач по соответствующим ВУ.
2. Прием контекстных данных от других агентов.

#### **Режим реконфигурации**

1. Приведение ВУ в состояние, соответствующее новой принятой конфигурации.
2. Просмотр хранимых актуальных контекстных данных на предмет необходимости предоставления их перезапущенным задачам.
3. Предоставление данных запущенным задачам.

Конфигурации в этих условиях рассчитываются с оптимизацией уменьшенного числа критериев (3)–(5) вместо (3)–(6).

**3. Результаты экспериментального моделирования.** Экспериментальное моделирование проводилось для количества ВУ=6, вычислительная сложность ЗУ в интервале [10;40] условных единиц измерения вычислительной сложности. Количество ЗУ – 50. Задача получения конфигурации решена в двух вариантах: с наличием всех выбранных критериев оптимизации и с их уменьшенным числом (в случае организации групп репликации данных). Решение производилось при помощи алгоритмов имитации отжига, позволяющих дать результаты допустимого качества за приемлемое время [19, 20]. Качество получаемых решений оценено с точки зрения пиковых нагрузок ВУ, поскольку, в случае сглаживания пиков для одного и того же набора задач будет получено более равномерное распределение нагрузки и, следовательно, улучшенные показатели надежности системы.

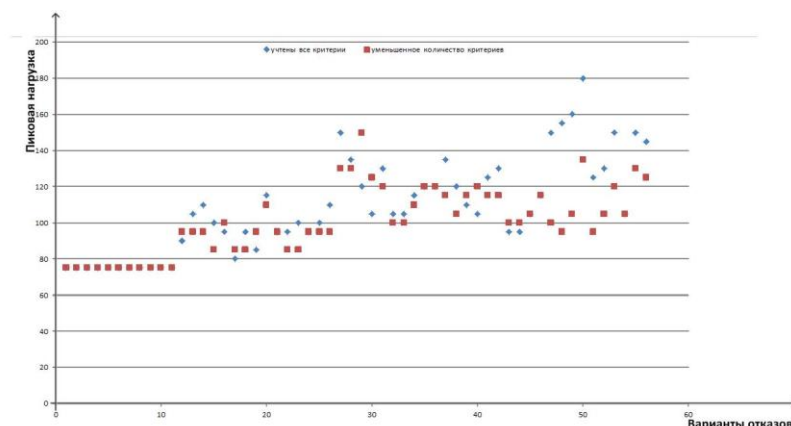


Рис. 2. Результаты моделирования для двух вариантов решения задачи формирования конфигураций: с учетом всех критериев оптимизации и с их уменьшенным количеством

На графике рис. 2 видно, что при отмене критерия количества перемещаемых задач с работающих ВУ происходит улучшение качества решений с точки зрения выравнивания нагрузки, что, в свою очередь оказывает непосредственное влияние на интенсивность отказов ВУ и на надежность системы в целом. Также на представленном графике видно, что решения для первых 10 вариантов отказов, соответствующие единичным отказам ВУ, совпадают, в то время как при увеличении количества одновременно отказавших узлов и, соответственно, необходимости в большем количестве перемещаемых задач, уменьшение критериев оптимизации начинает играть существенную роль.

**Заключение.** В данной статье предложена новая модель задачи формирования конфигураций для СИУС с резервом производительности, децентрализованным управлением и кластеризацией. Предлагаемая модель отличается от описанных ранее тем, что включает параметры описания кластеров ВУ, что играет существенную роль при реконфигурации в случаях, когда коммутационная среда, связывающая кластеры, не является полносвязной.

Также для СИУС с кластеризацией предложено использование метода улучшения качества конфигураций путем уменьшения критериев оптимизации путем введения дополнительных функций программных компонентов.

Результаты проведенного моделирования подтверждают целесообразность применения данного метода для улучшения качества решений с точки зрения выравнивания нагрузки, что и показано на графике рис.2.

В дальнейшем изложенные в статье исследования планируется продолжить в области оценивания дополнительной нагрузки на КС, возникающей при введении в систему предлагаемой репликации данных.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Заборовский В.С. и др. Сетецентрический подход к созданию системы удаленного управления робототехническими объектами с борта орбитальной станции // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2013. – Вып. 186, № 6. – С. 17-26.
2. Ефремов А.Ю., Максимов Д.Ю. Сетецентрическая система управления – что вкладывается в это понятие // 3-я Российская конференция с международным участием «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» (УКИ-12). – 2012. – С. 158-161.



3. Фархадов М.П., Душкин Д.Н. Сетецентрические технологии: эволюция, текущее положение и области дальнейших исследований // Автоматизация и современные технологии. – 2012. – № 1. – С. 21-29.
4. Каляев И.А., Мельник Э.В. Децентрализованные системы компьютерного управления. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2011. – 196 с.
5. Laprie J.C. Dependable computing and fault tolerance: concepts and terminology. In Digest of FTCS-15. June 1985. – P. 2-11.
6. Zhang Y., Jiang J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems // Annual Reviews in Control. – 2008. – No. 32 (2). – P. 229-252.
7. Cerstani D., Godary-Dejean K. Fault-tolerance in control architectures for mobile robots: fantasy or reality? // In proc. Of 7th national conference on Control Architectures of Robots, 2012, Nancy, France.
8. Carlson J., Murph R. How UGVs physically fail in the field // IEEE Transactions on Robotics. – June 2005. – Vol. 21, No. 3. – P. 423-437.
9. Мельник Э.В., Горелова Г.В. Имитационное моделирование вариантов резервирования в распределенных информационно-управляющих системах с децентрализованной организацией // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 3 (140). – С. 184-193.
10. Мельник Э.В., Горелова Г.В. Исследование эффекта выравнивания вычислительной нагрузки процессорных устройств в высоконадежных распределенных информационно-управляющих системах // Перспективные системы и задачи управления: Материалы 7-й Всерос. науч.-практ. конф. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – С. 316-325.
11. Melnik E., Klimenko A., Korobkin V. Reconfigurable Distributed Information and Control System Multiagent Management Approach. In: Abraham A., Kovalev S., Tarassov V., Snasel V., Vasileva M., Sukhanov A. (eds) // Proceedings of the Second International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ITI’17). ITI 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing. – Vol. 680. Springer, Cham., 2018.
12. Melnik E.V., Klimenko A.B. Informational and Control System Configuration Generation Problem with Load-Balancing Optimization // Proc. 10th Int. Conf. Appl. Inf. Commun. Technol. – 2016. – P. 492-496.
13. Melnik E., Korobkin V., Klimenko A. System Reconfiguration Using Multiagent Cooperative Principles // Proc. of the First International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ITI’16). 2016. Vol. 451 (Series “Advances in Intelligent Systems and Computing”). – P. 385-394.
14. Строгонов А. Долговечность интегральных схем и производственные методы ее прогнозирования // ChipNews. – 2002. – № 6. – С. 44-49.
15. Мельник Э.В., Клименко А.Б., Иванов Д.Я., Гандурин В.А. Методы обеспечения бесперебойной работы сетецентрических информационно-вычислительных систем с кластеризацией // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 12 (185). – С. 71-84.
16. Melnik E.V., Klimenko A.B. Informational and Control System Configuration Generation Problem with Load-Balancing Optimization // Proc. 10th Int. Conf. Appl. Inf. Commun. Technol. 2016. – P. 492-496.
17. Melnik E.V., Klimenko A.B., Korovin I.S. A Novel Approach to Fault Tolerant Information and Control System Design // Proc. 5-th Int. Conf. Informatics, Electron. Vis. Dhaka, Bangladesh: University of Dhaka, 2016.
18. Korovin I., Melnik E., Klimenko A. A recovery method for the robotic decentralized control system with performance redundancy // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – 2016. – 9812. – P. 9-17.
19. Melnik E., Klimenko A., Klimenko V. The parallel simulated annealing-based reconfiguration algorithm for the real time distributed control fault-tolerance providing // Proc. of the Application of information and communication technologies. – 2015. – P. 277-280.
20. Клименко А.Б., Клименко В.В., Таранов А.Ю. Методы распараллеливания имитации отжига при децентрализованном решении задачи составления расписания с определением минимального количества ресурсов // Естественные и математические науки в современном мире. – 2014. – № 22. – С. 11-18.

## REFERENCES

1. Zaborovskiy V.S. i dr. Setetsentricheskii podkhod k sozdaniyu sistemy udalennogo upravleniya robototekhnicheskimi ob'ektami s borta orbital'noy stantsii [Network-centric approach to creation of system of remote control of robotic objects aboard the space station], *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie* [Nauchno-tekhnicheskie Vedomosti SPbGPU. Informatics. Telecommunications. Management], 2013, Issue 186, No. 6, pp. 17-26.
2. Efremov A.Yu., Maksimov D.Yu. Setetsentricheskaya sistema upravleniya – chto vkladyvaetsya v eto ponyatie [Network-centric control system – what is embedded in this concept], *3-ya Rossiyskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem «Tekhnicheskie i programnye sredstva sistem upravleniya, kontrolya i izmereniya» (UKI-12)* [3rd all-Russian conference with international participation "Technical and software control systems, control and measurement" (IES-12)], 2012, pp. 158-161.
3. Farkhadov M.P., Dushkin D.N. Setetsentricheskie tekhnologii: evolyutsiya, tekushchee polozhenie i oblasti dal'neyshikh issledovaniy [Network-centric technology: evolution, current situation and areas for future research], *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii* [Automation and modern technology], 2012, No. 1, pp. 21-29.
4. Kalyaev I.A., Mel'nik E.V. Detsentralizovannye sistemy komp'yuternogo upravleniya [Decentralized computer control]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuNTs RAN, 2011, 196 p.
5. Laprie J.C. Dependable computing and fault tolerance: concepts and terminology. In *Digest of FTCS-15*. June 1985, pp. 2-11.
6. Zhang Y., Jiang J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems, *Annual Reviews in Control*, 2008, No. 32 (2), pp. 229-252.
7. Cerstani D., Godary-Dejean K. Fault-tolerance in control architectures for mobile robots: fantasy or reality?, *In proc. Of 7th national conference on Control Architectures of Robots, 2012, Nancy, France*.
8. Carlson J., Murph R. How UGVs physically fail in the field, *IEEE Transactions on Robotics*, June 2005, Vol. 21, No. 3, pp. 423-437.
9. Mel'nik E.V., Gorelova G.V. Imitatsionnoe modelirovanie variantov rezervirovaniya v raspredelennykh informatsionno-upravlyayushchikh sistemakh s detsentralizovannoy organizatsiyey [Simulation of redundancy options in distributed information and control systems with a decentralized organization], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 3 (140), pp. 184-193.
10. Mel'nik E.V., Gorelova G.V. Issledovanie effekta vyravnivaniya vychislitel'noy nagruzki protsessornykh ustroystv v vysokonadezhnykh raspredelennykh informatsionno-upravlyayushchikh sistemakh [A study of the alignment effect of the processing load of the processor devices into highly distributed information and control systems], *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya: Materialy 7-y Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Advanced systems and control problems: proceedings of the 7th all-Russian scientific-practical conference]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2012, pp. 316-325.
11. Melnik E., Klimenko A., Korobkin V. Reconfigurable Distributed Information and Control System Multiagent Management Approach. In: Abraham A., Kovalev S., Tarassov V., Snasel V., Vasileva M., Sukhanov A. (eds), *Proceedings of the Second International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'17)*. IITI 2017. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol 680. Springer, Cham., 2018.
12. Melnik E.V., Klimenko A.B. Informational and Control System Configuration Generation Problem with Load-Balancing Optimization, *Proc. 10th Int. Conf. Appl. Inf. Commun. Technol.*, 2016, pp. 492-496.
13. Melnik E., Korobkin V., Klimenko A. System Reconfiguration Using Multiagent Cooperative Principles, *Proc. of the First International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'16)*. 2016. Vol. 451 (Series "Advances in Intelligent Systems and Computing"), pp. 385-394.
14. Stroganov A. Dolgovechnost' integral'nykh skhem i proizvodstvennye metody ee prognozirovaniya [The durability of integrated circuits and manufacturing methods for its prediction], *ChipNews*, 2002, No. 6, pp. 44-49.

15. Mel'nik E.V., Klimenko A.B., Ivanov D.Ya., Gandurin V.A. Metody obespecheniya bespereboynoy raboty setetsentricheskikh informatsionno-vychislitel'nykh sistem s klasterizatsiyey [Methods of ensuring smooth running of network-centric computing systems with clustering], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 12 (185), pp. 71-84.
16. Melnik E.V., Klimenko A.B. Informational and Control System Configuration Generation Problem with Load-Balancing Optimization, *Proc. 10th Int. Conf. Appl. Inf. Commun. Technol.*, 2016, pp. 492-496.
17. Melnik E.V., Klimenko A.B., Korovin I.S. A Novel Approach to Fault Tolerant Information and Control System Design, *Proc. 5-th Int. Conf. Informatics, Electron. Vis. Dhaka, Bangladesh: University of Dhaka, 2016*.
18. Korovin I., Melnik E., Klimenko A. A recovery method for the robotic decentralized control system with performance redundancy, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2016, 9812, pp. 9-17.
19. Melnik E., Klimenko A., Klimenko V. The parallel simulated annealing-based reconfiguration algorithm for the real time distributed control fault-tolerance providing, *Proc. of the Application of information and communication technologies*, 2015, pp. 277-280.
20. Klimenko A.B., Klimenko V.V., Taranov A.Yu. Metody rasparallelivaniya imitatsii otzhiga pri detsentralizovannom reshenii zadachi sostavleniya raspisaniya s opredeleniem minimal'nogo kolichestva resursov [Methods of parallelization of simulated annealing at a decentralized solution to the problem of scheduling with minimum number of resources], *Estestvennye i matematicheskie nauki v sovremennom mire* [Natural and mathematical sciences in the modern world], 2014, No. 22, p. 11-18.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н., профессор Г.В. Горелова.

**Мельник Эдуард Всеволодович** – Южный научный центр Российской академии наук; e-mail: evm17@mail.ru; 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41; зав. отделом; д.т.н.

**Клименко Анна Борисовна** – НИИ Многопроцессорных вычислительных систем ЮФУ; e-mail: anna\_klimenko@mail.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; н.с.; к.т.н.

**Иванов Донат Яковлевич** – e-mail: donat.ivanov@gmail.com; с.н.с.; к.т.н.

**Гандурин Виктор Александрович** – АО «Заслон»; e-mail: v.a.gandurin@onegroup.ru; 196084, Санкт-Петербург, ул. Коли Томчака, 9; тел.: +78123279099 (доб.4012); руководитель отделения – заместитель генерального конструктора; д.т.н.

**Melnik Eduard Vsevolodovich** – Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences; e-mail: evm17@mail.ru; 41, Chexov avenue, Rostov-on-Doon, 344006, Russia; head of department; dr. of eng. sc.

**Klimenko Anna Borisovna** – SFedU Acad. Kalyaev Scientific Research Institute of Multiprocessor Computer Systems; e-mail: anna\_klimenko@mail.ru; 2, Chexov street, Taganrog, 347928, Russia; research assistant; cand. of eng. sc.

**Ivanov Donat Yakovlevich** – e-mail: donat.ivanov@gmail.com; leader research assistant; cand. of eng. sc.

**Gandurin Victor Alexandrovich** – JSC «ZASLON»; e-mail: v.a.gandurin@onegroup.ru; 9, Koli Tomchaka street, Saint-Petersburg, 196084, Russia; phone: +78123279099 (4012); dr. of eng. sc.; head of department – branch chief designer.