

УДК 004.3

В.В. Анищенко, Л.И. Кульбак, Т.С. Мартинович

**ВЫБОР СТРАТЕГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
КЛАСТЕРНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

Приводятся различные стратегии восстановления работоспособности кластерной вычислительной системы. Получены формулы, позволяющие выбрать оптимальную стратегию восстановления работоспособности кластерной вычислительной системы.

Введение

Кластерные вычислительные системы (КВС) занимают достойное место в числе самых мощных компьютеров мира. Для обеспечения высокой производительности в КВС используется значительное количество (сотни, тысячи) вычислительных узлов (ВУ) и сетевых соединений, которые в процессе работы КВС могут терять работоспособность [1]. Вместе с тем, КВС обладают свойством функционировать и при отказах узлов и соединений, которые исключают из конфигурации КВС, что позволяет применять их по назначению при пониженном уровне производительности. Использование этого свойства, а также возможности восстановления работоспособности ВУ с последующим введением их в конфигурацию КВС позволяют поддерживать надежность КВС на достаточно высоком уровне.

С позиций надежности КВС желательно классифицировать по признакам технологии организации системной сети. К первой категории отнесем КВС, системная сеть которых реализована на коммутаторах Myrinet, Infiniband, Fast Ethernet, Gigabit Ethernet и др. (обозначим их КВС-К). Ко второй категории отнесем КВС, системная сеть которых реализована на шине по технологии SCI (обозначим их КВС-S). В данной работе рассмотрены КВС-К.

Структурную схему надежности КВС можно представить в виде двух последовательно соединенных элементов: ядра КВС и совокупности вычислительных узлов (СВУ) [2]. Ядро КВС включает все составные части КВС, отказы которых снижают ее производительность до недопустимого уровня. СВУ состоит из всех ВУ КВС, которые, в свою очередь, включают вычислительные устройства и средства связи с системной и управляющей сетями. Отказ одного ВУ из СВУ в общем случае не приводит к неработоспособности КВС, а лишь снижает ее производительность.

При отказе элементов ядра КВС восстановление работоспособности КВС с экономических позиций необходимо производить немедленно. В случае отказа элементов СВУ их восстановление по экономическим соображениям может быть и отложено. Таким образом, экономически рациональная стратегия восстановления производительности КВС определяется стратегией восстановления СВУ.

1. Математическая модель надежности СВУ КВС

В качестве математической модели надежности СВУ аналогично [3] примем модель ее состояний в процессе эксплуатации со следующими допущениями:

- СВУ состоит из N_0 идентичных по надежности ВУ;
- каждый ВУ может находиться в одном из двух состояний: работоспособном или неработоспособном;
- переход СВУ из одного состояния в другое совершается независимо от предыдущих переходов;
- события, переводящие СВУ из одного состояния в другое, случайные и независимые с постоянными значениями интенсивности событий;
- за исходное состояние СВУ принимается состояние, когда все N_0 ВУ работоспособны;
- отказ некоторого числа ВУ в общем случае не приводит к неработоспособности СВУ, а лишь снижает производительность КВС;

- производительность СВУ пропорциональна числу доступных для использования ВУ;
- восстановление СВУ производится заменой ВУ, при этом возможно ограниченное и неограниченное восстановление.

При принятых допущениях для описания процесса изменения состояний СВУ можно использовать математический аппарат марковских процессов [4, 5]. В рамках принятой модели при отказах ВУ в СВУ возможны различные стратегии восстановления. К числу возможных следует отнести следующие стратегии восстановления СВУ.

Стратегия 1 (C1) – стремление поддерживать наибольшую производительность СВУ. С этой целью восстановление СВУ начинается сразу после отказа ВУ и может продолжаться длительное время (часы, сутки, неделю). Восстановление проводится в процессе использования КВС по назначению с уменьшенной производительностью и в порядке очередности отказов ВУ. После восстановления ВУ немедленно вводится в конфигурацию КВС и становится доступным для программного обеспечения КВС. В случае накопления в СВУ более установленного числа отказавших ВУ производится экстренное восстановление СВУ, которое может быть ограниченным и неограниченным.

Стратегия 2 (C2) – стремление поддерживать экономически обоснованную производительность СВУ. С этой целью восстановление СВУ откладывается до накопления экономически обоснованного количества отказавших ВУ. Затем производится восстановление всех накопившихся отказавших ВУ по одному в рациональном порядке. Для восстановления СВУ возможны два варианта: с прерыванием работы КВС и в процессе продолжения работы КВС до очередного отказа ВУ.

2. Стратегия восстановления C1

Примем следующие обозначения: S_0 – исходное состояние СВУ, когда все ВУ работоспособны и доступны для программного обеспечения КВС; S_i – состояние СВУ, когда в ней накопилось i отказавших ВУ; S_n – состояние СВУ, когда в ней накопилось предельное число n отказавших ВУ; $\lambda_i, i = 0, \dots, n - 1$, – интенсивность перехода СВУ из состояния S_i в состояние S_{i+1} ; $V_i, i = 0, \dots, n - 2$, – интенсивность восстановления ВУ; V_{\exists} – интенсивность перехода СВУ из состояния S_n в состояние S_{n-1} . Тогда для стратегии C1 усеченный граф состояний СВУ будет выглядеть, как показано на рис. 1.

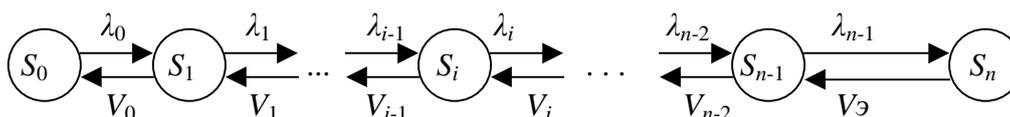


Рис. 1. Граф состояний СВУ при стратегии C1 восстановления СВУ

В соответствии с правилами составления системы алгебраических уравнений по размеченному графу состояний система уравнений с учетом замены одного из них на уравнение нормировки для стратегии C1 примет следующий вид:

$$\begin{cases} \lambda_0 P_0 = V_0 P_1; \\ (V_{i-1} + \lambda_i) P_i = \lambda_{i-1} P_{i-1} + V_i P_{i+1}, i = 1, \dots, n - 2; \\ (V_{n-2} + \lambda_{n-1}) P_{n-1} = \lambda_{n-2} P_{n-2} + V_{\exists} P_n; \\ \sum_{i=0}^n P_i = 1, \end{cases} \quad (1)$$

где P_i – вероятность пребывания СВУ в состоянии S_i .

Решением системы уравнений (1) являются

$$P_0 = \left[1 + \frac{\lambda_{n-1}}{V_{\text{Э}}} \prod_{j=0}^{n-2} \frac{\lambda_j}{V_j} + \sum_{i=1}^{n-1} \prod_{j=0}^{i-1} \frac{\lambda_j}{V_j} \right]^{-1}; \quad (2)$$

$$P_i = P_0 \prod_{j=0}^{i-1} \frac{\lambda_j}{V_j}, \quad i = 1, \dots, n-1; \quad (3)$$

$$P_n = P_0 \frac{\lambda_{n-1}}{V_{\text{Э}}} \prod_{j=0}^{n-2} \frac{\lambda_j}{V_j}. \quad (4)$$

Рассмотрим наиболее часто встречаемый вариант значений переменных λ_i и V_i .
Для КВС-К справедливо соотношение

$$\lambda_i = (N_0 - i)\lambda, \quad i = 0, \dots, n-1, \quad (5)$$

где λ – интенсивность отказов ВУ; N_0 – количество ВУ в исходном состоянии; i – количество накопившихся отказавших ВУ в СВУ.

При неограниченном восстановлении СВУ выполняются условия

$$V_i = (i+1)V, \quad i = 0, \dots, n-2, \quad V_{\text{Э}} > nV, \quad (6)$$

где V – интенсивность восстановления отказавшего ВУ; i – количество накопившихся отказавших ВУ в СВУ; $V_{\text{Э}}$ – интенсивность экстренного восстановления отказавшего ВУ.

При ограниченном восстановлении СВУ выполняются следующие условия:

$$V_i = V, \quad i = 0, \dots, n-2, \quad V_{\text{Э}} > V. \quad (7)$$

При неограниченном восстановлении СВУ формулы (2)–(4) с учетом соотношений (5) и (6) изменятся следующим образом:

$$P_0 = \left[1 + \sum_{i=1}^{n-1} A^i \frac{N_0!}{i!(N_0-i)!} + \frac{VA^n N_0!}{V_{\text{Э}}(n-1)!(N_0-n)!} \right]^{-1}; \quad (8)$$

$$P_i = A^i \frac{N_0!}{i!(N_0-i)!} P_0, \quad i = 1, \dots, n-1; \quad (9)$$

$$P_n = A^n \frac{VN_0!}{V_{\text{Э}}(n-1)!(N_0-n)!} P_0, \quad (10)$$

где $A = \lambda/V$. (11)

При ограниченном восстановлении СВУ формулы (2)–(4) с учетом соотношений (5) и (7) примут вид

$$P_0^* = \left[1 + \sum_{i=1}^{n-1} A^i \frac{N_0!}{(N_0-i)!} + \frac{VA^n N_0!}{V_{\text{Э}}(N_0-n)!} \right]^{-1}; \quad (12)$$

$$P_i^* = A^i \frac{N_0!}{(N_0-i)!} P_0^*, \quad i = 1, \dots, n-1; \quad (13)$$

$$P_n^* = A^n \frac{VN_0!}{V_{\text{Э}}(N_0-n)!} P_0^*. \quad (14)$$

В самом общем виде формулы для расчета показателей надежности [6] СВУ можно представить следующим образом [3]:

$$K_{\text{эф.СВУ}} = \sum N_i P_i / N_0; \quad S_i \in W_{PC}; \quad (15)$$

$$T_{O.СВУ} = \frac{\sum P_i, \quad S_i \in W_{PC}}{\sum \lambda_{i,j} P_i, \quad S_i \in W_{PC-HPC}, \quad S_j \in W_{HPC-PC}}, \quad (16)$$

где $K_{\text{эф.СВУ}}$ – коэффициент сохранения эффективности СВУ; $T_{O.СВУ}$ – средняя наработка СВУ в состояниях с приемлемой производительностью (аналог средней наработки на отказ); S_i – состояние СВУ; N_i – число работоспособных ВУ в состоянии S_i ; W_{PC} – подмножество работоспособных состояний из множества W всех состояний СВУ; W_{PC-HPC} – подмножество работоспособных состояний, имеющих непосредственный переход в подмножество неработоспособных состояний; W_{HPC-PC} – подмножество неработоспособных состояний, имеющих непосредственный переход в подмножество работоспособных состояний.

Перейдем к обозначениям, принятым в формулах (15), (16) для графа, показанного на рис. 1: $0, 1, \dots, n \in W$; $0, 1, \dots, n-1 \in W_{PC}$; $n \in W_{HPC}$; $n-1 \in W_{PC-HPC}$; $n \in W_{HPC-PC}$; $N_i = N_0 - i$, $i = 0, \dots, n$.

В соответствии с формулами (15), (16) получим

$$K_{\text{эф.СВУ}} = \sum_{i=0}^{n-1} (N_0 - i) P_i / N_0; \quad (17)$$

$$T_{O.СВУ} = \sum_{i=0}^{n-1} P_i / (N_0 + 1 - n) \lambda P_{n-1}. \quad (18)$$

Пример 1. КВС СКИФ К-1000 [7] имеет следующие параметры: $N_0 = 288$, $\lambda = 38,8033 \times 10^{-6}$ 1/ч. Примем среднее время восстановления в обычном случае $T_{B.BY} = 168$ ч (одна неделя) и среднее время восстановления в экстренном случае $T_{\text{э}} = 2$ ч. Определим показатели надежности СВУ в случаях неограниченного и ограниченного восстановления при различных значениях n .

Интенсивности восстановления для принятых значений средних времен восстановления равны $V = 1/ T_{B.BY} = 5,9523 \times 10^{-3}$ 1/ч, $V_{\text{э}} = 1/ T_{\text{э}} = 0,5$ 1/ч.

При неограниченном восстановлении расчеты по формулам (17), (18) дают результаты, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

n	$K_{\text{эф.СВУ}}$	$T_{O.СВУ}$	n	$K_{\text{эф.СВУ}}$	$T_{O.СВУ}$
2	0,98344	138	5	0,99226	1116
3	0,98765	238	6	0,99307	3114
4	0,99057	474	7	0,99339	10260

При ограниченном восстановлении расчеты по формулам (17), (18) дают результаты, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

n	$K_{\text{эф.СВУ}}$	$T_{O.СВУ}$	n	$K_{\text{эф.СВУ}}$	$T_{O.СВУ}$
2	0,98344	138	5	0,97886	187
3	0,98317	164	6	0,97886	193
4	0,98135	179	7	0,96020	196

Расчеты подтвердили, что неограниченное восстановление является более эффективным, но надо иметь в виду, что оно и более дорогостоящее.

3. Стратегия восстановления С2

Для случая прерывания работы КВС (вариант 1) при стратегии С2 восстановления СВУ граф состояний СВУ показан на рис. 2, на котором приняты обозначения, аналогичные приведенным для рис. 1, а также дополнительно V_n – интенсивность восстановления n отказавших ВУ.

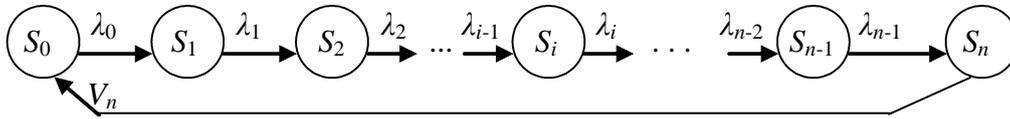


Рис. 2. Граф состояний СВУ при варианте 1 стратегии С2 восстановления СВУ

Для графа на рис. 2 система алгебраических уравнений примет вид

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^n P_i = 1; \\ \lambda_i P_i = \lambda_{i-1} P_{i-1}, \quad i = 1, \dots, n-1; \\ V_n P_n = \lambda_{n-1} P_{n-1}, \end{cases} \quad (19)$$

где $V_n = 1/nT_{B,BV}$; (20)

$T_{B,BV}$ – среднее время восстановления одного ВУ.

Решением этой системы уравнений являются

$$P_0 = [1 + \lambda_0 \sum_{i=1}^{n-1} 1/\lambda_i + \lambda_0/V_n]^{-1}; \quad (21)$$

$$P_i = \lambda_0 P_0 / \lambda_i, \quad i = 1, \dots, n-1; \quad (22)$$

$$P_n = \lambda_0 P_0 / V_n. \quad (23)$$

Произведем замену множеств в формулах (15), (16) на соответствующие индексы состояний согласно графу на рис. 2:

$$K_{\text{ЭФ.СВУ}} = \sum_{i=0}^{n-1} N_i P_i / N_0; \quad (24)$$

$$T_{O.CBV} = \sum_{i=0}^{n-1} P_i / \lambda_{n-1} P_{n-1}. \quad (25)$$

После подстановки в формулы (24), (25) переменных из формул (21)–(23) и несложных преобразований получим

$$K_{\text{ЭФ.СВУ}} = \frac{n}{N_0 [\sum_{i=0}^{n-1} 1/(N_0 - i) + \lambda n T_{B,BV}]}; \quad (26)$$

$$T_{O.CBV} = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=0}^{n-1} 1/(N_0 - i). \quad (27)$$

Для случая восстановления СВУ в процессе продолжения работы КВС (вариант 2) при стратегии С2 граф состояний СВУ показан на рис. 3, на котором приняты обозначения, аналогичные приведенным для рис. 1, а также дополнительно: V_n – интенсивность восстановления n отказавших ВУ, $V_{\text{Э}}$ – интенсивность восстановления СВУ в экстренном случае.

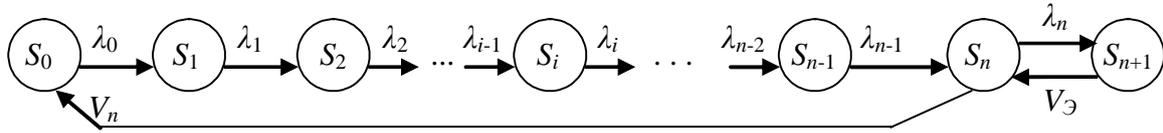


Рис. 3. Граф состояний СВУ при варианте 2 стратегии С2 восстановления СВУ

Повторяя процедуру, проведенную с предыдущим графом, и учитывая, что

$$V_{\text{Э}} = 1/T_{\text{Б.Э}}, \tag{28}$$

где $T_{\text{Б.Э}}$ – среднее время восстановления в экстренном случае, получим следующее решение системы уравнений:

$$P_0 = \left[\sum_{i=0}^{n-1} \frac{N_0}{N_0 - i} + N_0 \lambda n T_{\text{Б.ВУ}} (1 + \lambda T_{\text{Б.Э}} (N_0 - n)) \right]^{-1}; \tag{29}$$

$$P_i = \lambda_0 P_0 / \lambda_i, \quad i = 1, \dots, n - 1; \tag{30}$$

$$P_n = \lambda_0 P_0 / V_n; \tag{31}$$

$$P_{n+1} = \lambda_0 \lambda_n P_0 / V_n V_{\text{Э}}; \tag{32}$$

$$K_{\text{ЭФ.СВУ}} = [n + \lambda n T_{\text{Б.ВУ}} (N_0 - n)] P_0; \tag{33}$$

$$T_{\text{О.СВУ}}(n) = \frac{1 + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{N_0}{N_0 - i} + \lambda N_0 n T_{\text{Б.ВУ}}}{\lambda N_0}; \tag{34}$$

$$T_{\text{О.СВУ}}(n+1) = \frac{1 + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{N_0}{N_0 - i} + \lambda N_0 n T_{\text{Б.ВУ}}}{\lambda^2 N_0 n T_{\text{Б.ВУ}} (N_0 - n)}. \tag{35}$$

Здесь $T_{\text{О.СВУ}}(n)$ – среднее время пребывания СВУ в группе состояний, предшествующих состоянию S_n (до начала восстановления); $T_{\text{О.СВУ}}(n+1)$ – среднее время пребывания СВУ в группе состояний, предшествующих состоянию S_{n+1} (до начала экстренного восстановления).

4. Модель экономики при стратегии С2 восстановления СВУ

Примем следующую модель эксплуатации КВС:

- КВС работает круглосуточно и использует все работоспособные ВУ;
- прибыль от использования одного ВУ в течение 1 ч составляет $C_{\text{ВУ}}$;
- производительность КВС определяется числом доступных ВУ для программного обеспечения КВС (числом работоспособных ВУ в СВУ);
- при отказе ядра КВС к восстановлению работоспособности КВС приступают немедленно;
- при отказе ВУ немедленно производится реконфигурация СВУ, и работа КВС продолжается с пониженной производительностью;
- к восстановлению производительности СВУ до номинального значения приступают при снижении производительности КВС ниже экономически обоснованного уровня;

– возможны следующие варианты восстановления СВУ. Вариант 1: для восстановления СВУ работа КВС по назначению прерывается. Вариант 2: восстановление производительности КВС до номинального уровня N_0 производится в процессе продолжения работы КВС при ранее сохранившейся производительности N_n , при очередном отказе ВУ восстановление СВУ производится в экстренном порядке.

Требуется определить экономически оптимальный уровень снижения производительности СВУ. Рассмотрим один год работы СВУ. В случае непрерывной работы СВУ в течение одного года (8760 ч) и варианта 1 стратегии восстановления С2 при восстановлении СВУ с уровня производительности $N_0 - n$ до уровня N_0 выполняется работа КВС, которая может быть оценена по формуле

$$R_1 = 8760 N_0 C_{BY} K_{\text{эф.СВУ}}, \quad (36)$$

где R_1 – стоимость выполненных работ КВС в течение одного года при варианте 1 стратегии С2 восстановления СВУ и отсутствии необходимости восстанавливать производительность СВУ; C_{BY} – стоимость работ, выполняемых одним ВУ в течение 1 ч; $K_{\text{эф.СВУ}}$ – коэффициент сохранения эффективности СВУ при варианте 1 стратегии С2 восстановления СВУ (формула (26)).

В процессе восстановления СВУ при варианте 1 стратегии С2 имеют место затраты, которые можно оценить по формуле

$$П_1 = K_B [C_{B,III} + n C_{B,BY} + C_{BY}(N_0 - n) T_{B,BY} n], \quad (37)$$

где $П_1$ – годовые затраты на восстановление производительности СВУ при варианте 1 стратегии восстановления С2 и потери в работе КВС при прерывании его работы на время восстановления СВУ; K_B – количество восстановлений СВУ в течении одного года; $C_{B,III}$ – стоимость одного вызова технического персонала для восстановления производительности СВУ; $C_{B,BY}$ – стоимость работ по восстановлению одного ВУ; $T_{B,BY}$ – среднее время восстановления одного ВУ.

Вполне очевидно, что количество восстановлений СВУ в течение одного года можно определять по формуле

$$K_B = 8760 / T_{O,СВУ}, \quad (38)$$

где $T_{O,СВУ}$ – средняя наработка на отказ СВУ при использовании варианта 1 стратегии восстановления С2 (формула (27)).

Доход от эксплуатации СВУ в течении одного года $Д_1$ при варианте 1 стратегии восстановления С2 следует вычислять по формуле

$$Д_1 = R_1 - П_1. \quad (39)$$

После подстановки в формулу (39) формул (36)–(38) получим

$$Д_1 = 8760 N_0 C_{BY} K_{\text{эф.СВУ}} - \frac{8760}{T_{O,СВУ}} [C_{B,III} + n C_{B,BY} + C_{BY}(N_0 - n) T_{B,BY} n] \text{ у.е.} \quad (40)$$

Аналогичным образом получаем формулу дохода от эксплуатации СВУ в течении одного года $Д_2$ при варианте 2 стратегии восстановления С2:

$$Д_2 = 8760 N_0 C_{BY} K_{\text{эф.СВУ}}(n+1) - \frac{8760}{T_{O,СВУ}(n)} [C_{B,III} + n C_{B,BY}] - \frac{8760 \times C_{B,BY,Э}}{T_O(n+1)} \text{ у.е.}, \quad (41)$$

где $K_{\text{эф.СВУ}}(n+1)$ – коэффициент сохранения эффективности СВУ при варианте 2 стратегии восстановления СВУ С2 (формулы (29), (33)); $T_{O,СВУ}(n)$ – среднее время пребывания СВУ в состояниях, предшествующих состоянию начала восстановления СВУ при использовании варианта стратегии восстановления С2 (формула (34)); $T_{O,СВУ}(n+1)$ – средняя наработка на отказ

СВУ при использовании варианта стратегии восстановления С2 (формула (35)); $C_{B,BV,\text{Э}}$ – стоимость работ по восстановлению одного ВУ в экстренном случае.

Формулы (40) и (41) представляют собой выпуклые функции от n и имеют достаточно четко выраженный максимум. Значение n , при котором достигается максимум функций $D_1(n)$ и $D_2(n)$, легко определяется методом перебора.

Пример 2. Определить оптимальную стратегию восстановления КВС СКИФ К-1000 в случае использования варианта 1 стратегии С2 восстановления СВУ при следующих исходных данных: $N_0 = 288$, $\lambda = 38,8 \cdot 10^{-6}$ 1/ч, $T_{B,BV} = 2$ ч, $C_{BV} = 0,5$ у.е., $C_{B,П} = 200$ у.е., $C_{B,BV} = 50$ у.е.

Результаты расчетов по формулам (26) и (40) приведены в табл. 3.

Таблица 3

n	$D_1(n), 10^3 \text{ у.е.}$	n	$D_1(n), 10^3 \text{ у.е.}$
1	1181,29	6	1187,89
2	1189,15	7	1186,40
3	1190,48	8	1184,79
4	1190,16	9	1183,09
5	1189,19		

Из табл. 3 следует, что $n = 3$ является оптимальным, при этом по формулам (26), (27) получаем $K_{\text{ЭФ.СВУ}} = 0,97481$, $T_{O,СВУ} = 269$ ч.

Пример 3. Определить оптимальную стратегию восстановления КВС СКИФ К-1000 в случае использования варианта 2 стратегии С2 восстановления СВУ при исходных данных примера 2 и следующих дополнительных исходных данных: $T_{B,\text{Э}} = 0,5$ ч, $C_{B,BV,\text{Э}} = 70$ у.е.

Результаты расчетов по формулам (33)–(35) и (41) приведены в табл. 4.

Таблица 4

n	$D_2(n), 10^3 \text{ у.е.}$	n	$D_1(n), 10^3 \text{ у.е.}$
2	1242,22	7	1237,87
3	1243,18	8	1235,96
4	1242,54	9	1233,98
5	1241,26	10	1231,94
6	1239,66		

Из табл. 4 следует, что $n = 3$ является оптимальным, при этом по формулам (33), (34) получаем $K_{\text{ЭФ.СВУ}} = 0,99625$, $T_{O,СВУ} = 275$ ч.

Заключение

В связи с большим количеством ВУ, входящих в конфигурацию КВС, их отказы становятся довольно частым явлением. В этой связи стратегия восстановления ВУ и ввода их снова в конфигурацию КВС является актуальной задачей рационального использования КВС.

При отказе элементов ядра КВС нет сомнения в необходимости немедленного восстановления КВС, так как ее производительность падает до нуля или неприемлемого уровня. При отказе ВУ КВС может продолжать работать со сниженной производительностью. В этом случае возникает вопрос о стратегии восстановления производительности КВС. В работе рассматривались две стратегии восстановления производительности СВУ. Получены формулы, позволяющие выбрать параметры стратегий восстановления СВУ и формулы показателей надежности СВУ при различных стратегиях восстановления СВУ. Приведены примеры с использованием конкретных данных КВС СКИФ К-1000.

Список литературы

1. Принципы построения суперкомпьютеров семейства «СКИФ» и их реализация / С.М. Абрамов [и др.] // Информатика. – 2004. – № 1. – С. 89–106.

2. Анищенко, В.В. Методология оценки надежности кластерных суперкомпьютеров / В.В. Анищенко, Л.И. Кульбак, В.К. Фисенко // Суперкомпьютерные системы и их применение SSA' 2004: доклады Междунар. науч. конф., Минск, 26–28 октября 2004 г. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2004. – С. 244–249.
3. Анищенко, В.В. Показатели и математическая модель надежности кластерного суперкомпьютера / В.В. Анищенко, Л.И. Кульбак, В.К. Фисенко // Информатика. – 2004. – № 2. – С. 5–12.
4. Соловьев, А.Д. Оценка надежности восстанавливаемых систем / А.Д. Соловьев. – М.: Знание, 1987. – 50 с.
5. Голинкевич, Т.А. Прикладная теория надежности / Т.А. Голинкевич. – М.: Высшая школа, 1977. – 160 с.
6. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности: ГОСТ 27.003–90. – Минск: Изд-во стандартов, 1991. – 27 с.
7. Суперкомпьютерные конфигурации СКИФ / С.В. Абламейко [и др.]. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2005. – 170 с.

Поступила 15.08.06

*Объединенный институт проблем
информатики НАН Беларуси,
Минск, Сурганова, 6
e-mail: fisenko@newman.bas-net.by*

U.V. Anishchanka, L.I. Kulbak, T.S. Martsinovich

STRATEGY CHOICE OF WORKING CAPACITY RESTORATION FOR CLUSTER COMPUTER SYSTEMS

The paper presents various strategies of working capacity restoration of cluster computer systems. The formulas to choose the optimum strategy of working capacity restoration for cluster computer systems are obtained.