

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

УДК 004.3;519.718.2;519.873;629.78
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-347-358>

Поступила в редакцию 25.10.2018
Received 25.10.2018

Л. И. Кульбак, О. П. Чиж, Н. Н. Парамонов, А. Г. Рымарчук, Т. С. Мартинович

Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ КЛАСТЕРНОЙ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Аннотация. Исследование показателей надежности проводилось на примере кластерной суперкомпьютерной конфигурации «СКИФ-ГЕО-ЦОД РБ» (далее – кластер), разработанной в рамках научно-технической программы Союзного государства «СКИФ-Недра» (2015–2018 гг.). Кластер представляет собой стационарную суперкомпьютерную конфигурацию, предназначенную для решения ресурсоемких прикладных задач в центрах обработки данных (ЦОД). Вычислительные платформы и другие модули кластера располагаются в одной 19" стойке типа APC Netshelter высотой 42U. Теоретическая пиковая производительность кластера – 100 Тфлопс. Приведены базовые архитектурные принципы, реализованные в кластере, состав и структурно-функциональная схема кластера.

Предложено методическое обеспечение расчета надежности кластера, базирующееся на предыдущих исследованиях авторов. Обоснована структурная схема надежности (СН) кластера, состоящая из двух частей – ядра кластера и совокупности вычислительных средств (узлов) (СВС). В ядро кластера и в СВС входят составные части (СЧ), отказы которых приводят к снижению производительности кластера, причем в ядро входят СЧ, отказы которых приводят к снижению производительности кластера до нуля. Обоснован выбор основных показателей надежности ядра кластера и СВС, приведены формулы расчета этих показателей. Проведен анализ последствий отказов комплектующих кластер СЧ. С учетом этого анализа определена СН ядра кластера, позволяющая определить формулу расчета показателей надежности ядра кластера. Предложена математическая модель надежности (граф состояний) СВС кластера и формулы для вычисления средней наработки на отказ и на сбой СВС кластера.

Определена надежность СЧ кластера, для которых отсутствуют достоверные сведения по их надежности, на основании СН этих СЧ. Проведена оценка надежности кластера в целом, основанная на вычислении показателей по справочным данным о надежности компонентов и комплектующих элементов, а также по данным эксплуатации суперкомпьютеров семейства «СКИФ». С учетом этой оценки и полученных расчетных соотношений рассчитаны показатели надежности кластера для двух вариантов (при наличии и отсутствии резерва вычислительных узлов).

Высокие значения показателей надежности кластера были достигнуты благодаря принятым в процессе его разработки архитектурным и структурным решениям, направленным на повышение его живучести. Полученный расчет показателей надежности разработанного кластера позволит определить наиболее эффективные стратегии его эксплуатации, а также подходы к проектированию и применению кластерных суперкомпьютерных конфигураций.

Ключевые слова: кластер, суперкомпьютер, надежность, показатели надежности, расчет надежности, резервирование

Для цитирования: Оценка надежности кластерной суперкомпьютерной конфигурации / Л. И. Кульбак [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2019. – Т. 64, №3. – С. 347–358. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-347-358>

L. I. Kulbak, O. P. Tchij, N. N. Paramonov, A. G. Rymarchuk, T. S. Martinovich

United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

RELIABILITY ASSESSMENT OF CLUSTER SUPERCOMPUTER CONFIGURATION

Abstract. The study of reliability indicators was carried out on the example of a cluster supercomputer configuration of “SKIF-GEO” (further cluster) worked out within the framework of the scientific and technical program “SKIF-Nedra” (2015–2018, Program of the Union State of Russia and Belarus). The cluster is a stationary supercomputer configuration designed to

solve resource-intensive applications in data processing centers (DPC). Computing platforms and other cluster modules are located in the same 19" rack height of 42U. Theoretical peak performance of cluster – 100 Tflop/s. The basic architectural principles implemented in the cluster, the composition and structural-functional scheme of the cluster are given.

A methodological support for calculating the reliability of the cluster, based on previous studies by the authors, is proposed. Taking into account these studies, the structural scheme of reliability (SSR) of the cluster, consisting of two parts – the cluster core and the combination of computing facilities (nodes) (CCF), is substantiated. The component parts (CP) include components of the cluster, the failure of which leads to a decrease in performance to zero. CCF includes CP of cluster, the failures of which lead to a decrease in cluster performance. The choice of the main indicators of the reliability of the cluster core and CCF is grounded and formulas for calculating these indicators are given. The analysis of the consequences of failures of cluster components is made. Taking into account the analysis, the SSR of the cluster core is determined, which allows to derive a formula for calculating the cluster core reliability indicators. A mathematical model of reliability (state graph) of an CCF cluster is proposed, which allows one to derive formulas for calculating the mean time to failure and the mean time for a failure of the CCF of cluster.

An assessment of the reliability of CP cluster, for which there is no reliable information on their reliability, is determined based on the SSR of these CP. An assessment of the reliability of the cluster as a whole, based on the calculation of reliability indicators based on reference data on the reliability of components and components, as well as on data from the operation of supercomputers of family "SKIF" has been carried out. Taking into account this estimation and the calculated ratios obtained, the cluster reliability indicators for two options were calculated (in the presence and absence of a reserve of computing nodes).

High values of cluster reliability indicators were achieved due to the architectural and structural solutions adopted in the process of its development, aimed at increasing its survivability.

Keywords: cluster, supercomputer, reliability, reliability indicators, reliability calculation, reservation

For citation: Kulbak L. I., Tchij O. P., Paramonov N. N., Rymarchuk A. G., Martinovich T. S. Reliability assessment of cluster supercomputer configuration. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 347–358 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-347-358>

Введение. В 2015–2018 гг. Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси принимал участие в выполнении научно-технической программы Союзного государства «СКИФ-Недра», в рамках которой разрабатывалась кластерная суперкомпьютерная конфигурация «СКИФ-ГЕО-ЦОД РБ» (далее – кластер). Данная стационарная суперкомпьютерная конфигурация предназначена для решения ресурсоемких прикладных задач в центрах обработки данных. Нашей задачей было исследование и расчет показателей ее надежности на примере разрабатываемого кластера.

В кластере реализованы следующие базовые архитектурные принципы:

- классическая кластерная архитектура с распределенной памятью;
- организация трех сетей: системной сети InfiniBand для MPI-обменов, сети InfiniBand для файловых операций ввода/вывода и командной (вспомогательной) сети Gigabit Ethernet для оптимизации параллельного выполнения программ;
- использование мультиядерных процессоров архитектуры x86-64;
- применение в вычислительных узлах кластерных конфигураций только тех процессоров, архитектура которых соответствует требованиям технологии OpenCL;
- эксплуатация в структуре кластера двух выделенных управляющих узлов (основного и резервного) для управления вычислениями и подключения пользователей из внешней локальной сети;
- настройка и мониторинг вычислительных узлов (ВУ) кластера в соответствии с протоколами IPMI.

Состав кластера. В кластере реализована работа под управлением ОС типа Linux на основе последних версий дистрибутива Fedora с обновлениями для повышения производительности. Для работы с сетевой средой InfiniBand применяются программные средства проекта OFED – набор ПО с открытым исходным кодом для развертывания и управления сетей InfiniBand. В качестве средств разработки параллельных программ используется связка из стандартных компиляторов дистрибутива Linux (C/C++, Fortran) и библиотеки MPI. Для программных средств пакетной обработки заданий взята свободно распространяемая версия системы пакетной обработки PBS – Torque. В роли планировщика задач применяется свободно распространяемый программный пакет Maui.

Вычислительные платформы и другие модули кластера располагаются в одной стойке типа APC Netshelter шириной 19" и высотой 42U (195,8 см). Теоретическая пиковая производительность составляет 100 Тфлопс.

Состав кластера и его технические характеристики приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Состав кластера «СКИФ-ГЕО-ЦОД РБ»
 T a b l e 1. The composition of the cluster “SKIF-GEO-DPC RB”

Наименование	Количество	Технические характеристики
Платформа вычислительных узлов Supermicro SYS-2029BT-HTR-OTO-48 OPTIMIZED	9 (36 ВУ)	Четыре ВУ на платформе 2U; оперативная память ВУ 8×32 ГБ; каждый ВУ включает два 18-ядерных процессора Intel Xeon Gold 6140 (14 нм, 36 потоков, 2,3 ГГц, турбо 3,7 ГГц, AVX-512, 140 Вт), 2 жестких диска 2,5" 1ТБ SATA; 2 блока питания (БП) – основной и горячий резерв
Платформа управляющего узла (УУ)	1	Один УУ на платформе 1U; УУ включает один 18-ядерный процессор Intel Xeon Gold 6140, оперативную память 6×32 ГБ; 10 жестких дисков 2.5" 1 ТБ SATA; 2 БП – основной и горячий резерв
Коммутатор сети InfiniBand (IB)	2	Коммутатор IB EDR 100 Гбит/с, Mellanox 36 портов MSB7890-E; 2 БП – основной и горячий резерв; резервный вентилятор
Коммутатор сети Gigabit Ethernet (GbE)	1	Коммутатор GbE управляемый с 48 портами D-Link DGS-1510-52X; MTBF – 416789,03 ч
Файловый сервер	1	Supermicro SSG 6028R-TDWNR с адаптерами 100 Гбит/с, 8×4 ТБ; 2 БП – основной и горячий резерв
Распределитель электропитания стоечный	6	Блок розеток
Источник бесперебойного питания (отдельное изделие вне стойки)	1	MGE GALAXY 300, 400 В, 3:3, 30 кВА

Структурно-функциональная схема кластера показана на рис. 1.

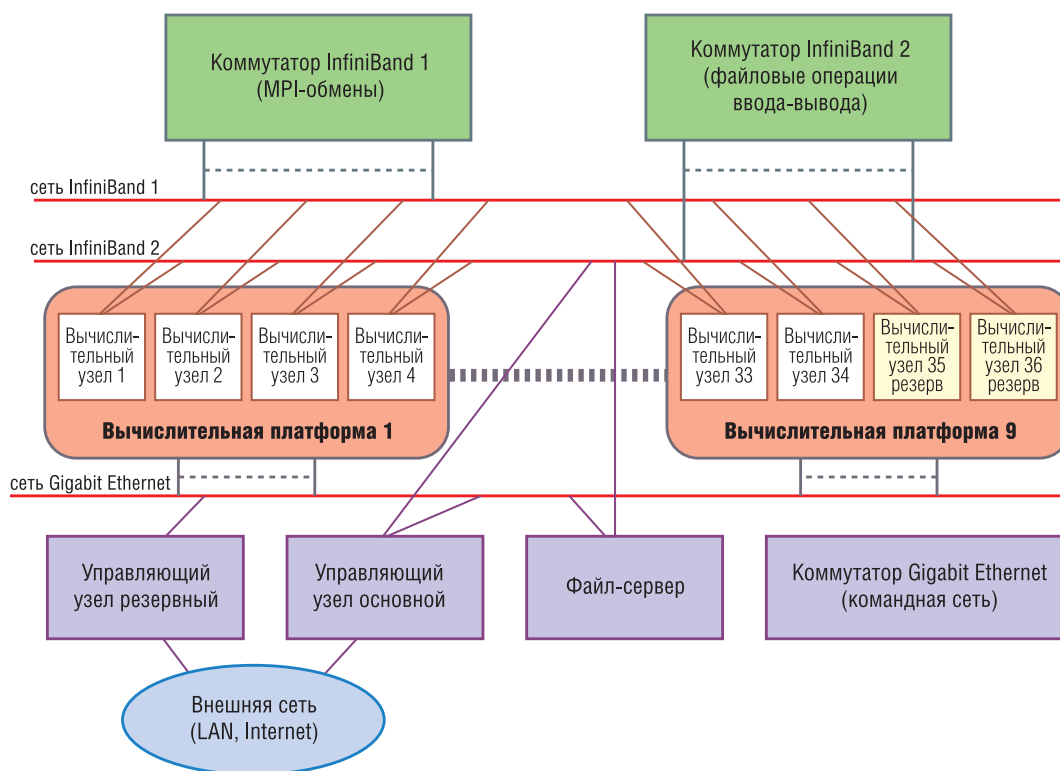


Рис. 1. Структурно-функциональная схема кластера

Fig. 1. Structural and functional scheme of the cluster

Входящие в структуру кластера коммутаторы InfiniBand, принадлежащие различным сетям, взаимозаменяемы. Управляющий узел при необходимости может выполнять функции файл-сервера. При этом управляющие узлы зарезервированы. Непосредственно в работе кластера могут использоваться 34 вычислительных узла, два вычислительных узла находятся в подготовленном резерве.

Методическое обеспечение расчета надежности кластера. Наиболее полное изложение методики оценки надежности кластерных вычислительных систем приведено в [1]. Согласно [1] структурная схема надежности (СН) кластера состоит из двух частей – ядра и совокупности вычислительных средств (узлов) (СВС). В ядро кластера и в СВС входят составные части (СЧ), отказы которых приводят к снижению производительности кластера, причем в ядро входят СЧ, отказы которых приводят к снижению производительности кластера до нуля.

Авторы предлагают в качестве основного показателя кластера использовать коэффициент сохранения эффективности $K_{эф.кластера}$, а как дополнительные показатели надежности – среднюю наработку на отказ $T_{о.кластера}$ и среднюю наработку на сбой $T_{сб.кластера}$. Для определения надежности ядра кластера рекомендуется применять коэффициент готовности $K_{г.я}$, среднюю наработку на отказ $T_{о.я}$ и среднюю наработку на сбой $T_{сб.я}$.

Как основной показатель надежности СВС в [1] определен коэффициент сохранения эффективности $K_{эф.СВС}$, а в качестве дополнительных показателей надежности предлагаются средняя наработка на отказ $T_{о.СВС}$ и средняя наработка на сбой $T_{сб.СВС}$.

Исходя из определений ядра и СВС получаем, что

$$K_{эф.кластера} = \begin{cases} K_{эф.СВС} & \text{– при работоспособном ядре кластера} \\ 0 & \text{– при неработоспособном ядре кластера} \end{cases} \quad (1)$$

Вероятность пребывания ядра кластера в работоспособном состоянии в произвольный момент времени представляет собой коэффициент готовности ядра $K_{г.я}$, следовательно, (1) можно записать в виде

$$K_{эф.кластера} = K_{г.я} K_{эф.СВС}. \quad (2)$$

Наработку на сбой кластера следует вычислять по формуле

$$T_{ср.сб.кластера} = \frac{T_{ср.сб.СВС} T_{ср.сб.я}}{T_{ср.сб.СВС} + T_{ср.сб.я}}, \quad (3)$$

где $T_{ср.сб.кластера}$, $T_{ср.сб.СВС}$ и $T_{ср.сб.я}$ – средняя наработка на сбой кластера, СВС и ядра кластера соответственно.

Анализ надежности кластера, как и любого технического объекта, следует начинать с характеристики последствий отказов комплектующих кластер СЧ (табл. 2).

В результате анализа влияния отказов СЧ кластера на его показатели надежности определена СН ядра кластера (рис. 2).

Интенсивность отказов ядра кластера $\Lambda_{я}$ в соответствии с рис. 2 следует рассчитывать как

$$\Lambda_{я} = \Lambda_{р.пл.УУ} + \Lambda_{р.к.ІВ} + \Lambda_{к.GbE} + \Lambda_{ИБП}, \quad (4)$$

Т а б л и ц а 2. Характеристики последствий отказов СЧ кластера
T a b l e 2. Characteristics of the consequences of failures in the cluster components

СЧ кластера	Последствия отказа
Вычислительный узел	Сбой кластера в случае его участия в расчете. Повреждение в случае не участия в расчете
Вычислительная платформа	Сбой кластера в случае его участия в расчете. Повреждение в случае не участия в расчете
Управляющий узел	Повреждение кластера при отказе одного управляющего узла. Отказ кластера при отказе обоих управляющих узлов
Коммутатор InfiniBand	Сбой кластера при отказе одного коммутатора. Отказ кластера при отказе обоих коммутаторов
Коммутатор Gigabit Ethernet	Отказ кластера
Файловый сервер	Сбой кластера
Источник бесперебойного питания (ИБП)	Отказ кластера
Блок розеток	Отказ кластера

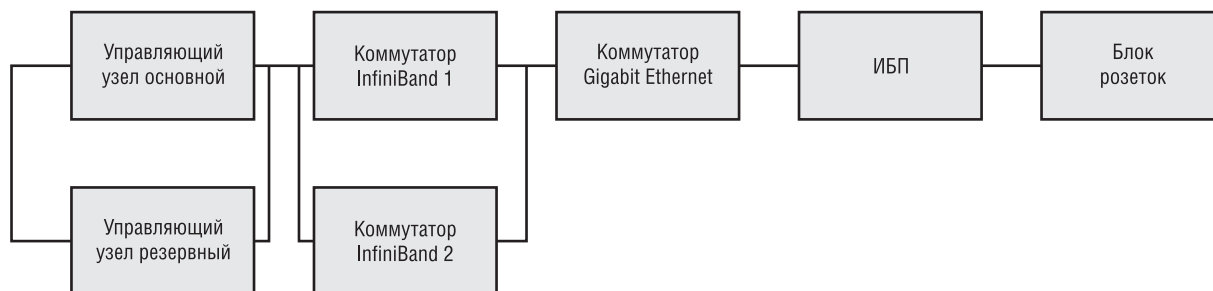


Рис. 2. Структурная схема надежности ядра кластера
 Fig. 2. Structural scheme of the reliability of the cluster core

где $\Lambda_{р.пл.УУ}$, $\Lambda_{р.к.ІВ}$, $\Lambda_{к.ГбЕ}$, $\Lambda_{ИБП}$ – интенсивности отказов резервированной платформы управляющего узла (УУ), резервированного коммутатора InfiniBand, коммутатора Gigabit Ethernet и ИБП кластера соответственно.

Интенсивность отказов резервируемых элементов ССН (платформы УУ и коммутаторов InfiniBand) Λ_p вычисляется следующим образом:

$$\Lambda_p = (T_{o,p})^{-1}, \tag{5}$$

где $T_{o,p}$ – средняя наработка на отказ резервированного элемента ССН, определяемая, согласно [4], по формуле

$$T_{o,p} = (\mu + 2\Lambda_3) / 2\Lambda_3^2, \tag{6}$$

в которой $\mu = 1/T_{в.р}$ – интенсивность восстановления резервированного элемента ССН ($T_{в.р}$ – среднее время восстановления резервированного элемента); Λ_3 – интенсивность отказов элемента из резерва.

Средняя наработка на отказ ядра кластера $T_{o,я}$ определяется как

$$T_{o,я} = 1 / \Lambda_я. \tag{7}$$

Среднее время восстановления ядра кластера $T_{в,я}$ находится по формуле

$$T_{в,я} = T_{o,я} (\Lambda_{р.пл.УУ} T_{в.р.пл.УУ} + \Lambda_{р.к.ІВ} T_{в.р.к.ІВ} + \Lambda_{к.ГбЕ} T_{в.к.ГбЕ} + \Lambda_{ИБП} T_{в.ИБП}), \tag{8}$$

где $T_{в.р.пл.УУ}$, $T_{в.р.к.ІВ}$, $T_{в.к.ГбЕ}$, $T_{в.ИБП}$ – среднее время восстановления резервируемой платформы УУ, резервированного коммутатора InfiniBand, коммутатора Gigabit Ethernet и ИБП кластера соответственно.

Коэффициент готовности ядра равен

$$K_{г,я} = \frac{T_{o,я}}{T_{o,я} + T_{в,я}}. \tag{9}$$

В структурную схему расчета наработки на сбой входят те элементы, отказы которых приводят к сбоям ядра (рис. 3).

В соответствии с рис. 3 средняя наработка на сбой ядра кластера $T_{ср.сб,я}$ будет равна

$$T_{ср.сб,я} = (\Lambda_{пл.УУ} + \Lambda_{к.ІВ} + \Lambda_{ФС})^{-1}, \tag{10}$$

где $\Lambda_{пл.УУ}$, $\Lambda_{к.ІВ}$, $\Lambda_{ФС}$ – интенсивности отказов платформы УУ, коммутатора InfiniBand и файл-сервера (ФС) кластера соответственно.

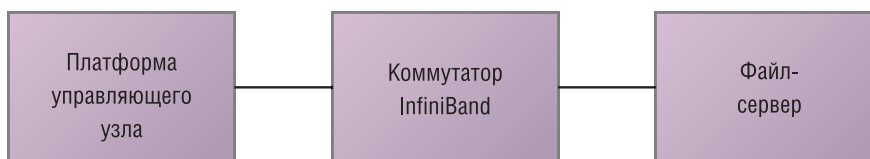


Рис. 3. Структурная схема расчета наработки на сбой ядра кластера
 Fig. 3. Structural scheme for calculating the operating time for the cluster core failure

Математическая модель надежности СВС кластера. Примем для СВС следующую основную стратегию восстановления ВУ: восстановление ВУ в СВС начинается сразу после обнаружения их отказов и осуществляется с использованием резервных ВУ; восстановление резервных ВУ должно осуществляться в течение не более 168 ч; сбой кластера фиксируется лишь тогда, когда ВУ, отказавший в СВС, участвовал в расчете, в противном случае фиксируется повреждение.

Отметим, что состояние СВС меняется при каждом отказе и восстановлении ВУ. Формально граф состояний СВС должен иметь $(N + 1)$ состояний, где N – исходное число ВУ в составе СВС доступных ПО кластера. Реальное время восстановления ВУ выбирается таким, чтобы в СВС накапливалось незначительное (порядка единиц) число неработоспособных ВУ. Примем допустимое число неработоспособных ВУ в составе СВС $n = 2$ и в дальнейшем покажем, что вероятность нахождения СВС в состоянии трех отказавших ВУ очень мала.

Урезанный граф состояний СВС приведен на рис. 4, где S_0 – исходное состояние СВС, когда все ВУ в СВС работоспособны и доступны ПО кластера; S_1, S_2, S_3 – состояния, при котором в СВС находятся соответственно 1, 2 и 3 неработоспособных ВУ; V_0 – интенсивность восстановления ВУ; N – исходное число ВУ в составе СВС доступных ПО кластера; $\Lambda_{ВУ}$ – интенсивность отказов ВУ.

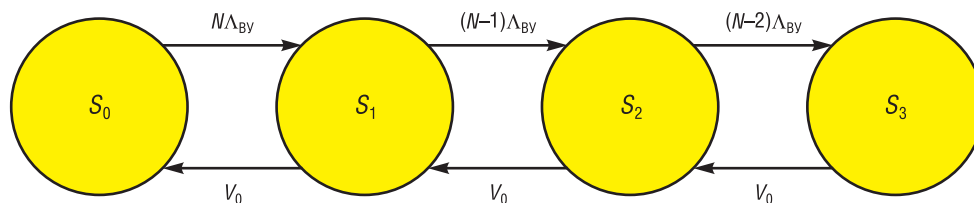


Рис. 4. Урезанный граф состояний совокупности вычислительных средств

Fig. 4. The truncated state graph of the combination of computing facilities

По размеченному графу состояний (рис. 4) можно составить систему уравнений следующего вида:

$$\begin{aligned} N\Lambda_{ВУ}P_0 &= V_0P_1, \\ [V_0 + (N-1)\Lambda_{ВУ}]P_1 &= N\Lambda_{ВУ}P_0 + V_0P_2, \\ [V_0 + (N-2)\Lambda_{ВУ}]P_2 &= (N-1)\Lambda_{ВУ}P_1 + V_0P_3, \\ \sum_{i=0}^3 P_i &= 1, \end{aligned} \quad (11)$$

где P_i – вероятность пребывания СВС в состоянии S_i .

Корнями системы уравнений (11) являются:

$$P_1 = B_1P_0, \quad (12)$$

где

$$B_1 = N\Lambda_{ВУ} / V_0; \quad (13)$$

$$P_2 = B_2P_0, \quad (14)$$

где

$$B_2 = \{N\Lambda_{ВУ}[V_0 + (N-1)\Lambda_{ВУ}]\} / V_0^2; \quad (15)$$

$$P_3 = B_3P_0, \quad (16)$$

где

$$B_3 = \{N\Lambda_{ВУ}[V_0 + (N-1)\Lambda_{ВУ}][V_0 + (N-2)\Lambda_{ВУ} - V_0N][(N-1)\Lambda^2]\} / V_0^3; \quad (17)$$

$$P_0 = [1 + B_1 + B_2 + B_3]^{-1}. \quad (18)$$

Средний коэффициент сохранения эффективности следует рассчитывать по формуле

$$K_{\text{ср.эф.СВС}} = \sum_{i=0}^2 K_{\text{эф.}i} P_i, \quad (19)$$

где $K_{\text{эф.}i}$ – коэффициент сохранения эффективности в i -м состоянии СВС.

$$K_{эф,i} = (N - i) / N, \quad i = 0, 1, 2, \tag{20}$$

$$T_{ср,S_i} = \frac{1}{\sum_{j=0}^i P_j \Lambda_{ВУ}} \sum_{j=0}^i \frac{1}{N - j}, \tag{21}$$

где $T_{ср,S_i}$ – средняя наработка до S_i -го состояния графа СВС.

Если принять в качестве критерия отказа СВС накопление в ее составе более двух отказавших вычислительных узлов $n > 2$, то среднюю наработку на отказ и среднюю наработку на сбой СВС следует вычислять по выражению

$$T_{ср.сб.СВС} = \frac{1}{(P_0 + P_1 + P_2) \Lambda_{ВУ}} \sum_{i=0}^2 \frac{1}{N - i}. \tag{22}$$

Реально допустимо n значительно больше 2, но это приводит к такой средней наработке на отказ, которую можно не учитывать при оценке средней наработки на отказ кластера.

Оценка надежности СЧ кластера, для которых отсутствуют достоверные сведения по их надежности. Вычислительный узел. Анализ графы «Технические характеристики» табл. 1 позволил построить ССН вычислительного узла (рис. 5).

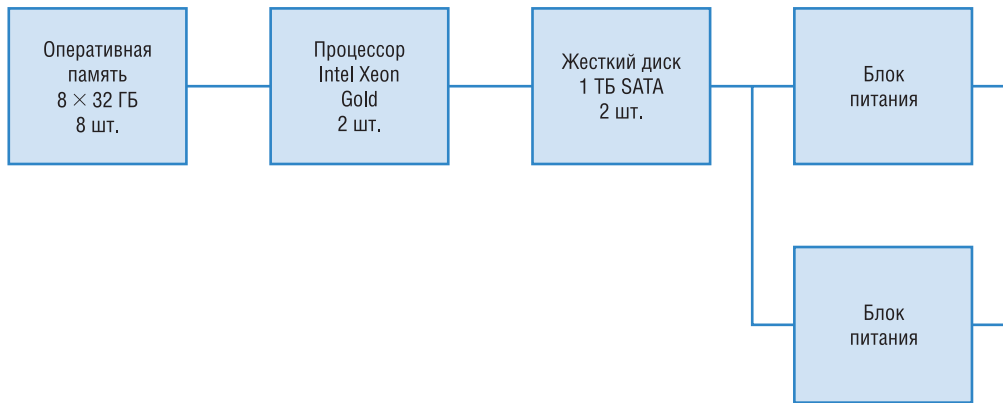


Рис. 5. Структурная схема надежности вычислительных узлов кластера

Fig. 5. Reliability block diagram of the computing nodes of cluster

Интенсивность отказов ВУ $\Lambda_{ВУ}$ в соответствии с ССН (рис. 5) можно определить так:

$$\Lambda_{ВУ} = 8\Lambda_{оп} + 2\Lambda_{пр} + 2\Lambda_{д} + \Lambda_{БП,р}, \tag{23}$$

где $\Lambda_{оп}$, $\Lambda_{пр}$, $\Lambda_{д}$, $\Lambda_{БП,р}$ – интенсивности отказов оперативной памяти, процессора, жесткого диска и резервированного блока питания соответственно, причем последняя рассчитывается как

$$\Lambda_{БП,р} = \frac{2\Lambda_{БП}^2}{\mu_{БП} + 2\Lambda_{БП}}, \tag{24}$$

где $\Lambda_{БП}$ – интенсивность отказов блока питания; $\mu_{БП}$ – интенсивность восстановления резервированного блока питания.

В табл. 3 приведены значения интенсивности отказов комплектующих элементов ССН вычислительных и управляющих узлов.

В результате расчетов, выполненных по формулам (23) и (24) с использованием данных табл. 3 при $\mu_{БП} = 0,006$ 1/ч, получено $\Lambda_{ВУ} = 15,041 \cdot 10^{-6}$ 1/ч.

Т а б л и ц а 3. Интенсивности отказов элементов ССН вычислительных и управляющих узлов

Table 3. Failure rates of elements of the structural diagram of the reliability of computing and control nodes

Составная часть вычислительных узлов	Интенсивность отказов, 10^{-6} 1/ч
Оперативная память 32 ГБ	1,00
Процессор Intel Xeon Gold 6140	1,00
Жесткий диск 1 ТБ SATA	2,50
Блок питания	11,11
Системная плата УУ	3,33

Платформа управляющего узла. В соответствии с табл. 1 ССН платформы управляющего узла примет вид, который изображен на рис. 6.

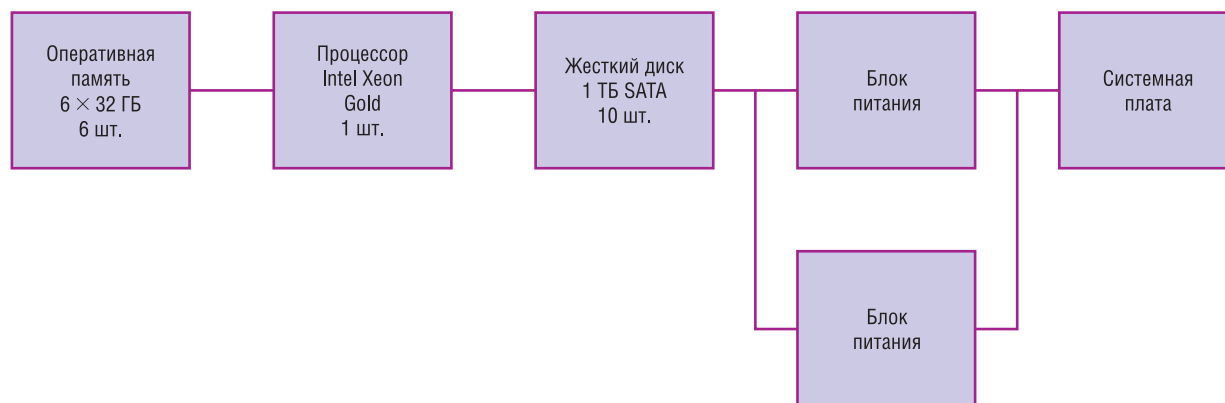


Рис. 6. Структурная схема надежности платформы управляющего узла кластера

Fig. 6. Reliability block diagram of the platform of cluster control node

Согласно ССН на рис. 6 интенсивность отказов платформы управляющего узла $\Lambda_{\text{пл.уу}}$ рассчитывается по формуле

$$\Lambda_{\text{пл.уу}} = \Lambda_{\text{пр}} + 6\Lambda_{\text{оп}} + 10\Lambda_{\text{д}} + \Lambda_{\text{БП.р}} + \Lambda_{\text{СП}}, \quad (25)$$

где $\Lambda_{\text{СП}}$ – интенсивность отказов системной платы (СП).

В результате расчетов, выполненных по формулам (24) и (25) с использованием данных табл. 3 при $\mu_{\text{БП}} = 0,006$ 1/ч, получено $\Lambda_{\text{пл.уу}} = 35,341 \cdot 10^{-6}$ 1/ч.

Оценка надежности кластера в целом. Заметим, что в соответствии с ГОСТ 27.301–95 «Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения» под расчетным методом определения надежности объекта понимается метод, основанный на вычислении показателей надежности по справочным данным о надежности компонентов и комплектующих элементов объекта.

Оценка надежности ядра кластера. В табл. 4 приведены интенсивности отказов элементов ССН ядра кластера.

Произведем расчеты средней наработки на отказ зарезервированных элементов ССН и их интенсивности отказов по формулам (5) и (6). В результате этих расчетов с использованием данных табл. 4 при их среднем времени восстановления $T_{\text{в.р}} = 168$ ч ($\mu = 0,006$ 1/ч), получено:

для резервированной платформы управляющего узла: $T_{\text{о.р.пл.уу}} = 5231385$ ч, $\Lambda_{\text{р.пл.уу}} = 0,1911539 \cdot 10^{-6}$ 1/ч;

Т а б л и ц а 4. Интенсивности отказов элементов ССН ядра кластера

Table 4. Failure rates of elements of the structural diagram of the reliability of the cluster core

СЧ кластера	Интенсивность отказов, 10^{-6} 1/ч	Источник данных
Вычислительный узел	15,04	Расчет
Управляющая узел	35,34	Расчет
Коммутатор InfiniBand	10,00	[4]
Коммутатор Gigabit Ethernet	16,91	По данным эксплуатации СКИФ
Файловый сервер	12,07	[3]
ИБП 30	2,11	По данным эксплуатации СКИФ
Блок розеток	7,03	По данным эксплуатации СКИФ

для резервированных коммутаторов InfiniBand: $T_{\text{о.р.к.ИВ}} = 40 \cdot 10^6$ ч, $\Lambda_{\text{р.к.ИВ}} = 0,025 \cdot 10^{-6}$ 1/ч.

В соответствии с ССН ядра кластера (см. рис. 2) в табл. 5 приведен расчет надежности ядра кластера при условии среднего времени восстановления элементов ССН 24 ч.

Ядро кластера имеет по расчету следующие значения показателей надежности:

интенсивность отказов $\Lambda_{\text{я}} = 26,266 \cdot 10^{-6}$ 1/ч;
средняя наработка на отказ $T_{\text{о.я}} = 38072$ ч;
коэффициент готовности $K_{\text{г.я}} = 0,999371$.

Средняя наработка на сбой ядра кластера при расчете по формуле (10) составляет 17418 ч, или 2 года.

Т а б л и ц а 5. Ядро кластера. Количественные значения показателей надежности

Table 5. The cluster core. Reliability calculation

Наименование элемента ССН	Интенсивность отказов, 10^{-6} 1/ч	Средняя наработка на отказ, ч	Условная вероятность отказа
Зарезервированный коммутатор InfiniBand	0,025	$40 \cdot 10^6$	0,00095
Коммутатор Gigabit Ethernet	16,91	416 667	0,64380
Зарезервированная платформа УУ	0,191	5 231 385	0,00858
Источник бесперебойного питания	2,110	473 934	0,09476
Блок розеток	7,03	229 084	0,31573

Оценка надежности СВС кластера. Оценку надежности СВС выполним для двух вариантов: вариант А1 – наличие восстанавливаемого резерва ВУ; вариант А2 – отсутствие резерва ВУ.

Для оценки показателей надежности СВС принимаются следующие значения переменных, используемых в формулах расчета показателей надежности СВС:

исходное количество ВУ в СВУ $N = 34$;

интенсивность отказов ВУ $\Lambda_{ВУ}$ равна $15,04 \cdot 10^{-6}$ 1/ч;

среднее время восстановления отказавшего ВУ с учетом наличия резервных ВУ $T_{в,ВУ} = 1$ ч (в связи с наличием подготовленного резерва);

интенсивность восстановления ВУ с учетом наличия резервных ВУ $V_0 = 1/T_{в,ВУ} = 1,0$ 1/ч.

среднее время восстановления отказавшего ВУ без учета наличия резервных ВУ $T_{в,ВУ} = 168$ ч (в связи с отсутствием резерва);

интенсивность восстановления отказавшего ВУ без учета наличия резервных ВУ $V_0 = 1/T_{в,ВУ} = 0,00595$ 1/ч.

С учетом принятых данных для варианта А1 (наличие восстанавливаемого резерва ВУ) по формулам (12)–(22) получены следующие результаты:

$$B_1 = 5,1136 \cdot 10^{-4}; B_2 = 2,538 \cdot 10^{-7}; B_3 = 1,2215 \cdot 10^{-10};$$

$$P_1 = 5,111 \cdot 10^{-4}; P_2 = 2,5367 \cdot 10^{-7}; P_3 = 1,2209 \cdot 10^{-10}; P_0 = 0,999489;$$

$$K_{ср.эф.СВС} = 0,999985; T_{сб.СВС} = 193\,601 \text{ ч} = 22,1 \text{ года.}$$

Для варианта А2 (отсутствие резерва ВУ) результаты следующие:

$$B_1 = 8,5908 \cdot 10^{-2}; B_2 = 7,1632 \cdot 10^{-3}; B_3 = 5,7918 \cdot 10^{-4};$$

$$P_1 = 7,8552 \cdot 10^{-2}; P_2 = 6,5498 \cdot 10^{-3}; P_3 = 5,2959 \cdot 10^{-4}; P_0 = 0,914369;$$

$$K_{ср.эф.СВС} = 0,996775; T_{сб.СВС} = 10\,846 \text{ ч} = 1,24 \text{ года.}$$

Расчет надежности кластера в целом. В соответствии с формулами (2), (7) и (3) получены значения показателей надежности кластера для варианта А1:

$$K_{ср.эф.кластера} = K_{г.я} K_{ср.эф.СВС} = 0,999371 \cdot 0,999985 = 0,999356;$$

$$T_{о.кластера} = T_{о.я} = 38\,072 \text{ ч} = 4,35 \text{ года};$$

$$T_{сб.кластера} = 15\,980 \text{ ч} = 1,82 \text{ года.}$$

Для варианта А2:

$$K_{ср.эф.кластера} = K_{г.я} K_{ср.эф.СВС} = 0,999371 \cdot 0,996775 = 0,996148;$$

$$T_{о.кластера} = T_{о.я} = 38\,072 \text{ ч} = 4,35 \text{ года};$$

$$T_{сб.кластера} = 6684 \text{ ч} = 0,76 \text{ года.}$$

Оценка эффекта использования резерва вычислительных узлов. Рассмотрим два варианта использования резервных элементов ВУ. Вариант 1 – резервные ВУ не подлежат восстановлению и используются до их израсходования. Вариант 2 – резервные ВУ восстанавливаются и в течение всего срока службы кластера используются.

Для решения этого вопроса представляется целесообразным СВС представить моделью надежности в виде резервированной системы с замещением, основными элементами которой (системы) является вся совокупность ВУ в СВС, зарезервированных двумя ненагруженными ВУ. В данном случае значение средней наработки на отказ этой системы будет характеризовать эффект от использования соответствующего варианта резервирования ВУ.

Среднюю наработку до отказа $T_{o,CBC}$ такой системы, согласно [4], для варианта 1 резервирования следует проводить по формуле

$$T_{o,CBC} = 1 / N\Lambda_{ВУ}, \tag{26}$$

а для варианта 2 резервирования в следующем виде:

$$T_{o,CBC} = 1 / (N^3 \Lambda_{ВУ}^3 T_{в,р}^2), \tag{27}$$

где $T_{в,р}$ – среднее время восстановления резервного ВУ.

В результате вычислений по (26) средняя наработка до отказа СВС при варианте 1 резервирования СВС составляет $T_{o,CBC} = 1957 \text{ ч} = 0,22 \text{ года}$; по формуле (27) средняя наработка до отказа СВС при варианте 2 резервирования – $T_{o,CBC} = 264972 \text{ ч} = 30,2 \text{ года}$.

Из приведенных результатов расчетов средней наработки до отказа СВС следует, что вариант 2 использования резерва ВУ является гораздо эффективнее.

Оценка использования варианта восстановления СВС при достижении потенциальной производительности кластера до уровня ниже допустимого (допущение временной деградации кластера). В [5] рассматривался вариант восстановления СВС кластера только после снижения потенциальной производительности до установленного уровня.

Рассмотрим этот вариант на исследуемом кластере. Согласно [5] средняя наработка СВС между восстановлениями ВУ $T_{в,CBC}$ должна вычисляться по формуле

$$T_{в,CBC} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} 1 / (N - i)}{\Lambda_{ВУ}}, \quad i = 0, 1, \dots, n - 1, \tag{28}$$

где n – допустимое количество отказавших вычислительных узлов в составе СВС (допустимый уровень снижения производительности СВС).

Расчеты по формуле (28) позволили сформировать параметры допустимой деградации СВС (табл. 6).

Т а б л и ц а 6. **Параметры допустимой деградации СВС**

Table 6. **Parameters of allowable degradation of a set of computing facilities**

n	$K_{эф,CBC}$	$T_{в,CBC}$, год
6	0,824	1,12
12	0,647	3,24
17	0,500	5,15
24	0,294	9,02
26	0,235	10,63

Из табл. 6 следует, что если допустить восстановление СВС только после накопления в нем шести неработоспособных ВУ, то это произойдет через 1,12 года, при этом потенциальная производительность СВС снизится до значения 0,824.

Таким образом, при принятых следующих исходных данных:

номинальное количество вычислительных узлов в СВС – $N = 34$;

два варианта восстановления ВУ: наличие восстанавливаемого резерва ВУ в СВС со средним временем восстановления 1 ч при среднем времени восстановления резервных ВУ 168 ч (вариант 1); отсутствие резерва ВУ

при среднем времени восстановления ВУ в СВС 168 ч (вариант 2);

среднее время восстановления ядра кластера – 24 ч,

а также данных по интенсивностям отказов комплектующих кластер элементов (см. табл. 3), выполнен расчет показателей надежности кластера, результаты которого приведены в табл. 7.

Т а б л и ц а 7. **Расчетные значения показателей надежности кластера**

Table 7. **The calculated values of the cluster reliability indicators**

Вариант восстановления вычислительных узлов	$K_{ср,эф,кластера}$	$T_{o,кластера}$, год	$T_{сб,кластера}$, год
Вариант 1	0,999356	4,35	1,82
Вариант 2	0,996148	4,35	0,76

Заклучение. Высокие значения показателей надежности кластера были достигнуты благодаря принятым в процессе его разработки архитектурным и структурным решениям, направленным на повышение его надежности, таким как:

- параллельная вычислительная кластерная среда, которая позволяет сохранить работоспособность кластера при отказе определенного количества вычислительных узлов;
- наличие двух восстанавливаемых резервных вычислительных узлов, двух сетей ИВ с взаимозаменяемыми коммутаторами, третьей (командной) сети GbE, резервного управляющего узла;
- резервирование источников питания вычислительных узлов;
- возможность использования управляющего узла в качестве файл-сервера;
- мониторинг работоспособности кластера.

В процессе исследований произведена также оценка использования кластера с допущением временной деградации его производительности. Выполнена оценка наработки на отказ СВС при критерии отказа только одного ВУ в СВС для случая израсходования двух резервных ВУ (случай 1) и применении восстанавливаемого резерва в течение срока использования кластера (случай 2). Для первого случая средняя наработка СВС составила 0,22 года, для второго случая – 30,2 года. Из приведенных результатов расчетов следует, что применение стратегии с восстанавливаемым резервом ВУ, используемым в течение всего срока службы кластера, является более эффективным.

Полученный расчет показателей надежности разработанного кластера позволит определить наиболее эффективные стратегии его эксплуатации, а также подходы к проектированию и применению кластерных суперкомпьютерных конфигураций.

Благодарности

Работа выполнена в рамках научно-технической программы «Исследования и разработка высокопроизводительных информационно-вычислительных технологий для увеличения и эффективного использования ресурсного потенциала углеводородного сырья Союзного государства» («СКИФ-Недра») (проект 2.1.1.1).

Acknowledgments

This work was carried out as part of the Scientific and Technical Program “Research and development of high-performance information and computing technologies to increase and efficiently use the resource potential of the hydrocarbon raw materials of the Union State” (“SKIF-Nedra”) (Project 2.1.1.1).

Список использованных источников

1. Анищенко, В.В. Модели надежности кластерных вычислительных систем / В.В. Анищенко, Л.И. Кульбак, Т.С. Мартинович // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2008. – № 1. – С. 89–99.
2. Cisco SFS M7000E InfiniBand Blade Switch for Dell M1000E [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/sfs-m7000e-infiniband-switch/> – С. 38–45. – Дата доступа: 11.01.2018
3. Сравнение кластера надежности и «обычного» сервера [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.team.ru/server/stbl_compare.shtml – Дата доступа: 24.08.2018
4. Козлов, Б.А. Краткий справочник по расчету надежности радиоэлектронной аппаратуры / Б.А. Козлов, И.А. Ушаков. – М.: Совет. радио, 1975. – 472 с.
5. Анищенко, В.В. Выбор стратегии восстановления работоспособности кластерной вычислительной системы / В.В. Анищенко, Л.И. Кульбак, Т.С. Мартинович // Информатика. – 2007. – № 1 (13). – С. 114–122.

References

1. Anishchenko V. V., Kulbak L. I., Martinovich T.S. Reliability models of cluster computing systems. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2008, no. 1, pp. 89–99 (in Russian).
2. Cisco SFS M7000E InfiniBand Blade Switch for Dell M1000E. Available at: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/sfs-m7000e-infiniband-switch> (accessed 11 January 2018).
3. *Comparing the reliability cluster and the normal server*. Available at: http://www.team.ru/server/stbl_compare.shtml (accessed 24 August 2018).
4. Kozlov B. A., Ushakov I. A. *A Short Guide to Calculating the Reliability of Electronic Equipment*. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1975. 472 p. (in Russian).
5. Anishchenko V. V., Kulbak L. I., Martinovich T.S. Strategy choice of working capacity restoration for cluster computer systems. *Informatika = Informatics*, 2007, no. 1 (13), pp. 114–122 (in Russian).

Информация об авторах

Кульбак Леонид Игоревич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lkulbak@yandex.ru

Чиж Олег Петрович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией высокопроизводительных систем, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: otchij@newman.bas-net.by

Парамонов Николай Николаевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nick@newman.bas-net.by

Рымарчук Александр Григорьевич – главный конструктор проекта, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rymarchuk@newman.bas-net.by

Мартиневич Татьяна Сергеевна – научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: martintan@newman.bas-net.by

Information about the authors

Leonid I. Kulbak – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lkulbak@yandex.ru

Oleg P. Tchij – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory of High-Performance Systems, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: otchij@newman.bas-net.by

Nikolaj N. Paramonov – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nick@newman.bas-net.by

Aleksandr G. Rymarchuk – Chief Designer of the project, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rymarchuk@newman.bas-net.by

Tatyana S. Martinovich – Researcher, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: martintan@newman.bas-net.by