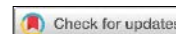


ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ И НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ

INFORMATION PROTECTION AND SYSTEM RELIABILITY



УДК 004.3; 519.718.2; 519.873; 629.78
<https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-2-48-57>

Оригинальная статья
Original Paper

Исследование надежности аппаратной части офисного кластера

Т. С. Мартинович[✉], Н. Н. Парамонов, А. Г. Рымарчук, О. П. Чиж

Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси,
ул. Сурганова, 6, Минск, 220012, Беларусь
[✉]E-mail: martintan@newman.bas-net.by

Аннотация. Исследование показателей надежности аппаратной части офисного суперкомпьютера проводилось на примере кластера СКИФ-ГЕО-Офис РБ, разработанного в рамках научно-технической программы Союзного государства «СКИФ-НЕДРА» (2015–2018 гг.). Компоненты кластера расположены в малогабаритной стойке на базе корпуса типа Full Tower «Aerocool Expredator Black».

Приводятся реализованные в кластере базовые архитектурные принципы, его состав и структурно-функциональная схема. Предлагается методическое обеспечение расчета надежности кластера с учетом предыдущих исследований авторов, обосновывается его структурная схема надежности. Даются формулы расчета основных показателей надежности ядра и совокупности вычислительных средств (СВС) кластера, анализируются последствия отказов его комплектующих.

Предлагается математическая модель надежности (граф состояний) СВС кластера, позволяющая получать формулы для вычисления средней наработки на отказ и на сбой СВС. Оценивается надежность кластера в целом по справочным данным о надежности его комплектующих и по данным эксплуатации суперкомпьютеров семейства СКИФ, вычисляются показатели надежности кластера.

Ключевые слова: офисный кластер, показатели надежности, расчет надежности, структурная схема надежности, семейство СКИФ, кластер СКИФ-ГЕО-Офис РБ

Для цитирования. Исследование надежности аппаратной части офисного кластера / Т. С. Мартинович [и др.] // Информатика. – 2021. – Т. 18, № 2. – С. 48–57. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-2-48-57>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию | Received 29.07.2020
Подписана в печать | Accepted 21.12.2020
Опубликована | Published 26.03.2021

The study of the reliability of the hardware part of the office cluster

T. S. Martinovich[✉], N. N. Paramonov, A. G. Rymarchuk, O. P. Tchij

*The United Institute of Informatics Problems
of the National Academy of Sciences of Belarus,
st. Surganova, 6, Minsk, 220012, Belarus
✉E-mail: martintan@newman.bas-net.by*

Abstract. The study of measures of reliability of the hardware part of the office cluster was carried out on the example of the cluster SKIF-GEO-Office RB (further as “cluster”) developed within the framework of scientific and technical program "SKIF-NEDRA" (2015–2018, Program of the Union State of Russia and Belarus). The cluster components are located in a small rack on the basis of full Tower "Aerocool Expredator Black" type case.

The basic architectural principles implemented in the cluster, the composition, structural and functional scheme of the cluster are given. The methodological support for calculating the reliability of the cluster, based on previous studies of the authors, and its structural scheme of reliability is justified. The choice of the main measures of reliability of the cluster core and the set of computing facilities is justified and formulas of calculation of these measures are given. The analysis of the consequences of failures of component parts of the cluster is carried out.

A mathematical model of reliability (state graph) of the set of computing facilities of cluster is proposed, which allows to derive formulas for calculating the average value of the time-to-failure and time-to-interruption of cluster. The estimation of the reliability of the cluster as a whole, based on the calculation of measures of reliability on the reference data on the reliability of components as well as on the operation of supercomputers of the family SKIF. The measures of reliability of the cluster are calculated.

Keywords: office cluster, measure of reliability, reliability calculation, structural scheme of reliability, family SKIF, cluster SKIF-GEO-Office RB

For citation. Martinovich T. S., Paramonov N. N., Rymarchuk A. G., Tchij O. P. The study of the reliability of the hardware part of the office cluster. *Informatics*, 2021, vol. 18, no. 2, pp. 48–57 (In Russ.). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-2-48-57>

Conflict of interest. The author declare of no conflict of interest.

Введение. В рамках выполнения научно-технической программы Союзного государства «СКИФ-Недра» (2015–2018) [1] проводились исследования по разработке различных кластерных суперкомпьютерных конфигураций, в том числе кластера СКИФ-ГЕО-Офис РБ, предназначенного для установки в отраслевых структурных подразделениях и обладающего небольшими габаритами, весом, энергопотреблением и уровнем акустических шумов. Разработанный в результате кластер может применяться как для самостоятельного выполнения офисных научных расчетов, автоматизированного проектирования, обработки массивов данных, так и для разработки программ, подготовки данных и проведения предварительных расчетов в качестве дополнения к мощным высокопроизводительным кластерным системам.

При создании кластера были использованы следующие базовые принципы [2]:

- классическая кластерная архитектура с распределенной памятью;
- работа под управлением операционной системы (ОС) типа Linux;
- организация единой сети кластера Gigabit Ethernet (GbE), реализующей функции системной и вспомогательной сетей для MPI-обменов, файловых операций ввода-вывода и оптимизации параллельного выполнения программ;
- реализация гибридных вычислительных узлов (ВУ) на базе чипов, в которых интегрированы ядра, и традиционных (классических) процессоров архитектуры x86-64 и GPU – гибридных процессоров APU (Accelerated Processing Unit);
- реализация ВУ кластера на базе компактных компьютерных комплектов типа NUC;

– применение в структуре кластера одного выделенного управляющего узла, выполняющего функции управления вычислениями и подключения пользователей из локальной сети структурного подразделения (офиса), а также функции файл-сервера;

– применение в системе охлаждения кластера отечественных тепловых трубок и радиаторов для отвода тепла от процессоров.

В настоящей статье рассматривается задача исследования и расчета показателей надежности аппаратной части офисного суперкомпьютера на примере кластера СКИФ-ГЕО-Офис РБ.

Компоненты кластера СКИФ-ГЕО-Офис РБ. Составляющие кластера расположены в малогабаритной стойке на базе корпуса типа Full Tower «Aerocool Expredator Black», габариты изделия 620×232×605 мм, масса 36 кг. Интегральная пиковая производительность кластера при выполнении операций с плавающей точкой с двойной точностью составляет 18 Тфлопс [3].

Работа кластера организована под управлением ОС Linux на основе последних версий дистрибутива Fedora с обновлениями для повышения производительности. Средством разработки параллельных программ является связка из стандартных компиляторов дистрибутива Linux (C/C++, Fortran) и библиотеки MPI. В качестве программных средств пакетной обработки заданий используется свободно распространяемая версия системы пакетной обработки PBS Torque. Планировщик задач – свободно распространяемый программный пакет Maui.

В состав кластера СКИФ-ГЕО-Офис РБ входят:

– девять ВУ Intel NUC7i7BNH, Intel Core i7-7567U Processor (3.5/4.0 GHz, Dual Core/HT с расширением набора команд SSE 4.1/4.2, AVX 2.0, 4 MB Cache, 28 Вт), iGPU Intel Iris Graphics 540 (300–950 MHz), 32 GB (2×16) DDR4, 512 GB Samsung SSD, интерфейсы Gigabit Ethernet, M.2, USB 3.0, SATA;

– управляющий узел Intel NUC7i7BNH, Intel Core i7-7567U Processor (3.5/4.0 GHz, Dual Core/HT с расширением набора команд SSE 4.1/4.2, AVX 2.0, 4 MB Cache, 28 Вт), iGPU Intel Iris Graphics 540 (300–950 MHz), 32 GB (2×16) DDR4, 1.2 TB Intel SSD, интерфейсы Gigabit Ethernet, M.2, USB 3.0, SATA;

– коммутатор Gigabit Ethernet Zyxel GS-1100-16;

– корпус Full Tower «Aerocool Expredator Black»;

– 10 блоков питания ВУ и управляющего узла по 65 Вт каждый;

– блок питания вентиляторов и индикации PD-45A;

– 12 патч-кордов 5Е;

– 10 радиаторов с запрессованными тепловыми трубками.

Структурно-функциональная схема кластера показана на рис. 1, где УУ – управляющий узел, БП – блок питания вычислительного (управляющего) узла, АД – адаптер сетевой.

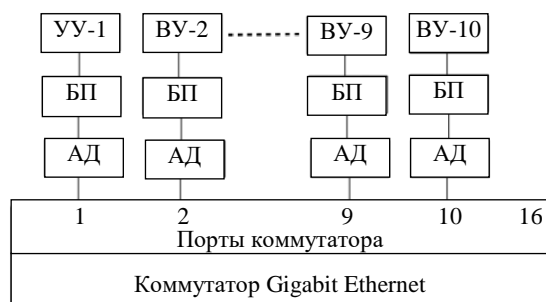


Рис. 1. Схема кластера СКИФ-ГЕО-Офис РБ [1]

Методическое обеспечение расчетов надежности кластера. Расчет показателей надежности кластера СКИФ-ГЕО-Офис РБ выполнен по методике оценки надежности кластерных вычислительных систем, предложенной канд. техн. наук, доцентом Л. И. Кульбаком [4]. Согласно

этой методике схема надежности кластера состоит из двух структурных частей – ядра кластера и СВС (узлов). Отказы составных частей СВС приводят к снижению производительности кластера, а отказы частей ядра – к снижению до нуля.

Согласно [4] в качестве основных и дополнительных показателей надежности выберем показатели, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Показатели надежности кластера СКИФ-ГЕО-Офис РБ и его составных частей

Показатели надежности	Кластер в целом	Ядро кластера	СВС
Основной	Коэффициент сохранения эффективности, $K_{\text{эф.кластера}}$	Коэффициент готовности, $K_{\text{г.я}}$	Коэффициент сохранения эффективности (потенциальной производительности), $K_{\text{эф.СВС}}$
Дополнительный 1	Средняя наработка на отказ, $T_{\text{о.кластера}}$	Средняя наработка на отказ, $T_{\text{о.я}}$	Средняя наработка на отказ, $T_{\text{о.СВС}}$
Дополнительный 2	Средняя наработка на сбой, $T_{\text{сб.кластера}}$	Среднее время восстановления, $T_{\text{в.я}}$	Средняя наработка на сбой, $T_{\text{сб.СВС}}$

Отличительной характеристикой кластера является параллельное участие в вычислительном процессе большого количества ВУ. Исключение из вычислительного процесса одного или нескольких узлов не препятствует продолжению использования кластера по назначению, а лишь снижает его производительность.

Под потенциальной (пиковой) производительностью кластера будем понимать производительность, которая достигается при работе всех узлов кластера. По мере уменьшения количества работоспособных ВУ коэффициент сохранения эффективности кластера падает.

Пороговое (допустимое) уменьшение количества работоспособных ВУ в основном зависит от специфики конкретной прикладной задачи, выполняемой пользователем. В частности, если для решения прикладной задачи требуется определенное количество ВУ, то выход из строя нескольких ВУ кластера, не участвующих в вычислительном процессе, не оказывает влияния на эффективность ее выполнения. Если произошел отказ ВУ, задействованного в вычислительном процессе, то, как правило, прекращается расчет задачи. В результате определенных действий оператора происходит реконфигурация системы и выполнение задачи пользователя начинается заново. Такое событие в соответствии с ГОСТ 27.002–2015 «Надежность в технике. Термины и определения» называется сбоем. Критерием сбоя кластера является такое событие, когда получен неверный результат в задаче пользователя (теста) или произошло незапланированное прерывание вычислительного процесса и для устранения последствий достаточно провести повторные действия оператора, не требующие замены технических средств или настройки регулировок. При отказе кластера для восстановления его работоспособности необходимо осуществить ремонт или замену отказавшего оборудования.

С учетом вышеизложенного получим равенство

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

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

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

Средняя наработка на сбой кластера будет равна средней наработке на сбой СВС:

$$T_{\text{ср.сб.кластера}} = T_{\text{ср.сб.СВС}} \quad (3)$$

Оценку показателей надежности кластера следует начинать с оценки влияния отказов его составных частей на коэффициент сохранения эффективности $K_{\text{эф.кластера}}$.

В табл. 2 приведены составные части кластера, влияние их отказов на потенциальную производительность и способы восстановления работоспособности кластера.

Таблица 2

Способы восстановления работоспособности кластера при отказах его составных частей

Составные части кластера	Ущерб от отказа	Способ восстановления
ВУ	Сбой кластера	Реконфигурация
Управляющий узел	Отказ кластера	Замена на другой управляющий узел
Коммутатор сети (общая часть всех портов коммутатора)		Замена на другой коммутатор сети
Узел связи с ВУ (порт коммутатора, адаптер сети с кабелем)	Сбой кластера	Реконфигурация
Вентилятор	Повреждение	Текущее восстановление
Блок питания вентиляторов и индикации		
Радиаторы с запрессованными тепловыми трубками		
Корпус Full Tower «Aerocool Expredator Black»		
Патч-корд 5Е		

В результате анализа влияния отказов составных частей кластера на его показатели надежности определена структурная схема надежности (ССН) ядра кластера (рис. 2).



Рис. 2. ССН ядра кластера

Таким образом, верно равенство

$$\Lambda_{\text{я}} = \Lambda_{\text{уу}} + \Lambda_{\text{к.оч}},$$

где $\Lambda_{\text{я}}$, $\Lambda_{\text{уу}}$, $\Lambda_{\text{к.оч}}$ – интенсивности отказов ядра, управляющего узла и общей части (без учета портов) коммутатора кластера соответственно.

Среднюю наработку на отказ ($T_{\text{о.я}}$) и коэффициент готовности ($K_{\text{г.я}}$) ядра кластера представим отношениями

$$T_{\text{о.я}} = 1 / \Lambda_{\text{я}}, \quad K_{\text{г.я}} = T_{\text{о.я}} / (T_{\text{о.я}} + T_{\text{в.я}}),$$

где $T_{\text{в.я}}$ – среднее время восстановления ядра кластера.

Управляющий узел кластера, по сути, представляет собой ВУ кластера, предназначенный для выполнения дополнительных функций. С учетом этого рассмотрим ССН ВУ на рис. 3 и применим результаты расчетов его надежности к управляющему узлу.



Рис. 3. ССН ВУ кластера

Согласно ССН ВУ интенсивность отказов вычислительного (управляющего) узла кластера ($\Lambda_{\text{ВУ}}$) определена выражением

$$\Lambda_{\text{ВУ}} = \Lambda_{\text{пр}} + \Lambda_{\text{б.п}} + \Lambda_{\text{с.а}} + \Lambda_{\text{п.к}},$$

где $\Lambda_{\text{пр}}$, $\Lambda_{\text{б.п}}$, $\Lambda_{\text{с.а}}$ и $\Lambda_{\text{п.к}}$ – интенсивности отказов процессора, блока питания ВУ кластера, сетевого адаптера и порта коммутатора с кабелем соответственно.

Среднюю наработку на отказ ВУ кластера получаем по формуле

$$T_{\text{о.ВУ}} = 1 / \Lambda_{\text{ВУ}}.$$

Определяем среднее время восстановления ядра кластера:

$$T_{\text{в.я}} = T_{\text{о.я}} (\Lambda_{\text{уу}} T_{\text{в.уу}} + \Lambda_{\text{к.оч}} T_{\text{в.к.оч}}),$$

где $T_{\text{в.уу}}$ и $T_{\text{в.к.оч}}$ – среднее время восстановления управляющего узла кластера и общей части коммутатора соответственно.

Математическая модель надежности СВС кластера. Для оценки показателей надежности СВС предлагается использовать ее модель состояний в процессе эксплуатации. Модель состояний СВС графически выглядит в виде ориентированного размеченного графа, узлами которого являются состояния объекта в процессе его эксплуатации, ориентированные ребра изображают пути перехода из одного состояния в другое, а разметка ребер показывает интенсивности переходов. Допустим, что процесс изменения состояний СВС при ее эксплуатации является дискретным марковским процессом с конечным числом состояний и непрерывным временем, а потоки перехода СВС в другие состояния являются простейшими, т. е. имеют показательное распределение.

Обозначим множество состояний СВС W и разделим его на два непересекающихся подмножества: $W_{\text{РС}}$ – состояния СВС с принятой в качестве допустимой производительностью СВС, $W_{\text{НРС}}$ – состояния СВС с принятой в качестве недопустимой производительностью СВС. Выделим из множества $W_{\text{РС}}$ подмножество состояний, из которых возможен непосредственный переход в множество $W_{\text{НРС}}$, и обозначим его $W_{\text{РС-НРС}}$.

Примем стратегию восстановления СВС с обеспечением наибольшего коэффициента сохранения эффективности, реализуемую введением экстренного восстановления ВУ. Обычное восстановление ВУ начинается сразу после его отказа и может осуществляться продолжительное время (сутки, недели, месяцы) в процессе использования кластера по назначению с уменьшенной производительностью. Восстановление работоспособности узлов производится в порядке очередности их отказов. После восстановления ВУ немедленно вводится в конфигурацию кластера и становится доступным для ПО кластера. В случае накопления в составе СВС количества неработоспособных узлов более установленного числа n производится их экстренное восстановление.

Отметим, что состояние СВС меняется при каждом отказе и восстановлении ВУ. Формально граф состояний СВС должен иметь $(N_0 + 1)$ состояние, где N_0 – исходное число узлов в составе СВС. На практике время восстановления ВУ выбирается таким, чтобы в СВС накапливалось незначительное число (единицы) неработоспособных узлов. Примем предельное число неработоспособных ВУ в составе СВС, после превышения которого вводится экстренное восстановление, $n = 2$. Вероятность накопления в системе более двух неработоспособных узлов по данным расчетов надежности кластерных конфигураций семейства СКИФ очень мала (примерно 0,005).

Среднее время восстановления отказавшего узла в обычном случае принято $T_{\text{в.ВУ.о}} = 168$ ч (одна неделя), а в экстренном случае – $T_{\text{в.ВУ.э}} = 8$ ч. Среднее время восстановления ядра кластера $T_{\text{в.я}} = 1,0$ ч.

Граф состояний СВС для принятой стратегии восстановления ВУ изображен на рис. 4, где S_i – состояние СВС, когда в нем находятся i накопившихся неработоспособных ВУ ($i = 0, 1, 2, 3$); S_0 – исходное состояние СВС, когда все ВУ в СВС работоспособны и доступны для ПО кластера; Λ_i , $i = 0, 1, 2$, – интенсивность перехода СВС из состояния S_i в состояние S_{i+1} , включая

состояние S_3 , в котором вводится режим восстановления в экстренном случае; V_0 – интенсивность восстановления ВУ в обычном случае; V_3 – интенсивность восстановления ВУ в экстренном случае.

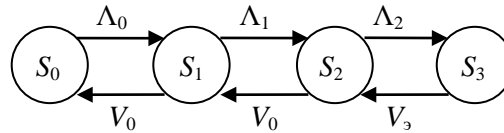


Рис. 4. Граф состояний СВС

По размеченному графу состояний (рис. 4) можно составить систему уравнений [5] с учетом замены одного уравнения на уравнение нормировки:

$$\Lambda_0 P_0 = V_0 P_1, (V_0 + \Lambda_1) P_1 = \Lambda_0 P_0 + V_0 P_2, (V_0 + \Lambda_2) P_2 = \Lambda_1 P_1 + V_3 P_3, \sum_0^3 P_i = 1, \quad (4)$$

где P_i – вероятность пребывания СВС в состоянии S_i .

Рассмотрим значения переменной Λ_i , используемой в графе состояний СВС. Для кластера справедливо соотношение

$$\Lambda_i = (N_0 - i) \Lambda_{\text{ВУ}}, \quad i = 0, 1, 2, \quad (5)$$

где $\Lambda_{\text{ВУ}}$ – интенсивность отказов ВУ, N_0 – количество ВУ в исходном состоянии СВС, i – количество накопившихся неработоспособных ВУ в СВС.

Корнями системы уравнений (4) с учетом (5) являются равенства

$$P_1 = B_1 P_0, \quad B_1 = N_0 \Lambda_{\text{ВУ}} / V_0; \quad (6)$$

$$P_2 = B_2 P_0, \quad B_2 = \{N_0 \Lambda_{\text{ВУ}} [V_0 + (N_0 - 1)] \Lambda_{\text{ВУ}}\} / V_0^2; \quad (7)$$

$$P_3 = B_3 P_0, \quad B_3 = \{N_0 \Lambda_{\text{ВУ}} [V_0 + (N_0 - 1) \Lambda_{\text{ВУ}}] [V_0 + (N_0 - 2) \Lambda_{\text{ВУ}} - V_0 N] [(N_0 - 1) \Lambda_{\text{ВУ}}^2]\} / V_0^2 V_3; \quad (8)$$

$$P_0 = [1 + B_1 + B_2 + B_3]^{-1}. \quad (9)$$

Средний коэффициент сохранения эффективности для режима восстановления в обычном случае рассчитывается согласно выражению

$$K_{\text{ср.эф}} = \sum_{i=0}^2 K_{\text{эф.}i} P_i, \quad (10)$$

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

$$K_{\text{эф.}i} = (N_0 - i) / N_0 \quad (11)$$

при $i = 0, 1, 2$.

Вычисляем наработку на сбой СВС для режима восстановления в обычном случае:

$$T_{\text{сб.СВС}} = \frac{1}{(P_0 + P_1 + P_2) \Lambda_{\text{ВУ}}} \sum_0^2 \frac{1}{N_0 - i}. \quad (12)$$

Расчет надежности кластера. В табл. 3 приведены показатели безотказности компонентов ССН согласно статистическим данным эксплуатации кластерных конфигураций семейства СКИФ в Республиканском суперкомпьютерном центре коллективного пользования (РСКЦ КП) ОИПИ НАН Беларуси.

Таблица 3

Показатели безотказности составных частей ССН кластера [1]

Составная часть ССН	Интенсивность отказов, 10^{-6} 1/ч	Средняя наработка на отказ, ч
Чип ВУ	31,125	32 128
Блок питания ВУ	0,500	2 000 000
Сетевой адаптер	0,213	46 948 356
Порт коммутатора с кабелем	0,166	60 240 963
Коммутатор	6,943	144 030

В соответствии с ССН на рис. 3 и данными табл. 3 производим расчет надежности ВУ кластера. Получаем интенсивность отказов $\Lambda_{ВУ} = 32,004 \cdot 10^{-6}$ 1/ч, среднюю наработку на отказ $T_{о.ВУ} = 31\,246$ ч и коэффициент готовности $K_{г.ВУ} = 0,999\,968$ при среднем времени восстановления $T_{в.ВУ} = 8,0$ ч.

Согласно ССН на рис. 2 и данным табл. 3 при расчете ядра кластера находим интенсивность отказов $\Lambda_{я} = 38,947 \cdot 10^{-6}$ 1/ч и среднюю наработку на отказ $T_{о.я} = 25\,676$ ч. Коэффициент готовности $K_{г.я} = 0,999\,961$ при среднем времени восстановления $T_{в.я} = 1,0$ ч.

На основании статистических данных эксплуатации кластерных конфигураций семейства СКИФ в РСКЦ КП ОИПИ НАН Беларуси установлены следующие значения переменных для эксплуатации кластера: исходное количество ВУ в СВС $N_0 = 9$; допустимое число накопленных отказов ВУ $n = 2$; среднее время восстановления отказавшего ВУ в обычном случае $T_{в.ВУ.о} = 168$ ч (одна неделя); интенсивность восстановления ВУ в обычном случае $V_0 = 1/T_{в.ВУ.о} = 5,95 \cdot 10^{-3}$ 1/ч; среднее время восстановления отказавшего ВУ в экстренном случае $T_{в.ВУ.э} = 8$ ч; интенсивность восстановления ВУ в экстренном случае $V_э = 1/T_{в.ВУ.э} = 0,125$ 1/ч.

С учетом принятых данных и выражений (6)–(12) получим равенства

$$B_1 = 0,047\,08; B_2 = 0,0049; B_3 < 10^{-4};$$

$$P_1 = 0,044\,752; P_2 = 0,004\,658; P_0 = 0,950\,554;$$

$$K_{ср.эф.СВС} = 0,993\,957; T_{сб.СВС} = 12\,112 \text{ ч} = 1,38 \text{ года.}$$

В соответствии с формулами (2), (3) находим значения показателей надежности кластера в целом:

$$K_{ср.эф.кластера} = K_{г.я} \cdot K_{ср.эф.СВС} = 0,999\,961 \cdot 0,993\,957 = 0,993\,918;$$

$$T_{о.кластера} = T_{о.я} = 25\,676 \text{ ч} = 2,93 \text{ года}; T_{сб.кластера} = T_{сб.СВС} = 12\,112 \text{ ч} = 1,38 \text{ года.}$$

Заключение. Согласно проведенной оценке надежности кластера в целом, основанной на вычислении показателей надежности по справочным данным о надежности компонентов и комплектующих элементов, сведениям об эксплуатации суперкомпьютеров семейства СКИФ и полученным расчетным соотношениям были определены показатели надежности кластера СКИФ-ГЕО-Офис РБ. Вычисления выполнялись с учетом значений показателей надежности составных частей ССН кластера и принятых исходных данных: номинального количества ВУ

в СВС $N_0 = 9$, предельного числа неработоспособных ВУ в составе СВС до введения экстренного восстановления $n = 2$, среднего времени восстановления ВУ в обычном случае 168 ч (неделя) и экстренном случае 8 ч, среднего времени восстановления ядра кластера 1 ч. В результате получены: средний коэффициент сохранения эффективности $K_{\text{ср.эф.кластера}} = 0,993\ 918$, средняя наработка на отказ кластера $T_{\text{о.кластера}} = 2,93$ года, наработка на сбой кластера $T_{\text{сб.кластера}} = 1,38$ года.

Приведенный расчет показателей надежности разработанного офисного кластера СКИФ-ГЕО-Офис РБ позволяет определить наиболее эффективные стратегии его эксплуатации, а также подходы к проектированию и применению архитектурных и структурных решений кластерных суперкомпьютерных конфигураций.

К основным направлениям обеспечения необходимых показателей надежности можно отнести:

- корректный расчет состава и обеспечение комплектности восстанавливаемого набора запасных частей;
- минимизацию количества составных частей ядра кластера, например, за счет использования в структуре кластера двух выделенных управляющих узлов (основного и резервного) для управления вычислениями и подключения пользователей из внешней локальной сети, организации системной сети для MPI-обменов и командной (вспомогательной) сети для оптимизации параллельного выполнения программ.

Предложенная методика расчета надежности аппаратной части офисного кластера была использована при оценке показателей надежности созданного в 2020 г. в ОИПИ НАН Беларуси опытного образца офисного кластера СКИФ-ГРИД-СНГ-Офис (12 ВУ, включая управляющий узел; интегральная пиковая производительность при выполнении операций с плавающей точкой с двойной точностью равна 22 Тфлопс) [6].

Вклад авторов. Мартинович Т. С. – проведение расчета надежности офисного кластера по статистическим данным эксплуатации кластерных конфигураций семейства СКИФ в РСКЦ КП ОИПИ НАН Беларуси; Парамонов Н. Н. – научное руководство исследованием, методическое обеспечение расчетов надежности кластера, проверка полученных результатов; Рымарчук А. Г. – изучение и решение вопросов, связанных с достоверностью данных о составе технических средств и данных по эксплуатации кластерных конфигураций; Чиж О. П. – разработка концепции исследования, критический пересмотр содержания и утверждение окончательного варианта статьи для публикации.

Список использованных источников

1. Белорусские суперкомпьютеры семейства СКИФ / Н. Н. Парамонов [и др.] ; Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси. – Гомель : Вечерний Гомель-Медиа, 2020. – 268 с.
2. Белорусские кластеры семейства «СКИФ-ГЕО» / М. Е. Кулешова [и др.] // Седьмой Нац. суперкомпьютерный форум : сб. докл., Переславль-Залесский, 27–30 нояб. 2018 г. / Институт программных систем РАН. – Режим доступа: http://2018.nskf.ru/TesisAll/00_Plenar/051_RymarchukAG.pdf/. – Дата доступа: 20.06.2020.
3. Малогабаритный офисный кластер семейства СКИФ-ГЕО-Офис РБ [Электронный ресурс] / М. Е. Кулешова [и др.] // Шестой Нац. суперкомпьютерный форум : сб. докл., Переславль-Залесский, 28 нояб. – 01 дек. 2017 г. / Институт программных систем РАН. – Режим доступа: <http://2017.nscf.ru/nauchno-prakticheskaya-konferenciya/tezisy-dokladov/>. – Дата доступа: 20.06.2020.
4. Анищенко, В. В. Модели надежности кластерных вычислительных систем / В. В. Анищенко, Л. И. Кульбак, Т. С. Мартинович // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2008. – № 1. – С. 89–99.
5. Викторова, В. С. Модели и методы расчета надежности технических систем / В. С. Викторова, А. С. Степеняц. – Изд. 2-е, испр. – М. : Ленанд, 2016. – 256 с.
6. Компактный вычислительный кластер : пат. РБ на полезную модель № 12417, МПК 606F / А. Г. Рымарчук, А. Н. Евдокимчиков, В. В. Мазюк, С. В. Кругликов, Н. Н. Парамонов, О. П. Чиж, В. Е. Маршалович, В. В. Мурашко, Е. И. Печковский. – Оубл. 30.10.2020.

References

1. Paramonov N. N., Tchij O. P., Rymarchuk A. G., Ablamejko S. V., Anishchenko V. V., Kruglikov S. V., Tuzikov A. V. Belorusskie superkomp'yutery semejstva SKIF. *Belarusian Supercomputers of the SKIF Family*, Gomel, Vechernij Gomel'-Media, 2020, 268 p. (In Russ.).
2. Kuleshova M. E., Paramonov N. N., Rymarchuk A. G., Tchij O. P. *Belarusian clusters of the SKIF-GEO family*. Sed'moj Nacional'nyj superkomp'juternyj forum: sbornik dokladov, Pereslavl'-Zalesskij, 27–30 nojabrja 2018 g. Institut programmnyh sistem Rossijskoj akademii nauk [7th National Supercomputer Forum: Collection of Reports, Pereslavl'-Zalessky, 27 November – 30 November 2018. Program Systems Institute of the Russian Academy of Sciences] (In Russ.). Available at: http://2018.nskf.ru/TesisAll/00_Plenar/051_RymarchukAG.pdf/ (accessed 20.06.2020).
3. Kuleshova M. E., Murashko N. N., Paramonov N. N., Rymarchuk A. G., Tchij O. P. *Small office cluster of the Belarusian SKIF family-GEO-Office*. Shestoj Nacional'nyj superkomp'juternyj forum: sbornik dokladov, Pereslavl'-Zalesskij, 28 nojabrja – 01 dekabrja 2017 g. Institut programmnyh sistem Rossijskoj akademii nauk [6th National Supercomputer Forum: Collection of Reports, Pereslavl'-Zalessky, 28 November – 01 December 2017. Program Systems Institute of the Russian Academy of Sciences] (In Russ.). Available at: <http://2017.nskf.ru/nauchno-prakticheskaya-konferenciya/tezisy-dokladov/> (accessed 20.06.2020).
4. Anishchenko V. V., Kulbak L. I., Martinovich T. S. *Reliability models of cluster computing systems*. Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seryia fizika-technichnykh navuk [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2008, no. 1, pp. 89–99 (In Russ.).
5. Viktorova V. S., Stepenyanc A. S. *Modeli i metody rascheta nadezhnosti tekhnicheskikh sistem. Models and Methods for Calculating the Reliability of Technical Systems*. Moscow, Lenand, 2016, 256 p. (In Russ.).
6. Rymarchuk A. G., Evdokimchikov A. N., Mazjuk V. V., Kruglikov S. V., Paramonov N. N., ..., Pechkovskij E. I. *Kompaktnyj vychislitel'nyj klaster: patent Respubliki Belarus' na poleznuju model' № 12417, MPK 606F. Compact Computing Cluster: patent of the Republic of Belarus for Utility Model no. 12417, MPK 606F*. Publ. date 30.10.2020 (In Russ.).

Информация об авторах

Мартинovich Татьяна Сергеевна, научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.
E-mail: martintan@newman.bas-net.by

Парамонов Николай Николаевич, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.
E-mail: nick@newman.bas-net.by

Рымарчук Александр Григорьевич, главный конструктор проекта, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.
E-mail: rymarchuk@newman.bas-net.by

Чиж Олег Петрович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией высокопроизводительных систем, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси.
E-mail: otchij@newman.bas-net.by

Information about the authors

Tatyana S. Martinovich, Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.
E-mail: martintan@newman.bas-net.by

Nikolaj N. Paramonov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.
E-mail: nick@newman.bas-net.by

Aleksandr G. Rymarchuk, Chief Designer of the Project, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.
E-mail: rymarchuk@newman.bas-net.by

Oleg P. Tchij, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Laboratory of High-Performance Systems, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.
E-mail: otchij@newman.bas-net.by