

**Зарифьян Александр Александрович** – ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный университет путей сообщения»; e-mail: zarifian\_aa@mail.ru; 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2; тел.: 88632726466; кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство»; д.т.н.; профессор.

**Колпахчян Павел Григорьевич** – e-mail: kolpahchyan@mail.ru; кафедра «Локомотивы и локомотивное хозяйство»; д.т.н.; доцент.

**Пшихопов Вячеслав Хасанович** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: pshichop@rambler.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371694; кафедра электротехники и мехатроники; зав. кафедрой; д.т.н.

**Медведев Михаил Юрьевич** – e-mail: medvmihal@gmail.com; кафедра электротехники и мехатроники; д.т.н.; профессор.

**Zarifian Alexandr Alexandrovich** – FSBEI HPE «Rostov state University of communications»; e-mail: zarifian\_aa@mail.ru; 2, area Rostov Infantry Regiment of Militi, Rostov-on-Don, 344038, Russia; phone: +78632726466; the department of locomotives and locomotive economy; dr. of eng. sc.; professor.

**Kolpahchyan Pavel Grigor'evich** – e-mail: kolpahchyan@mail.ru; the department of locomotives and locomotive economy; dr. of eng. sc.; associate professor.

**Pshikhopov Vyacheslav Khasanovich** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: pshichop@rambler.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371694; the department of electrical engineering and mechatronics; head the department; dr. of eng. sc.

**Medvedev Mikhail Yur'evich** – e-mail: medvmihal@gmail.com; the department of electrical engineering and mechatronics; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 681.513.2; 519.244.2

**Г.В. Горелова, Э.В. Мельник**

### **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАНТОВ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМАХ С ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ОРГАНИЗАЦИЕЙ\***

*Рассмотрена возможность повышения надежности распределенных информационно-управляющих систем (РИУС) с децентрализованной организацией за счет скользящего резервирования. В качестве скользящего резерва выступает резерв производительности процессорных устройств (ПУ) в отличие от традиционного способа скользящего резервирования только ПУ. Предложены варианты такого резервирования. Для оценки результативности этих вариантов проведено имитационное моделирование РИУС по разработанным моделям и алгоритмам. С целью сокращения числа опытов вычислительного эксперимента использовались методы планирования эксперимента. Выявлены конфигурации РИУС, в которых эффект от использования скользящего резервирования ресурсов максимален.*

*Надежность; программное устройство; скользящее резервирование; эффект; конфигурация; планирование вычислительных экспериментов; имитационное моделирование.*

\* Исследование выполнено при поддержке РФФИ, грант 11-07-00542-а «Разработка научных основ создания сетцентрических информационно-управляющих систем».

G.V. Gorelova, E.V. Melnik

**SIMULATION MODELING BACK-UP OPTIONS IN DISTRIBUTED INFORMATION-CONTROL SYSTEM WITH A DECENTRALIZED ORGANIZATION**

*The possibility of increasing the reliability of distributed information and control systems (RIUS) with a decentralized organization through redundancy of computing devices. As the sliding reserve stands reserve performance processing units (PU), in contrast to the traditional method of sliding backup only PU. The variants of sliding backup designed. To assess the effect of these options was accomplished modeling simulation the functioning RIUS. The Models and the algorithms have been developed for modeling simulation. In order to reduce the number of computer simulation experiments was used experimental design techniques. Identified RIUS configuration, in which the effect of the use of sliding reservation maximum.*

*Reliability; software; computing device; sliding redundancy effect; configuration; experimental design techniques; simulation modeling.*

**Введение.** Важность решения проблем повышения надежности РИУС в настоящее время возрастает по мере расширения применения их в различных технических областях, особенно при построении мехатронных и робототехнических комплексов [1]. В работе представлены результаты исследования и способ определения лучшей в смысле отказоустойчивости структуры распределенной информационно-управляющей системы с децентрализованной организацией [1–4].

Повышать надежность РИУС предложено за счет скользящего резервирования, когда в качестве скользящего резерва выступает резерв производительности процессорных устройств в отличие от традиционного способа скользящего резервирования только ПУ. При этом общий резерв ПУ разделяется либо четко на две части: основные и резервные ПУ (рис.1), либо четкое разделение отсутствует и может быть использован резерв производительности любых ПУ (рис. 2 и 3). В зависимости от того, как перераспределяется работа между ПУ, возникают варианты скользящего резервирования процессорных устройств и производительности.

В процессе исследования для предложенных вариантов скользящего резервирования были разработаны соответствующие им математические модели и алгоритмы расчета характеристик надежности РИУС, проведено имитационное моделирование функционирования РИУС в разных условиях. Целью исследований была проверка гипотезы об эффективности предложенных вариантов скользящего резервирования и выявление вариантов (конфигураций) РИУС, в которых эффект от использования скользящего резервирования ресурсов максимален.

Имитационное моделирование, как известно [5, 6], является методом исследования, при котором изучаемая система заменяется моделью, с которой проводятся эксперименты с целью получения информации об этой системе. При этом результаты будут определяться случайным характером процессов в системе. Необходимость в имитационном моделировании системы возникает тогда, когда на реальном объекте экспериментировать невозможно по тем или иным причинам (дорого, опасно, система только проектируется...), когда в системе есть нелинейности, стохастические переменные, есть причинные связи, время. Все названные особенности играют роль и при разработке РИУС, поэтому на этапе предпроектных и проектных исследований РИУС применение имитационного моделирования необходимо. Среди основных видов имитационного моделирования (дискретно-событийное, системной динамики, агентное) в нашем случае имитационное моделирование ведется, главным образом, в рамках агентного моделирования (agent-based model (ABM)). Это относительно новое направление имитационного моделирования (примерно с 1990 гг. прошлого столетия), которое начало применяться для ис-

следования децентрализованных систем. Отличительной особенностью агентного моделирования является то, что предположение о свойствах и общем поведении системы строится из предположений об индивидуальном поведении и взаимодействии ее активных элементов – децентрализованных агентов (в нашем случае ПУ), обладающих автономным поведением и могущим принимать решение в соответствии с некоторым набором правил (в рассматриваемом случае – правила обмена информацией между ПУ, алгоритмы мультиагентного принятия коллективных решений). Глобальное поведение системы (функционирование РИУС) возникает как результат деятельности множества индивидуальных агентов [5, 6].

Испытания моделей (конфигураций) РИУС на отказоустойчивость при различных вариантах скользящего резервирования потребовало проведения большого количества опытов, учитывающих взаимосвязь варьируемых параметров. С целью достижения максимальной точности измерений при минимальном количестве проведенных опытов и сохранении статистической достоверности результатов были использованы методы планирования эксперимента [7–17].

**Скольльзящее резервирование в РИУС.** Рассмотрим возможные варианты скользящего резервирования.

*Вариант 1.* Основные ПУ в ходе работы РИУС выполняют собственно решение задачи управления, а резервные ПУ включаются в работу только в случае отказа основных (рис. 1). Особенности данного варианта:

- ◆ относительная простота реализации (в случае отказа все подзадачи, решавшиеся на отказавшем ПУ, запускаются на одном из резервных);
- ◆ различная, в общем случае, вычислительная нагрузка, приходящаяся на основные и резервные ПУ (в зависимости от типа и важности решаемых задач резервные ПУ могут не выполнять никаких операций, могут выполнять накопление данных, необходимых для запуска подзадач, могут выполнять параллельно отдельные подзадачи);
- ◆ все резервные ПУ выполняют одинаковый набор действий (каждый из них должен иметь возможность заменить любой из основных ПУ), в связи с этим объем решаемых задач обеспечения отказоустойчивости ограничивается производительностью резервных ПУ;
- ◆ свободные ресурсы основных ПУ никак не используются.

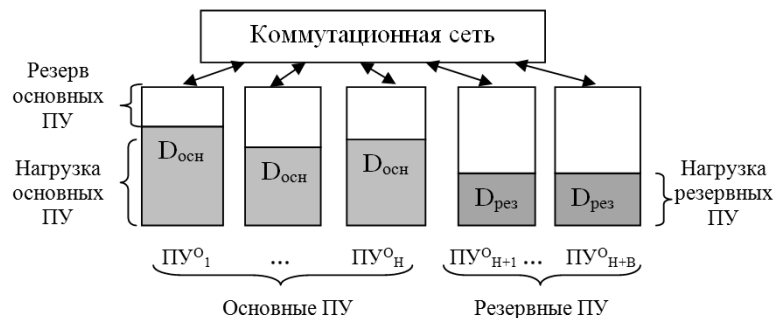


Рис. 1. Распределение нагрузки в РИУС с резервированием ПУ

*Вариант 2.* Резервирования без выделения специальных резервных ПУ (рис. 2). Данный способ предполагает использование всех имеющихся ПУ как для решения задачи управления, так и для поддержания требуемого уровня готовности для «подхвата» подзадач с отказавших ПУ, т.е. вся вычислительная нагрузка, связанная с решением задачи управления и поддержанием резерва в готовности, равномерно распределяется между всеми ПУ РИУС.

Второй вариант имеет следующие особенности:

- ◆ более сложная по сравнению с вариантом выделения основных и резервных ПУ сложность реализации (в случае отказа необходимо найти вариант размещения подзадач на исправных ПУ РИУС с учетом уже выполняющихся подзадач и имеющихся резервных ресурсов);
- ◆ возможность использования всех ресурсов РИУС для решения задачи управления с целью улучшения характеристик, например, уменьшения времени решения;
- ◆ возможность задействовать свободные ресурсы «основных» ПУ (т.е. ресурсы, не используемые для решения подзадач задачи управления) в целях обеспечения устойчивости к отказам;
- ◆ возможность выровнять вычислительную нагрузку, приходящуюся на отдельные ПУ, за счет выбора размещения подзадач

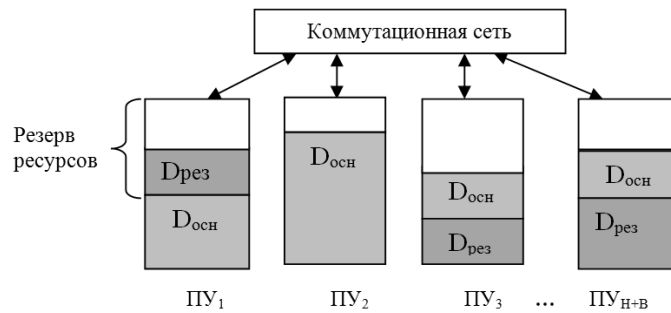


Рис. 2. Распределение нагрузки в РИУС с резервированием ресурсов

*Вариант 3.* Помимо рассмотренных двух альтернативных вариантов обеспечения надежности вычислительной части РИУС – за счет введения резервных ПУ и за счет резервной (избыточной) производительности отдельных ПУ – возможен и смешанный вариант, когда оба эти подхода используются одновременно, т.е. в системе могут находиться резервные ПУ, а каждый ПУ также может иметь избыточную резервную производительность (рис. 3).

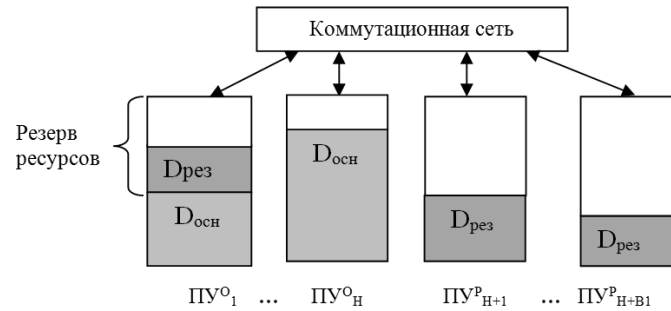


Рис. 3. Повышение отказоустойчивости вычислительной части за счет наличия резервных ПУ и резервной (избыточной) производительности ПУ

На рис. 3:  $ПУ_i^0$  ( $i = 1, N$ ) – основные ПУ, задействованные в решении задачи управления,  $ПУ_j^p$  ( $j = 1, B_1$ ) – резервные ПУ.

Данный способ сочетает в себе достоинства и недостатки предыдущих двух:

- ◆ более сложная по сравнению с вариантом выделения основных и резервных ПУ сложность реализации (в случае отказа, когда нет резервных ПУ, необходимо найти вариант размещения подзадач на исправных ПУ РИУС с учетом уже выполняющихся подзадач и имеющихся резервных ресурсов);
- ◆ возможность задействовать свободные ресурсы «основных» ПУ (т.е. ресурсы, не используемые для решения подзадач задачи управления) в целях обеспечения устойчивости к отказам;
- ◆ различная, в общем случае, вычислительная нагрузка, приходящаяся на основные и резервные ПУ (в зависимости от типа и важности решаемых задач резервные ПУ могут не выполнять никаких операций, могут выполнять накопление данных, необходимых для запуска подзадач, могут выполнять параллельно отдельные подзадачи);
- ◆ возможность использования всех ресурсов РИУС для решения задачи управления с целью улучшения характеристик, например, уменьшения времени решения;
- ◆ все резервные ПУ выполняют одинаковый набор действий (каждый из них должен иметь возможность заменить любой из основных ПУ), в связи с этим объем решаемых задач обеспечения отказоустойчивости ограничивается производительностью резервных ПУ.

**Имитационные модели скользящего резервирования.** Особенностью моделей является то, что задача повышения отказоустойчивости РИУС формулируется как двухкритериальная оптимизационная задача, в которой учитывается необходимость повышения вероятности безотказной работы РИУС и снижения стоимости аппаратных затрат. Как пример, приведем модель для второго варианта, общий случай.

Пусть в РИУС решается задача управления, граф которой  $G(Q, X)$ , где  $Q$  – вершины графа, подзадачи, на которые разбита исходная задача,  $X$  – связи между вершинами графа.

Основные ПУ обеспечивают решение всех подзадач задачи управления  $G(Q, X)$  за ограниченное время  $T_{доп}$

$$T_B = \frac{\sum_{i=1}^{M_{оп}} D_i}{HS_{ПУ}} \leq T_{доп}, \quad (1)$$

где  $M_{оп}$  – число операционных вершин в графе  $G(Q, X)$ ;  $D_i$ ,  $i=(1, M)$  – вычислительная сложность подзадачи, приписанной  $i$ -й операционной вершине графа;  $H$  – число основных ПУ;  $S_{ПУ}$  – производительность каждого из задействованных в решении основных ПУ.

Чтобы парировать  $B$  отказов, производительность  $S_{ПУ}^*$  всех  $H$  основных ПУ необходимо повысить до величины

$$S_{ПУ}^* = S_{ПУ} + \frac{B}{H-B} S_{ПУ} = \frac{H}{H-B} S_{ПУ}. \quad (2)$$

При этом вероятность безотказной работы системы будет равна  $P_B$ :

$$P_B = \sum_{k=0}^B C_H^{H-k} P_{ПУ}^{H-k} (1 - P_{ПУ})^k, \quad (3)$$

где  $C_H^{H-k}$  – количество сочетаний при отказе  $k$  процессорных устройств,  $P_{ПУ}^{H-k}$  – вероятность того, что осталось работоспособными  $H-k$  устройств.

Стоимость аппаратных затрат составит  $C_B$ – и она должна быть минимизирована

$$C_B = H \cdot C_{ПУ}^H = H \cdot f(S_{ПУ}^*) = H \cdot f\left(\frac{H}{H-B} S_{ПУ}\right) \rightarrow \min, \quad (4)$$

где число  $C_{ПУ}^H$  основных ПУ есть функция  $f$  производительности  $S_{ПУ}^*$  всех  $H$  основных ПУ.

Формула (3) предполагает равенство вероятности безотказной работы всех ПУ РИУС. В действительности величина данного параметра у ПУ отличается вследствие отличий в условиях работы. Одним из факторов, определяющих отличия, является нагрузка ПУ, определяющая их температуру.

В процессе работы ПУ выделяют тепло, причем увеличение интенсивности работы, которое может быть выражено в числе переключений логических элементов, приводит к увеличению тепловыделения (вследствие разницы в нагрузке температура микропроцессоров и других элементов современных ПУ может отличаться на 30–40 °С). При увеличении интенсивности работы (нагрузки) ПУ происходит пропорциональное увеличению выделения тепла [15–17].

Если формулу (3) переписать с учетом разности температур  $\Delta T$ , то получим

$$P_{ПУ} = e^{-\lambda_0 \cdot 2^{\frac{\Delta T}{10} \cdot t}} = P_{ПУ0}^{2^{\frac{\Delta T}{10}}}$$

где  $P_{ПУ0}$  – вероятность безотказной работы ПУ при «базовой» температуре [2].

Введем обозначение  $k(\Delta T) = 2^{\frac{\Delta T}{10}}$ , тогда  $P_{ПУ} = P_{ПУ0}^{k(\Delta T)}$ . График зависимости вероятности безотказной работы от разности температур приведен на рис. 4. Данный график показывает, насколько будут отличаться вероятности безотказной работы ПУ, работавшего при «базовой» температуре, и ПУ, работавшего при температуре, отличающейся на  $\Delta T$ .

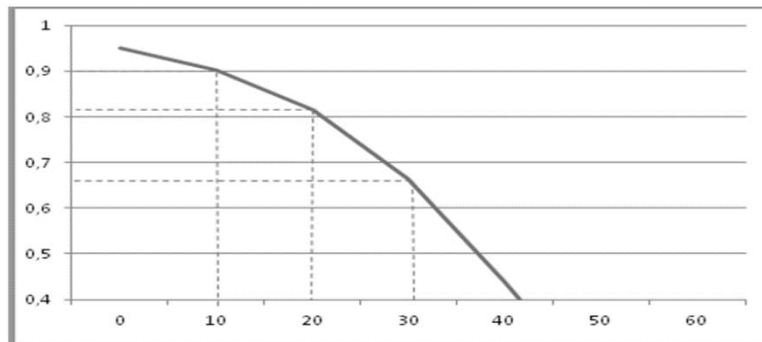


Рис. 4. График зависимости вероятности безотказной работы ПУ от разности температур

Обратим внимание на тот факт (см. рис. 4), что равное отклонение температуры от некоторого значения в сторону увеличения и уменьшения приводит к неодинаковому изменению вероятности безотказной работы, причем увеличение температуры приводит к большему изменению, чем уменьшение ( $P(-20) - P(10) < P(30) - P(20)$ ). Поскольку температура ПУ зависит, в том числе и от нагрузки, то логично предположить, что при равной суммарной нагрузке РИУС с равномерно и неравномерно нагруженными ПУ будут иметь разную вероятность безотказной работы. Если это так, то, следовательно, «правильно» распределяя нагрузку по ПУ можно повысить вероятность безотказной работы РИУС.

Если учитывать разницу температуры  $\Delta T$  вследствие неравномерности нагрузки «основных» и резервных ПУ, то формула (3) для определения вероятности безотказной работы системы должна представлять собой сумму вероятностей перехода РИУС из  $N$  ПУ во все работоспособные конфигурации для этих двух групп ПУ с разной вероятностью безотказной работы и эта вероятность должна стремиться к максимуму

$$P = \sum_{i=0}^H \sum_{j=0}^B f(P_{ПУ}, \Delta T, H, B) \rightarrow \max, \quad (5)$$

$$f(P_{ПУ}, \Delta T, H, B) = \begin{cases} C_H^{H-i} P_{ПУ\text{ осн}}^{H-i} (1 - P_{ПУ\text{ осн}})^i C_B^{B-j} P_{ПУ\text{ рез}}^{B-j} (1 - P_{ПУ\text{ рез}})^j \text{ при } i + j \leq B \\ 0 \text{ при } i + j > B, \end{cases}$$

где  $C_H^{H-i} P_{ПУ\text{ осн}}^{H-i} (1 - P_{ПУ\text{ осн}})^i$  – выражение для учета вклада в величину вероятности безотказной работы РИУС «основных» ПУ;  $C_B^{B-j} P_{ПУ\text{ рез}}^{B-j} (1 - P_{ПУ\text{ рез}})^j$  – выражение для учета вклада в величину вероятности безотказной работы РИУС резервных ПУ.

Формула (5) подходит для первого случая резервирования, когда можно явно выделить основные и резервные ПУ

Задача (1)–(5) относится к классу двухкритериальных лексикографических задач; методы решения многокритериальных лексикографических задач предложены в [18]. Особенностью задачи оптимизации в рассматриваемом случае является то, что ее параметры не могут быть заданы однозначно, они зависят от результатов имитационного моделирования для рассмотренных вариантов скользящего резервирования, равномерной и неравномерной нагрузки ПУ. Вычислительный эксперимент позволил получать данные для целевых функций типа (3), (4) и далее решать оптимизационные задачи методом последовательных уступок [18]. При этом в качестве основного критерия  $K_1$  принималась вероятность  $P_B$ , в качестве следующего  $K_2$  – аппаратная стоимость.

В процессе исследования РИУС на разных имитационных моделях был проведен анализ влияния нагрузки ПУ на надежность РИУС при различных вариантах неравномерности нагрузки, резервирования и различных значениях параметров моделей ( $H, k, S_{ПУ}, P_{ПУ}$  и др.).

Для организации вычислительных экспериментов были использованы методы планирования экспериментов в условиях неоднородности [8] в связи с многообразием разнообразных количественных и качественных факторов.

На рис. 5 приведен один из вариантов исследуемых конфигураций РИУС, изображены структуры РИУС с резервированием ПУ при полной загрузке резерва, а также с резервированием ресурса с аналогичной нагрузкой (при условии выравнивания нагрузки). Разница между рассматриваемыми вариантами резервирования уменьшается при увеличении нагрузки «основных» ПУ (т.е. увеличения  $H/H_{min}$ ) в случае резервирования процессорных устройств, поэтому результаты приведены только для  $H/H_{min}=0,5$  (рис. 6). На графиках отражены конфигурации РИУС, при которых разность вероятностей безотказной работы для рассматриваемых вариантов резервирования максимальна.

В случае полностью нагруженного резерва достижение эффекта от выравнивания нагрузки возможно только при относительно низкой нагрузке «основных» ПУ, а также при периоде эксплуатации не более 5 000 ч.

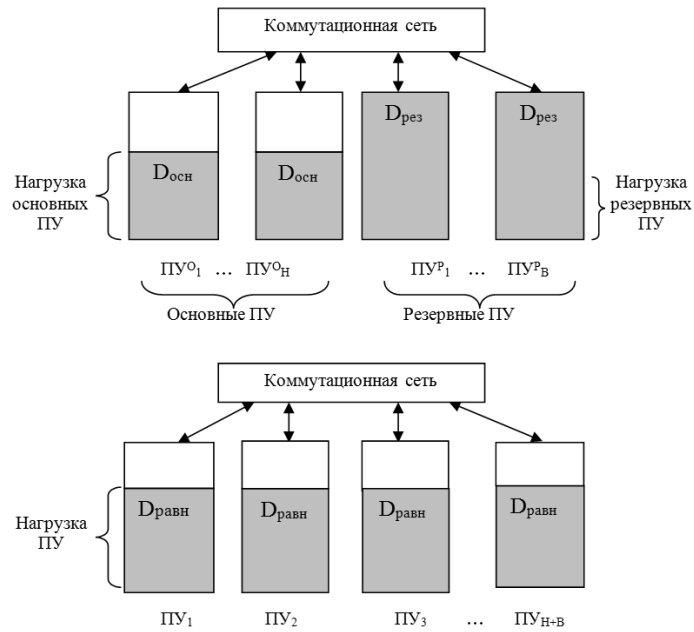


Рис. 5. Распределение нагрузки по процессорным устройствам в РИУС с резервированием ПУ и резервированием ресурсов при  $k_{рез}=1$

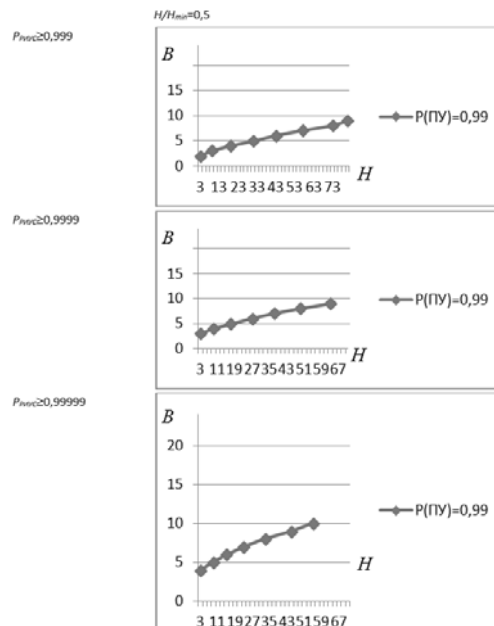


Рис. 6. Данные о конфигурациях РИУС, в которых эффект от использования резервирования ресурсов максимален

**Заключение.** В данной статье описаны основные идеи исследования РИУС на стадии предпроектных разработок, когда желательно провести анализ разнообразных вариантов ее конфигураций с целью остановиться на лучших по разным



критериям. Такие исследования требуют имитационного моделирования с привлечением разнообразных междисциплинарных подходов и методов, а также проведения значительного количества модельных экспериментов, что и было сделано в данном исследовании. Постановки задач и результаты исследований частично проиллюстрированы примерами.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Каляев И.А., Мельник Э.В.* Децентрализованные системы компьютерного управления. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2011. – 196 с.
2. *Строгонов А.* Долговечность интегральных схем и производственные методы ее прогнозирования // *ChipNews*. – 2002. – № 6. – С. 44-49.
3. *Мелентьев В.А.* Моделирование систем, устойчивых к отказам заданной кратности. Труды VII Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'08 Москва 28-31 января 2008 г. – С. 1210-1223.
4. *Труханов В.М.* Новый подход к обеспечению надежности сложных систем. – М.: Изд. дом «Спектр», 2010. – 247 с.
5. *Хемди А. Таха* Глава 18. Имитационное моделирование // Введение в исследование операций = *Operations Research: An Introduction*. – 7-е изд. – М.: Вильямс, 2007.
6. *Строгалев В. П., Толкачева И. О.* Имитационное моделирование. – М.: МГТУ им. Баумана, 2008.
7. *Налимов В.В., Чернова Н.А.* Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
8. *Маркова Е.В., Лисенков А.Н.* Планирования экспериментов в условиях неоднородностей. – М.: Наука, 1973. – 220 с.
9. *Горелова Г.В., Мельник Э.В.* Планирование эксперимента при исследовании новых методов и алгоритмов организации распределенных вычислений // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. – 2007. – № 10. – С.49-56.
10. *Горелова Г.В., Мельник Э.В.* Исследование отказоустойчивости на моделях средств поддержки управленческих решений в системах управления безопасностью методами планирования эксперимента. 15 Международная конференция «Проблемы управления безопасностью сложных систем». – М.: Изд-во ИПУ РАН, 2007. – С. 75-78.
11. *Горелова Г.В., Мельник Э.В.* Возможности планирования эксперимента при моделировании взаимодействия сложных систем на графах / В тр. 7-й Межд. научно-практ. мультikonференции «Управление большими системами -2007». – М.: Изд-во ИПУ РАН. – С. 100-104.
12. *Мельник Э.В.* Планирование эксперимента в организации исследования свойств РИУС. 3-я Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективные системы и задачи управления». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008. – Т. II. – С. 184-185.
13. *Горелова Г.В., Мельник Э.В.* Исследование отказоустойчивости распределенных информационно-управляющих систем для социотехнических объектов / Сб. трудов 16-й Междунар. конф. «Проблемы управления безопасностью сложных систем». – М.: Изд. центр РГГУ, 2008. – С. 141-145.
14. *Горелова Г.В., Мельник Э.В., Коровин Я.С.* Проектирование интеллектуальных распределенных информационно-управляющих систем // Тр. Междун. научно-техн. мультikonф. «Актуальные проблемы информационно-компьютерных технологий, мехатроники и робототехники; Многопроцессорные вычислительные и управляющие системы». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – Т. 2. – С. 28-31
15. *Горелова Г.В., Мельник Э.В.* Организация испытаний отказоустойчивых распределенных информационно-управляющих систем на этапе их проектирования // Тр. XIII Междун. научн.-практ. конф. «Системный анализ в проектировании и управлении». Ч. 2. – СПб.: Изд. СПб ГПУ, 2009. – С. 147-157.
16. *Мельник Э.В., Горелова Г.В.* Об эффекте выравнивания вычислительной нагрузки процессорных устройств в высоконадежных РИУС, планирование исследований // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2012. – № 11. – С. 29-35.

17. Мельник Э.В., Горелова Г.В. Исследование эффекта выравнивания вычислительной нагрузки процессорных устройств в высоконадежных распределенных информационно-управляющих системах. Материалы 7-й Всероссийской научно-практ. конф. «Перспективные системы и задачи управления». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – С. 316-326.
18. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – М.: Наука, 1982. – С. 9-15.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.П. Карелин.

**Горелова Галина Викторовна** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: g.v.gorelova@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634394264; кафедра государственного и муниципального управления; д.т.н.; профессор.

**Мельник Эдуард Владиславович** – НИИ Многопроцессорных вычислительных систем им. акад. А.В. Каляева, (НИИ МВС), ЮФУ, Таганрог; e-mail: evm@mvs.tsure.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634311865, 88634622088; к.т.н.; лаборатория НИИ МВС; зав. лабораторией.

**Gorelova Galina Viktorovna** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: g.v.gorelova@gmail.com; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634394264; the department of state and municipal management; dr. of eng. sc.; professor.

**Melnik Eduard Vladislavovich** – Institute of Multiprocessor systems to them. Acad. Kalyaev, SFU, Taganrog; e-mail: evm@mvs.tsure.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phones: +78634311865, +78634622088; cand. of eng. sc.; laboratory institute of multiprocessor systems; head of laboratory.

УДК Д-1239, И46

**О.Л. Бухвалов, В.И. Городецкий, О.В. Карсаев, Г.И. Кудрявцев,  
В.В. Самойлов**

### **РАСПРЕДЕЛЕННАЯ КООРДИНАЦИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ B2B-СЕТЯХ**

*Описывается эффективный распределенный алгоритм координации расписаний выполнения потока взаимосвязанных заказов в B2B-сетях предприятий с ограниченными производственными мощностями при заданных ограничениях на допустимые периоды выполнения заказов с учетом требований сохранения конфиденциальности информации узлов сети. Предлагается его реализация в архитектуре многоагентных систем. Алгоритм демонстрируется на примере задачи межцеховой координации расписаний большого предприятия, в котором цехи сами ответственны как за составление своих локальных расписаний выполнения множества заказов, так и за их координацию с аналогичными расписаниями других цехов.*

*Распределенная координация локальных расписаний; сохранение конфиденциальности; агент; многоагентная архитектура.*

**O.L. Bukhvalov, V.I. Gorodetsky, O.V. Karsaev, G.I. Kudryavtsev, V.V. Samoylov**

### **DISTRIBUTED COORDINATION IN B2B PRODUCTION NETWORKS**

*The paper concern is privacy preserving distributed production scheduling in B2B-networks when several organizations of limited production powers are involved in concurrent fulfillment of multiple interconnected dynamically incoming order flow. The paper presents a privacy preserv-*