

21. *Shahshahani, Seyed Mohammad Reza & Mahdiani Hamid*. FiCA: A Fixed-point Custom Architecture FastICA for Real-time and Latency-Sensitive Applications, *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering: a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2022, pp. 10.1109/TNSRE.2022.3213010.
22. *Selesnick I.W., Burrus C.S.* Generalized digital Butterworth filter design, *IEEE Transactions on signal processing*, 1998, Vol. 46, No. 6, pp. 1688-1694.
23. *Elitas S.* A computer aided design of digital filters. NASA STI/Recon Technical Report No. 11304-, 1977.
24. *Le Q. et al.* ICA with reconstruction cost for efficient overcomplete feature learning, *Advances in neural information processing systems*, 2011, Vol. 24.
25. *Livezey Jesse & Bujan Alejandro & Sommer Friedrich*. On degeneracy control in overcomplete ICA, 2016.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Боженюк.

**Чикрин Дмитрий Евгеньевич** – Казанский (Приволжский) федеральный университет; e-mail: dmitry.kfu@ya.ru; г. Казань, Россия; тел.: +78432337037; д.т.н.; директор Института вычислительной математики и информационных технологий.

**Егорчев Антон Александрович** – e-mail: eanton090@gmail.com; тел.: +78432337609; к.т.н.; зам. директора по общим вопросам Института вычислительной математики и информационных технологий.

**Пашин Дмитрий Михайлович** – e-mail: dmitry.m.pashin@gmail.com; тел.: +78432337871; д.т.н., проректор по цифровой трансформации и инновационной деятельности.

**Сарамбаев Никита Андреевич** – e-mail: sarambaev@gmail.com; инженер-программист сектора высокоуровневой разработки Научно-исследовательского центра «Центр превосходства Специальная робототехника и искусственный интеллект» Института вычислительной математики и информационных технологий.

**Chickrin Dmitry Evgenevich** – Kazan (Volga Region) Federal University; e-mail: dmitry.kfu@ya.ru; Kazan, Russia; phone: +78432337037; dr. of eng. sc. director of the Institute of computer mathematics and information technologies.

**Egorchev Anton Aleksandrovich** – e-mail: eanton090@gmail.com; phone: +78432337609; cand. of eng. sc.; deputy director for general affairs of the Institute of computer mathematics and information technologies.

**Pashin Dmitry Mikhailovich** – e-mail: dmitry.m.pashin@gmail.com; phone: +78432337871; dr. of eng. sc. vice-rector for digital transformation and innovation.

**Sarambaev Nikita Andreevich** – e-mail: sarambaev@gmail.com; phone: +79179029352; engineer-programmer of the high-level development sector of the Research Center "Center of excellence special robotics and artificial intelligence" of the Institute computer mathematics and information technologies.

УДК 004.31(075.8)

DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-42-56

**К.А. Иваненко, Д.Б. Борзов, И.Е. Чернецкая, В.С. Титов, А.С. Сизов**

## **ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВ ПЛАНИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РАЗМЕЩЕНИЯ В МАТРИЧНЫХ МУЛЬТИПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМАХ ВЫСОКОЙ ГОТОВНОСТИ**

*Рассматривается тема мультипроцессорных систем высокой готовности, применяющихся в таких задачах, как геолокация, прицеливание, атомные системы, прогнозирование наблюдения, слежение и другие. При возникновении таких внештатных ситуаций, как неисправность или отказ отдельных процессорных модулей системы, а также ситуаций, связанных с оперативным воздействием на мультипроцессорную систему, возникает необходимость сроч-*

ного реагирования. Мультипроцессорная система может реагировать на внештатные ситуации определенным способом, который заключается в планировании размещения или перераспределения параллельных задач. Задача планирования размещения формально определяется как процесс отображения вершин и дуг взвешенного орграфа, описывающего выполняемые задачи, на нерегулярный граф, который в свою очередь представляет физическую структуру мультипроцессорной системы. При выборе оптимального преобразования особое внимание направлено на минимизацию общего веса дуг, которые отражают связи между выполненными задачами. Этот процесс, по сути, представляет собой более сложную версию задачи поиска на графе. Важно подчеркнуть, что такой вид поиска является классической NP-полной задачей в теории графов. Алгоритмы пчелиного улья, генетическая эволюция, муравьиные колонии и метод гильотинного разреза – все эти популярные методы поиска оптимального размещения не подходят для данной задачи, так как основанно выполняют поиск на уровне программного обеспечения. Для того чтобы система оперативно реагировала на внештатные ситуации, она должна быстро выполнять вычисления, чего данные методы позволить не могут. Следовательно, актуальной задачей является разработка метода и алгоритма планирования размещения задач в матричных гиперкубических мультипроцессорных системах высокой готовности. Эта работа продолжает идеи, представленные в ранее опубликованных работах по данному направлению в части совмещения поисковых и расчетных шагов для проверки промежуточных вариантов. Дополнительная информация в виде отношений расстояний между элементами графа позволяет сократить перебор, что подтверждается проверкой на типовых графах.

*Размещение; задача; метод; алгоритм; матричная система; гиперкуб.*

**K.A. Ivanenko, D.B. Borzov, I.E. Chernetskaya, V.S. Titov, A.S. Sizov**

**APPLICATION OF DEVICES FOR PLANNING AND ASSESSMENT  
OF PLACEMENT QUALITY IN MATRIX MULTIPROCESSOR SYSTEMS  
OF HIGH AVAILABILITY**

*The article discusses the topic of high-availability multiprocessor systems used in tasks such as geolocation, targeting, atomic systems, forecasting, surveillance, tracking and others. When emergency situations arise, such as a malfunction or failure of individual processor modules of the system, as well as situations associated with operational impact on a multiprocessor system, there is a need for an urgent response. A multiprocessor system can respond to emergency situations in a certain way, which consists of scheduling the placement or relocation of parallel tasks. The placement planning problem is formally defined as the process of mapping the vertices and arcs of a weighted digraph describing the tasks being performed onto an irregular graph, which in turn represents the physical structure of a multiprocessor system. When choosing the optimal transformation, special attention is paid to minimizing the total weight of the arcs that reflect the relationships between completed tasks. This process is essentially a more complex version of the graph search problem. It is important to emphasize that this type of search is a classical NP-complete problem in graph theory. Beehive algorithms, genetic evolution, ant colonies, and guillotine cutting are all popular methods for finding optimal placements that are not suitable for this task because they mostly perform the search at the software level. In order for the system to quickly respond to emergency situations, it must quickly perform calculations, which these methods cannot allow. Therefore, an urgent task is to develop a method and algorithm for planning the placement of tasks in matrix hypercubic multiprocessor systems of high availability. This work continues the ideas presented in previously published works in this area in terms of combining search and calculation steps to test intermediate options. Additional information in the form of relations of distances between graph elements allows us to reduce the search, which is confirmed by testing on typical graphs.*

*Placement; problem; method; algorithm; matrix system; hypercube.*

**Введение.** Мультипроцессорные системы (МС) в настоящее время являются широко распространенным классом вычислительных комплексов и систем. При этом они имеют высокую степень параллелизма [1, 2]. Очевидно, что в системах высокой готовности (слежение, наблюдение, прицеливание, метеосистемы и т.п.) требуется снижение времени межпроцессорного обмена в МС. Типологически такие МС, как правило, имеют матричную организацию.

Возникновение дефекта на кристалле процессора МС, либо его отказа или сбоя приводит к необходимости оперативной реакции со стороны МС. Одним из вариантов такой реакции может быть планирование размещения или переразмещения выполняемых параллельных программ. Причем желательно, чтобы такой план размещения строился с учетом не только возможных дефектов процессорных модулей, но и дефектных каналов связи, через которые нельзя передавать данные между процессорами. Так как число процессоров современных ММ приближается к 100, задача планирования размещения становится программно неразрешимой за приемлемое для практики время. С учетом вышесказанного актуальной является разработка устройств планирования размещения параллельных программ в матричных мультипроцессорных системах.

**Постановка задачи.** Исходная задача (процесс, алгоритм, программа) представляется в виде двунаправленного взвешенного графа  $G = \langle X, E \rangle$  (рис. 1), вершины  $x_i \in X$  которого соответствуют подзадачам (подалгоритмам, подпрограммам и т.п.), а дуги  $e_{ij} \in E \subseteq X \times X$  задают управляющие и/или информационные связи между подзадачами и фактически являются каналами передачи данных [3].

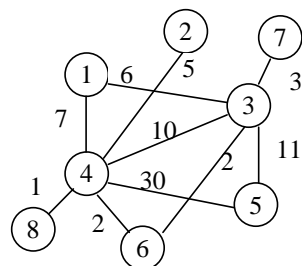


Рис. 1. Граф задачи

Граф  $G$  (рис. 1) может быть описан матрицей смежности  $W = \|w_{ij}\|_{N \times N}$  (рис. 2), где  $N = n^2 = |X|$ ;  $w_{ij}$  – объем передаваемых данных между  $i$ -м и  $j$ -м процессорным модулем.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0		6	7				
2		0		5				
3	6		0	10	11	2	3	
4	7	5	10	0	30			1
5			11	30	0			
6			2			0		
7			3					
8				1				

Рис. 2. Матрица смежности графа  $G$

Топологическая модель (область размещения) задается матрицей расстояний (МР)  $D$ . Элементы матрицы расстояний  $D = \|d_{ij}\|_{n \times n}$  ( $N = n^2 = |H|$ ) для графа (см. рис. 1), представлена на рис. 3.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	2	1	3	2	1	3
2	1	0	1	2	3	4	1	3
3	2	1	0	1	1	3	2	2
4	3	2	1	0	2	1	2	2
5	1	3	1	2	0	1	2	1
6	2	4	3	1	1	0	3	1
7	1	1	2	2	2	3	0	1
8	3	3	2	2	1	1	1	0

Рис. 3. Матрица расстояний графа G

Мультипроцессорная система представляется топологической моделью в виде графа

$$H = \langle P, V \rangle, \text{ где } P = \begin{Bmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \dots & p_{1,n} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \dots & p_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n,1} & p_{n,2} & \dots & p_{n,n} \end{Bmatrix} - \text{множество идентификаторов про-}$$

цессорных модулей MC, организованных в матрицу  $|P|_{n \times n}$ , где мощность  $|P| = N = n^2$  – число соответствующих процессорных модулей; V – множество межмодульных связей, задаваемых матрицей смежности  $\|W\|_{N \times N}$  размером  $n^2 \times n^2$ .

Матрица расстояний D строится по матрице смежности  $\|W\|_{N \times N}$  графа H. Если непосредственной связи между модулями в базовом блоке нет, то элемент  $M_{ij}$  – минимальное межмодульное топологическое расстояние, которое вычисляется как кратчайший путь от вершины  $p_i$  до вершины  $p_j$  в графе H, измеренный числом последовательно соединенных каналов.

Тогда, размещение пакета программ (комплекса задач), описываемых графом G в параллельной системе (ПС), может быть аналитически описано отображением

$$\beta_s = \begin{Bmatrix} x_{s_{1,1}} & x_{s_{1,2}} & \dots & x_{s_{1,k}} & \dots & x_{s_{1,n}} \\ x_{s_{2,1}} & x_{s_{2,2}} & \dots & x_{s_{2,k}} & \dots & x_{s_{2,n}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{s_{q,1}} & x_{s_{q,1}} & \dots & x_{s_{q,k}} & \dots & x_{s_{q,n}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{s_{n,1}} & x_{s_{n,2}} & \dots & x_{s_{n,k}} & \dots & x_{s_{n,n}} \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \dots & p_{1,k} & \dots & p_{1,n} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \dots & p_{2,k} & \dots & p_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{q,1} & p_{q,2} & \dots & p_{q,k} & \dots & p_{q,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n,1} & p_{n,2} & \dots & p_{n,k} & \dots & p_{n,n} \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

где  $s = \overline{1, N!}$ ,  $k = \overline{1, n}$ ,  $q = \overline{1, n}$ .

Здесь  $s$  – это номер очередной перестановки, соответствующий  $S$ -му варианту размещения.

Матрица смежности и расстояний, реализованная в [3] позволяет сформулировать задачу размещения [5–7].

Пусть  $\Psi$  – множество всевозможных отображений вида (1). Тогда задачу размещения, можно сформулировать как поиск отображения  $\beta^* \in \Psi$ , такого, что

$$T_{\beta^*} = \min_{\Psi} \{ \max_{\beta_s \in \Psi} \{ T_{\beta_s}(p_{a,b}, p_{x,y}) \} \}, \quad (2)$$

где  $T_{\beta_s}(p_{a,b}, p_{x,y})$  – коммутационная задержка при передаче данных между модулями  $p_{a,b}$  и  $p_{x,y}$ , соответствующая отображению  $\beta_s$ , которая рассчитывается как произведение

$$T_{\beta_s}(p_{a,b}, p_{x,y}) = d_{ij} \cdot m_{ij}, \quad (3)$$

где  $i = (a-1) \cdot n + b$  и  $j = (x-1) \cdot n + y$

Так как мощность множества  $\psi = \{\beta_s\}$  возможных отображений (1) равна числу всевозможных перестановок задач  $\{x_{qk}\}$  в матрице  $X$ :  $|\psi| = N!$ , поиск наилучшего варианта размещения  $\beta^*$  по критерию (2) является сложной переборной задачей [8–9].

**Метод решения.** В целом, поиск варианта размещения, по мнению авторов, должно соответствовать устройству, структурная схема которого представлена на рис. 4 [10].

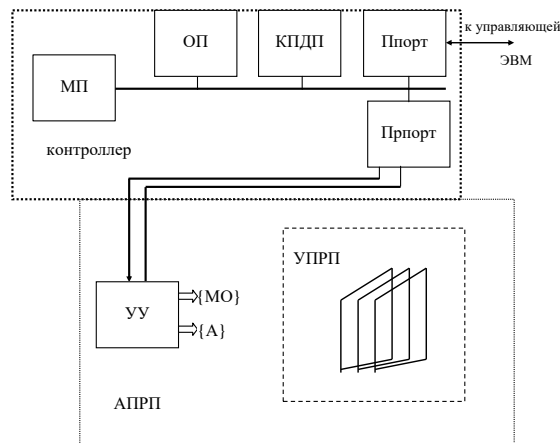


Рис. 4. Структурная организация устройства планирования размещения

На рис. 4 приняты следующие обозначения блоков и узлов: АПП – акселератор планирования перераспределения подпрограмм; ОП – оперативная память; КПДП – контроллер прямого доступа в память; Ппорт – последовательный порт; Прпорт – параллельный порт; УУ – устройство управления; МО – микрооперации; А – адрес, УПП – устройства планирования размещения подпрограмм.

В результате, применительно для МС высокой готовности было спроектированы устройства [13–16], соответствующие представленным выше этапам поиска минимальной нижней оценки. В данном случае авторы предполагают, что с помощью спроектированных УПП (см. рис. 4) первоначально вычисляется минимальная нижняя оценка, то есть значение интенсивности, к которому необходимо стремиться при реальном варианте размещения.

Затем вычисляется степень близости начального варианта размещения  $T_n$ , соответствующей первичному варианту размещения, к нижней оценке  $T_{inf}$  в виде [11]:

$$\eta_n = \frac{T_n}{T_{inf}}. \quad (4)$$

На следующем этапе в зависимости от вида топологической организации МС (линейная, кольцевая, матричная, кубическая и т.д.) с помощью УППП выполняется поиск варианта размещения, после чего вычисляется степень близости величины интенсивности  $T_n$ , соответствующей первичному варианту размещения, к нижней оценке  $T_{inf}$  в виде:

$$\eta_n = \frac{T_n}{T_{inf}}. \quad (5)$$

После этого анализируем степень улучшения полученного варианта размещения по формуле

$$\sigma = \frac{T_n}{T}. \quad (6)$$

В итоге получаем матрицу смежности  $W$ , соответствующую лучшему варианту размещения, которую по параллельной шине передаем на управляющую ЭВМ (см. рис. 4) для принятия решения о дальнейших действиях.

Топологическая модель для размещения (область размещения), в свою очередь предложено задавать матрицей расстояний  $D$ . Элементы матрицы расстояний  $D = \|d_{i,j}\|_{n \times n}$  для кольцевой модели образуются по формуле  $d_{i,j} = (j - i + n) \bmod n$ , а для линейной модели – по формуле  $d_{i,j} = |i - j|$ . Критерием оптимальности размещения является минимум суммарной длины  $L$  межэлементных связей орграфа  $G$  при его размещении в заданной модели с учетом весов его дуг. Минимально возможная длина связей  $L^*$  для орграфа  $G$  независимо от топологической модели определяется по формуле [4]:

$$L^* = \sum_{k=1}^m a'_k d'_k, \quad (7)$$

где  $\|a'_k\|$ ,  $\|d'_k\|$  – векторы, первый из которых содержит ненулевые элементы матрицы смежности  $A$ , расположенные по убыванию, а второй – ненулевые элементы матрицы расстояний  $D$ , расположенные по возрастанию;  $k$  – порядковый номер элемента;  $m = |E| \leq n^2 - n$  – мощность множества дуг  $E$  (количество дуг). Фактическая длина связей  $L$  для найденного размещения орграфа  $G$  всегда либо больше, либо равна длине  $L^*$ , и степень оптимальности размещения можно определить по формуле

$$\xi = L - L^*. \quad (8)$$

Для поиска нижней оценки интенсивности размещения в матричных системах было предложено устройство [12].

В нем было предположено, что исходная (размещаемая) задача (процесс, алгоритм) представляется в виде неориентированного невзвешенного графа  $G = \langle X, E \rangle$ , вершины  $x_i \in X$  которого соответствуют подзадачам (подалгоритмам), а дуги  $e_{ij} \in E \subseteq X \times X$  задают управляющие и/или информационные связи между подзадачами (рис. 5, а, б).

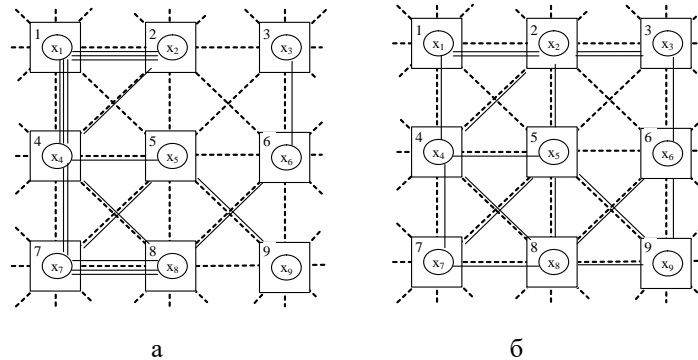


Рис. 5. Граф задачи

Матричная система (МС) отображается однородной средой, которой ставится в соответствие топологическая модель в виде графа  $H = \langle U, V \rangle$ , где

$$H = \left\{ \begin{matrix} u_{1,1}, u_{1,2}, \dots, u_{1,n} \\ u_{2,1}, u_{2,2}, \dots, u_{2,n} \\ \dots \\ u_{n,1}, u_{n,2}, \dots, u_{n,n} \end{matrix} \right\} - \text{множество модулей ПС, организованных в матрицу}$$

$|U|=N=n$  и является количеством модулей ПС и количеством вершин графа  $G$ ,  $V$  – множество межмодульных связей.

Размещение графа  $G$  в МС  $H$  будем задавать в виде отображения:

$$\beta = \left\{ \begin{matrix} x_{S_{1,1}}, x_{S_{1,2}}, \dots, x_{S_{1,k}}, \dots, x_{S_{1,n}} \\ x_{S_{2,1}}, x_{S_{2,2}}, \dots, x_{S_{2,k}}, \dots, x_{S_{2,n}} \\ \dots \\ x_{S_{q,1}}, x_{S_{q,2}}, \dots, x_{S_{p,k}}, \dots, x_{S_{q,n}} \\ \dots \\ x_{S_{n,1}}, x_{S_{n,2}}, \dots, x_{S_{n,k}}, \dots, x_{S_{n,n}} \end{matrix} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{matrix} u_{0,1}, u_{0,2}, \dots, u_{0,k}, \dots, u_{0,n-1} \\ u_{1,1}, u_{1,2}, \dots, u_{1,k}, \dots, u_{1,n-1} \\ \dots \\ u_{q,1}, u_{q,2}, \dots, u_{p,k}, \dots, u_{q,n-1} \\ \dots \\ u_{n-1,1}, u_{n-1,2}, \dots, u_{n-1,k}, \dots, u_{n-1,n-1} \end{matrix} \right\}, \quad (9)$$

где  $k = \overline{1, N}$ ,  $p = \overline{1, N}$ ,  $q = \overline{1, N}$ ,  $S = \overline{1, N}$ !

Полносвязная МС полностью аналогична обычной МС. Отличием является наличие у модуля  $u_{p,k}$  не четырех инцидентных связей, как для обычной МС, а восьми (рис. 6,а,б). Такая МС может быть описана матрицей смежности  $W = \| w_{ij} \|_{n \times n}$ , где  $w_{ij}$  определяется интенсивностью взаимодействия (потока передачи данных, слов данных, кодовых слов передачи управления и т.п.) между подзадачами  $x_i$  и  $x_j$ .

В современном мире системы спутниковой связи, GPS-навигации, отслеживания, прицеливания и контроля приобретают особое значение, как в повседневной жизни, так и в областях военной, военно-технической науки, промышленности и производстве. В этом случае рассматривается область с тремя координатами  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ .

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	3		3					
2	3	0		1					
3			0			1			
4	3	1		0	1		2	1	
5				1	0		1		1
6			1			0		1	
7				2	1		0	3	
8				1	1	1	3	0	
9					1				0

а

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	2		1					
2	2	0	2	1	1				
3		2	0			1			
4	1	1		0	1		1	1	
5		1		1	0		1	1	1
6			1			0		1	1
7				1	1		0	1	
8				1	1	1	1	0	1
9					1	1		1	0

б

Рис. 6. Матрица смежности для графа на рис. 4.

В связи с вышесказанным в [17] была решена задача подсчета минимального значения интенсивности размещения в многопроцессорных кубических циклических системах при однонаправленной передаче информации. Многопроцессорную систему предложено представлять так, как показано на рис. 7, а на фигуре 8 показан циклический вариант многопроцессорной кубической циклической системы.

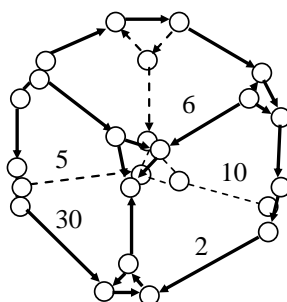


Рис. 7. Многопроцессорная кубическая циклическая система

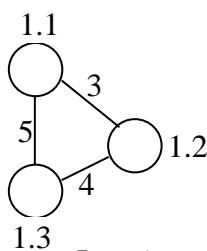


Рис. 8. Циклический вариант многопроцессорной кубической циклической системы

Исходная задача (процесс, алгоритм, программа) представляется в виде направленного взвешенного графа  $G = \langle X, E \rangle$ , вершины  $x_i \in X$  которого соответствуют подзадачам (подалгоритмам, подпрограммам и т.п.), а дуги  $e_{ij} \in E \subseteq X \times X$  задают управляющие и/или информационные связи между подзадачами и фактически являются каналами передачи данных. Граф  $G$  может быть описан матрицей смежности  $W = \|w_{ij}\|_{N \times N}$ , где  $N = n^2 = |X|$ ;  $w_{ij}$  – объем передаваемых данных между  $i$ -м и  $j$ -м процессорным модулем.



Топологическая модель (область размещения) задается матрицей расстояний  $D1$ . Элементы матрицы расстояний  $D1 = \|d1_{ij}\|_{n \times n}$  для кубической системы образуются по формуле  $d1_{i,j} = (j - i + n) \bmod n$ .

Для математического описания циклического фрагмента кубической системы используется матрица смежности  $W2 = \|w2_{ij}\|_{\alpha \times \alpha}$ , где  $\alpha = 3$ ;  $w2_{ij}$  – объем передаваемых данных между  $i$ -м и  $j$ -м процессорным модулем (см. рис. 8). Топологическая модель цикла описывается матрицей расстояний  $D2 = \|d2_{i,j}\|_{\alpha \times \alpha}$  для кубической системы образуются по формуле  $d2_{i,j} = (j - i + \alpha) \bmod \alpha$ .

В [18] предложено устройство для поиска минимального значения интенсивности размещения в тороидальных системах при направленной передаче информации. Его предлагается использовать в области проектирования ВС, например, при размещении процессов (алгоритмов, задач, данных, файлов и т.п.).

Исходная задача (процесс, алгоритм, программа) представляется в виде направленного взвешенного графа  $G = \langle X, E \rangle$  (рис. 9), вершины  $x_i \in X$  которого соответствуют подзадачам (подалгоритмам, подпрограммам и т.п.), а дуги  $e_{ij} \in E \subseteq X \times X$  задают управляющие и/или информационные связи между подзадачами и фактически являются каналами передачи данных. Граф  $G$  может быть описан матрицей смежности  $W = \|w_{ij}\|_{N \times N}$ , где  $N = n^2 = |X|$ ;  $w_{ij}$  – объем передаваемых данных между  $i$ -м и  $j$ -м процессорным модулем.

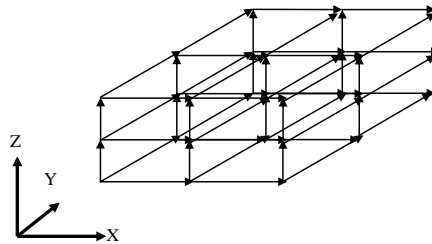


Рис. 9. Граф задачи размещения

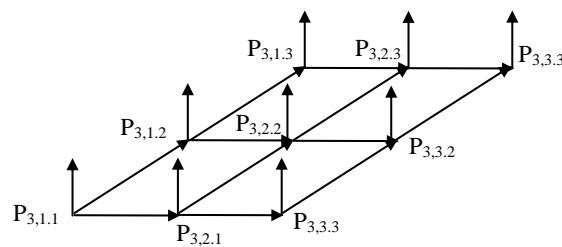


Рис. 10. Пример нижнего слоя ТС

На рис. 9 показан пример тора, состоящего из трех слоев с соответствующими координатными осями:  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , а на рис. 10 пример нижнего (первого) слоя. Здесь процессорные модули обозначены точками с соответствующими им координатами. Так, процессорный модуль  $P_{3,1,1}$  означает процессор, расположенный в третьем слое с координатами  $(1,1)$ . При поиске минимального значения интенсив-

ности размещения предполагается, что наиболее интенсивно взаимодействующие участки исходной задачи (веса дуг с наибольшим объемом передаваемых данных) назначаются на смежные процессорные модули без учета топологии исходного графа  $G$ . Таким образом, реальное значение интенсивности размещения должно быть как можно ближе к ранее найденному минимальному значению.

На рис. 11 представлен вариант размещения, который не является минимальным значением, так как все вершины слоя ТС имеют разные значения степени интенсивности, либо не обладают ими вовсе.

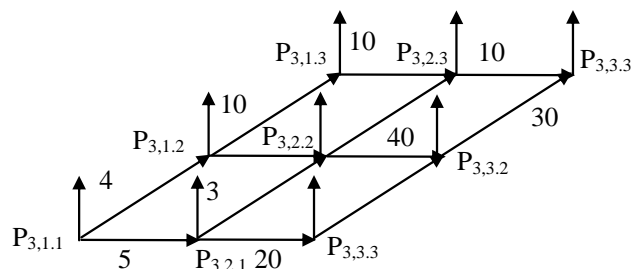


Рис. 11. Вариант размещения в ТС

Используя размещение и оценки согласно рис. 10, получаем количественное значение минимального значения интенсивности:

$$w' = 40, 30, 20, 15, 10, 10, 10, 5, 4, 3;$$

$$d' = 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, \dots;$$

$$L = 40 \cdot 1 + 30 \cdot 1 + 20 \cdot 1 + 15 \cdot 1 + 10 \cdot 1 + 5 \cdot 1 + 3 \cdot 1 = 123.$$

В примере для вектора  $d'$  приведены только начальные значения, влияющие на коэффициент  $L$ .

Таким образом, при поиске минимального значения интенсивности размещения веса дуг графа  $G$  назначаются в порядке убывания соответствующих значений. На рис. 12 представлен вариант размещения, одновременно являющийся минимальным значением интенсивности размещения.

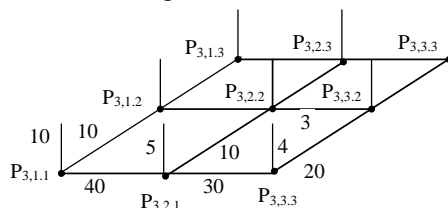


Рис. 12. Вариант размещения в ТС

При «реальном» размещении (процессов, данных и т.д.), значение интенсивности размещения приближается к минимальному значению. Таким образом, можно оценить его качество.

Следующей очевидной задачей после поиска варианта размещения в системах реального времени является оценка его качества, степени приближения либо удаления от некоторого наперед известного, либо изначально заданного или полученного с ВУ оптимума. В данном случае этим оптимумом является минимальная нижняя оценка, поиск которой описан в предыдущих устройствах.

Для оценки качества варианта размещения в системах с матричной организацией [19]. Предлагаемое устройство может быть использовано в области проектирования ВС, например, при размещении процессов (алгоритмов, задач).

**Результаты исследования.** Принцип предложенной оценки качества показан на рис. 13.

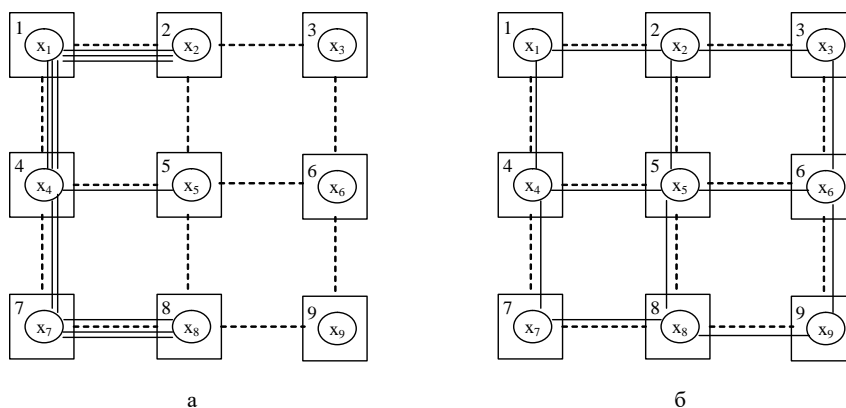


Рис. 13. Принцип оценки качества размещения

Сущность предлагаемого критерия поясняется рис. 13. Здесь на рис. 13,а,б представлены варианты гипотетического размещения графа в МС. Модули МС на рис. 10,а,б представлены квадратами, в левом верхнем углу которых представлены их номера. Внутри модулей кружками обозначены гипотетические назначенные (размещенные) вершины графа с соответствующими номерами внутри. Пунктирные линии обозначают связи модулей МС, а сплошные линии рядом с пунктирными – гипотетические зафиксированные дуги, инцидентные размещенным (назначенным) вершинам. Из рис. 10,а видно, что интенсивность взаимодействия между модулями 1–2, 1–4, а также между модулями 7–8 наибольшая и равна трем. Качество размещения улучшается при варианте размещения, показанном на рисунке 10б. В данном случае интенсивность взаимодействия между всеми модулями равна единице. Такой вариант размещения влияет на общее время выполнения задачи и ведет к его уменьшению.

Устройство [20] предлагает оценки качества размещения в матричных системах за счет введения средств для оценки текущего варианта размещения по критерию загрузки канала между смежными модулями.

Принцип предлагаемой оценки показан на рис. 14.

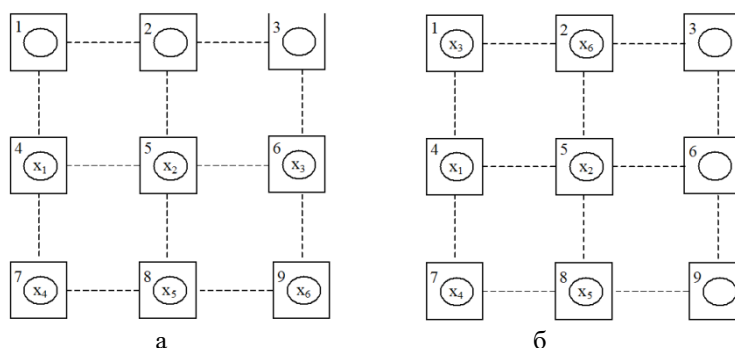


Рис. 14. Принцип оценки качества размещения

Модули МС на рис. 14,а,б представлены квадратами, в левом верхнем углу которых представлены их номера. Внутри модулей кружками обозначены вершины графа с соответствующими номерами внутри. Пунктирные линии обозначают связи модулей МС. Из рис. 14,а видно, что загрузка канала в модулях 4-5-6 и 7-8-9 значительно больше, чем в модулях 1-2-3. Это влияет на общее время выполнения задачи и влечет за собой его увеличение. Вариант размещения на рис. 14,б является более приемлемым с точки зрения общего времени выполнения задачи в целом, так как загрузка канала в первой, второй и третьей строках МС распределена равномерно, предлагается устройство для оценки степени оптимальности размещения в многопроцессорных гиперкубических циклических системах. Предлагаемое устройство может использоваться в области проектирования ВС, например, при размещении процессов (алгоритмов, задач, данных, файлов и т.п.) и позволяет выполнять оценку степени оптимальности размещения в многопроцессорных кубических циклических системах.

Принцип оценки степени оптимальности размещения показан на рис. 15 и 16.

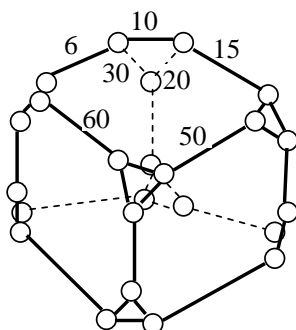


Рис. 15. Принцип оценки степени оптимальности размещения

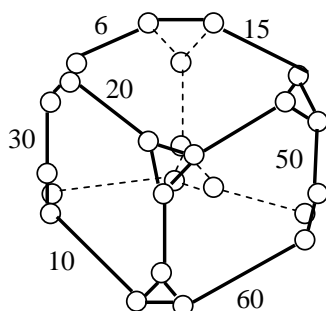


Рис. 16. Принцип оценки степени оптимальности размещения

Из анализа рис. 15 видно, что основная нагрузка в данном случае приходится на верхний слой многопроцессорной кубической циклической системы, что не является оптимальным, так как основной трафик и нагрузка приходится на верхние процессорные модули, тогда как нижние остаются, не задействованы. Качество размещения, представленное на рис. 16 более оптимально, так как нагрузка в данном случае распределена более равномерно.

**Заключение.** В ходе работы было предложено устройство, которое может использоваться в области проектирования ВС, например, при размещении процессов (алгоритмов, задач). Устройство позволяет производить оценку качества размещения в МС по критерию минимизации интенсивности взаимодействия процессов и данных.

Дальнейшим развитием и продолжением предложенных решений может являться их детализация до соответствующих принципиальных электрических схем с потенциальным внедрением в технологическое производство.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Воеводин В.В., Воеводин Вл.В.* Параллельные вычисления. – СПб.: БХВ–Петербург. 2002. – 608 с.
2. *Корнеев В.В.* Параллельные вычислительные системы. – М.: Нолидж. 1999. – 340 с.
3. *Оре О.* Теория графов. – М.: Наука, 1968. – 352 с.
4. Патент РФ №2193796. Устройство для формирования субоптимального размещения и его оценки / *Борзов Д.Б., Зотов И.В., Титов В.С.*; заявл. 29.01.2001; опубл. 27.11.2002, БИ №33. – 14 с.
5. *Борзов Д.Б., Титов В.С.* Параллельные вычислительные системы (архитектура, принципы размещения задач): монография. – Курск: Курск. гос. тех. ун-т., 2009. – 159 с.
6. *Борзов Д.Б., Титов В.С.* Вопросы проектирования и динамической реконфигурации топологии систем логического управления в системах высокой готовности: монография. – Курск: Юго-Запад. гос. ун-т., 2015. – 282 с.
7. *Борзов Д.Б.* Аппаратные средства планирования размещения задач в мультипроцессорных системах критического назначения (теоретические основы): монография. – Курск: Юго-Запад. гос. ун-т., 2018. – 179 с.
8. *Морозов К.К., Одинокоев В.Г., Курейчик В.М.* Автоматизированное проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры: учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1983. – 280 с.
9. *Курейчик В.М., Глушань В.М., Щербаков Л.И.* Комбинаторные аппаратные модели и алгоритмы в САПР. – М.: Радио и связь, 1990. – 216 с.
10. Патент РФ №2275681. Устройство поиска нижней оценки размещения в матричных системах / *Борзов Д.Б.*; заявл. 6.10.2004; опубл. 27.04.2006, БИ №12. – 16 с.
11. *Борзов Д.Б., Аль-Мараят Б.И., Титкин А.П.* Акселератор планирования размещения задач в кластерных вычислительных системах высокой готовности // Известия вузов. Приборостроение. – 2008. – № 2. – С. 29-33.
12. Патент РФ №2356085. Устройство подсчета значения интенсивности размещения в полносвязных матричных системах при направленной передаче информации / *Борзов Д.Б., Бабаскина А.Ю., Ключникова О.Е.*; заявл. 1.10.2007; опубл. 20.05.2009, БИ №14. – 17 с.
13. Патент РФ №2398270. Устройство поиска нижней оценки размещения в полносвязных матричных системах при однонаправленной передаче информации / *Борзов Д.Б.*; заявл. 11.02.2009; опубл. 27.08.2010, БИ 24. – 21 с.
14. Патент РФ №2398270. Устройство поиска нижней оценки размещения в полносвязных матричных системах при однонаправленной передаче информации / *Борзов Д.Б., Чеснокова Е.О.*; заявл. 11.02.2009; опубл. 27.08.2010, БИ 24. – 21 с.
15. Патент РФ №2406135. Устройство поиска нижней оценки размещения в системах с матричной организацией при направленной передаче информации / *Борзов Д.Б., Бобынцев Д.О.*; заявл. 9.02.2009, опубл. 10.12.2010, БИ №34. – 12 с.
16. Патент РФ №2421805, Устройство поиска нижней оценки размещения в полносвязных матричных системах при двунаправленной передаче информации / *Борзов Д.Б., Чеснокова Е.О., Марухленко А.Л., А-А Муджиб Мохаммед Яхья*; заявл. 24.11.2008, опубл. 27.06.2011. – 17 с.
17. Патент на изобретение RU 2688236, Устройство для подсчета минимального значения интенсивности размещения в многопроцессорных кубических циклических системах при однонаправленной передаче информации / *Борзов Д.Б., Масюков И.И., Титенко Е.А.* 21.05.2019. Заявка № 2018120597 от 05.06.2018.
18. Патент РФ №2628329. Устройство для поиска минимального значения интенсивности размещения в тороидальных системах при направленной передаче информации / *Борзов Д.Б., Дюбрюкс С.А.*; заявл. 27.07.2016; опубл. 15.08.2017, БИ №23.
19. Патент РФ №2323467. Устройство оценки качества размещения в системах с матричной организацией / *Борзов Д.Б., Заикина Т.А., Аль-Мараят Б.И., Хасан Н.М.*; заявл. 9.01.2007; опубл. 27.04.2008, БИ №12. – 16 с.
20. Патент РФ №2279709. Устройство для оценки качества размещения в матричных системах / *Борзов Д.Б., Жолобов А.А.*; заявл. 28.03.2005; опубл. 10.07.2008, БИ №19. – 12 с.

REFERENCES

1. *Voevodin V.V., Voevodin V.V.* Parallel'nye vychisleniya [Parallel computing]. St. Petersburg: BKhV–Peterburg. 2002, 608 p.
2. *Korneev V.V.* Parallel'nye vychislitel'nye sistemy [Parallel computing systems]. Moscow: Nolidzh, 1999, 340 p.
3. *Ore O.* Teoriya grafov [Graph Theory]. Moscow: Nauka, 1968, 352 p.
4. *Borzov D.B., Zotov I.V., Titov V.S.* Patent RF №2193796. Ustroystvo dlya formirovaniya suboptimal'nogo razmeshcheniya i ego otsenki [Patent RF No. 2193796. Device for the formation of suboptimal placement and its evaluation]; Appl. 01/29/2001; publ. 11/27/2002, BI No. 33, 14 p.
5. *Borzov D.B., Tiov V.S.* Parallel'nye vychislitel'nye sistemy (arkhitektura, printsipy razmeshcheniya zadach): monografiya [Parallel computing systems (architecture, principles of task placement): monograph]. Kursk: Kurs. gos. tekhn. un-t., 2009, 159 p.
6. *Borzov D.B., Tiov V.S.* Voprosy proektirovaniya i dinamicheskoy rekonfiguratsii topologii sistem logicheskogo upravleniya v sistemakh vysokoy gotovnosti: monografiya [Issues of design and dynamic reconfiguration of the topology of logical control systems in high readiness systems: monograph]. Kursk: Yugo-Zapad.. gos. un-t., 2015, 282 p.
7. *Borzov D.B.* Apparatskiye sredstva planirovaniya razmeshcheniya zadach v mul'tiprotsessornykh sistemakh kriticheskogo naznacheniya (teoreticheskie osnovy): monografiya [Hardware tools for scheduling tasks placement in critical multiprocessor systems (theoretical foundations): monograph]. Kursk: Yugo-Zapad.. gos. un-t., 2018, 179 p.
8. *Morozov K.K., Odinokov V.G., Kureychik V.M.* Avtomatizirovannoe proektirovanie konstruktivnykh radioelektronnykh apparatov: ucheb. posobie dlya vuzov [Computer-aided design of electronic equipment structures: Textbook for universities]. Moscow: Radio i svyaz', 1983, 280 p.
9. *Kureychik V.M., Glushan' V.M., Shcherbakov L.I.* Kombinatornye apparatnye modeli i algoritmy v SAPR [Combinatorial hardware models and algorithms in CAD]. Moscow: Radio i svyaz', 1990, 216 p.
10. *Borzov D.B.* Patent RF №2275681. Ustroystvo poiska nizhney otsenki razmeshcheniya v matrichnykh sistemakh [Device for searching for a lower placement estimate in matrix systems]; Appl. October 6, 2004; publ. 04/27/2006, BI No. 12, 16 s.
11. *Borzov D.B., Al'-Marayat B.I., Tipikin A.P.* Akselerator planirovaniya razmeshcheniya zadach v klasternykh vychislitel'nykh sistemakh vysokoy gotovnosti [Accelerator for task placement scheduling in high-availability cluster computing systems], *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Izvestiya vuzov. Instrumentation], 2008, No. 2, pp. 29-33.
12. *Borozov D.B., Babaskina A.Yu., Klyuchnikova O.E.* Patent RF №2356085. Ustroystvo podscheta znacheniya intensivnosti razmeshcheniya v polnosvyaznykh matrichnykh sistemakh pri napravlennoy peredache informatsii [Patent RF No. 2356085. A device for calculating the value of the placement intensity in fully connected matrix systems during directed information transfer]; Appl. 1.10.2007; publ. 05/20/2009, BI No. 14, 17 p.
13. *Borozov D.B.* Patent RF №2398270. Ustroystvo poiska nizhney otsenki razmeshcheniya v polnosvyaznykh matrichnykh sistemakh pri odnonapravlennoy peredache informatsii [Patent RF No. 2398270. A search device for a lower location estimate in fully connected matrix systems with unidirectional information transfer]; Appl. 02/11/2009; publ. 27.08.2010, BI 24, 21 p.
14. *Borzov D.B., Chesnokova E.O.* Patent RF №2398270. Ustroystvo poiska nizhney otsenki razmeshcheniya v polnosvyaznykh matrichnykh sistemakh pri odnonapravlennoy peredache informatsii [Patent RF No. 2398270. Device for searching for a lower location estimate in fully connected matrix systems with unidirectional information transfer]; Appl. 02/11/2009; publ. 27.08.2010, BI 24, 21 p.
15. *Borzov D.B., Bobyntsev D.O.* Patent RF №2406135. Ustroystvo poiska nizhney otsenki razmeshcheniya v sistemakh s matrichnoy organizatsiey pri napravlennoy peredache informatsii [Patent RF No. 2406135. Device for searching for a lower estimate of placement in systems with a matrix organization in the case of directed transmission of information]; Appl. February 9, 2009, publ. 12/10/2010, BI No. 34, 12 p.
16. *Borzov D.B., Chesnokova E.O., Marukhlenko A.L., A-A Mudzhib Mokhammed YAKH"ya.* Patent RF №2421805, Ustroystvo poiska nizhney otsenki razmeshcheniya v polnosvyaznykh matrichnykh sistemakh pri dvanapravlennoy peredache informatsii [Patent RF No. 2421805. Search device for a lower location estimate in fully connected matrix systems for bidirectional information transfer]; Appl. 11/24/2008, publ. 06/27/2011, 17 p.

17. *Borzov D.B., Masyukov I.I., Titenko E.A.* Patent na izobrenie RU 2688236, Ustroystvo dlya podscheta minimal'nogo znacheniya intensivnosti razmeshcheniya v mnogoprotsessornykh kubicheskikh tsiklicheskikh sistemakh pri odnonapravlennoy peredache informatsii [Patent for invention RU 2688236. A device for calculating the minimum value of the placement intensity in multiprocessor cubic cyclic systems with unidirectional information transfer]. 05/21/2019. Appl. No. 2018120597 dated 06/05/2018.
18. *Borzov D.B., Dyubryuks S.A.* Patent RF №2628329. Ustroystvo dlya poiska minimal'nogo znacheniya intensivnosti razmeshcheniya v toroidal'nykh sistemakh pri napravlennoy peredache informatsii [Patent RF No. 2628329. Device for finding the minimum value of the placement intensity in toroidal systems with directional information transfer]; Appl. 07/27/2016; publ. 08/15/2017, BI No. 23.
19. *Borzov D.B., Zaikina T.A., B.I. Al'-Marayat, Khasan N.M.* Patent RF №2323467. Ustroystvo otsenki kachestva razmeshcheniya v sistemakh s matrichnoy organizatsiey [Patent RF No. 2323467. A device for assessing the quality of placement in systems with a matrix organization.]; Appl. January 9, 2007; publ. 04/27/2008, BI No. 12, 16 p.
20. *Borzov D.B., Zholobov A.A.* Patent RF №2279709. Ustroystvo dlya otsenki kachestva razmeshcheniya v matrichnykh sistemakh [Device for assessing the quality of placement in matrix systems / RF Patent No. 2279709]; Appl. 03/28/2005; publ. 07/10/2008, BI No. 19, 12 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Курейчик.

**Иваненко Кирилл Александрович** – Юго-Западный государственный университет; e-mail: k.iwanenko@gmail.com; г. Курск, Россия; тел.: +89913315455; кафедра вычислительной техники; аспирант.

**Чернецкая Ирина Евгеньевна** – e-mail: white@mail.ru; д.т.н.; доцент; зав. кафедрой вычислительной техники.

**Борзов Дмитрий Борисович** – e-mail: borzovdb@kursknet.ru; д.т.н.; доцент; профессор кафедры вычислительной техники.

**Титов Виталий Семенович** – e-mail: titov-kstu@rambler.ru; д.т.н.; профессор кафедры вычислительной техники.

**Сизов Александр Семенович** – e-mail: as.sizov@yahoo.com; д.т.н.; профессор программной инженерии.

**Ivanenko Kirill Alexandrovich** – South-West State University; e-mail: k.iwanenko@gmail.com; Kursk, Russia; phone: +89913315455the department of computer science; postgraduate.

**Chernetskaya Irina Evgenievna** – e-mail: white@mail.ru; dr. of eng. sc.; associate professor; head of the department of computer science.

**Borzov Dmitry Borisovich** – e-mail: borzovdb@kursknet.ru; dr. of eng. sc.; associate professor; professor of the department of computer science.

**Titov Vitaly Semenovich** – e-mail: titov-kstu@rambler.ru; dr. of eng. sc.; professor of the department of computer science.

**Sizov Alexander Semenovich** – e-mail: as.sizov@yahoo.com; dr. of eng. sc. professor of the department of computer science.