

УДК 681.142.2:681.142.1.01

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Ю.М. Волков

Осуществляется анализ качества функционирования распределенных вычислительных систем (ВС) с учетом возможных отказов элементов. Введены критерии оценки надежности живучих или структурно-избыточных систем. Приведены результаты исследования свойств живучих и структурно-избыточных распределенных ВС.

I. Основные положения

I.1. Распределенная вычислительная система представляет собой совокупность территориально рассредоточенных вычислительных машин, объединенных каналами связи [1,2]. Реализация в распределенных ВС режима параллельной обработки позволяет существенно поднять их производительность при решении сложных задач по сравнению с обычными ЭМ и сетями ЭМ.

При разработке распределенных систем необходимо принимать меры по обеспечению их надежности и живучести, так как технические средства, на базе которых они строятся, обладают конечной надежностью. В дальнейшем будем предполагать, что аппаратные и программные средства системы обеспечивают автоматическое выявление неисправных элементов и проведение необходимой реконфигурации.

Целью данной работы является определение основных критериев, отражающих надежность свойства распределенных ВС, и исследование влияния количества каналов связи на характеристики системы.

I.2. Под структурой распределенной ВС мы будем понимать граф $G(U, V)$, множеству U , $|U| = N$, вершин которого соответствует множество элементарных машин (ЭМ), а множеству ребер

$V, |V|=M$, соответствует множество каналов связи системы. (Элементарная машина включает в себя вычислительную машину и системное устройство [1,2].)

Важной особенностью структуры распределенных ВС, в отличие от структуры сосредоточенной системы [3], является ее потенциальная нерегулярность. Это связано с тем, что всегда существуют некоторые физические ограничения на возможность соединения ЭМ системы, а также стремление использовать небольшое число каналов связи с целью уменьшения системных затрат.

В процессе работы на элементы системы (машины) воздействуют случайные потоки отказов и восстановлений. В дальнейшем под отказом мы будем понимать внезапную и полную потерю элементом способности к выполнению своих функций. Отказавший элемент ремонтируется восстанавливающим устройством и переключается в исправное состояние. Заметим, что поскольку на практике восстанавливающему устройству соответствует ремонтная бригада специалистов, то для таких ВС необходимо рассматривать восстанавливающие устройства двух типов. Первый тип обеспечивает восстановление ЭМ, а второй - каналов связи. Отказы элементов структуры распределенной ВС будем считать независимыми, а время переключения элемента - бесконечно малым.

Имеющиеся результаты статистических исследований [4,5] позволяют говорить о справедливости гипотезы об экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы и времени восстановления реальных ЭМ и каналов связи. В этом случае функцию $K(t)$ готовности элемента системы (т.е. вероятность исправной работы элемента в произвольный момент времени) можно определить известными методами [6].

В стационарном режиме работы

$$\lim_{t \rightarrow \infty} K(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} = K$$

называют коэффициентом готовности элемента. Здесь λ - интенсивность потока отказов и μ - интенсивность потока восстановлений. Коэффициент готовности является одним из наиболее употребляемых на практике показателей надежностных свойств элемента. Он не зависит от начального состояния и полностью определяется соотношением между λ и μ .

Для решения сложной задачи на распределенных ВС необходимо обеспечить возможность оперативного обмена информацией между ЭМ,

выполняющими параллельные ветви алгоритма. Это предполагает исправность соответствующих технических средств.

Под физической подсистемой будем понимать совокупность исправных ЭМ, объединенных исправными каналами связи.

Программной подсистемой будем называть подмножество ЭМ физической подсистемы, настроенных на выполнение параллельного алгоритма.

Рангом r подсистемы называется число исправных ЭМ, содержащихся в подсистеме, $r \in \overline{0, N}$. В ВС возможно одновременное существование $i, i \in \overline{1, N}$, физических подсистем, причем $\sum_1^i r_j \leq N$.

Максимальная производительность системы определяется подсистемой с $r^* = \max r_j$. Такую подсистему будем называть главной. Одним из основных условий, обеспечивающих достижение высокой производительности, является малая чувствительность ВС к выходу из строя отдельных ЭМ и каналов связи. Этого можно добиться, организовав функционирование ВС по типу живой или структурно-избыточной системы [7].

В живучих распределенных ВС ранг программной подсистемы равен рангу главной физической подсистемы. Программы, выполняемые на живучей ВС, должны обладать свойством универсальности, т.е. автоматически настраиваться на число исправных ЭМ в подсистеме.

В структурно-избыточных ВС в рамках главной физической подсистемы организуется программная подсистема ранга n . Остальные $(r^* - n)$ ЭМ являются резервными и загружаются фоновыми задачами. В случае выхода из строя какой-либо ЭМ программной подсистемы, её функции передаются резервной и процесс вычислений продолжается.

Повышение надежности вычислений в живучих и структурно-избыточных распределенных ВС осуществляется за счет информационной избыточности параллельной программы и структурной избыточности системы.

2. Показатели функционирования живучих и структурно-избыточных распределенных ВС

Основной целью функционирования ВС является увеличение вычислительной мощности, представляемой пользователю, поэтому критерии, оценивающие ее надежность свойства, должны отражать способность системы к реализации параллельных алгоритмов.

В качестве основного критерия оценки качества функционирования живучих распределенных ВС мы будем использовать вектор-функцию готовности

$$\vec{S}(t) = \{s_k(t)\}, \quad k \in \overline{1, N},$$

где $s_k(t)$ есть вероятность существования в момент времени t главной физической подсистемы с $r^* \geq k$,

$$s_k(t) = P\{r^*(t) \geq k\}.$$

Для структурно-избыточных распределенных ВС будем использовать функцию готовности подсистемы

$$s_n(t) = P\{r^*(t) \geq n\}.$$

Если допустить, что в распределенной системе возможен обмен между любыми исправными ЭМ, то введенные критерии будут совпадать с соответствующими показателями для однородных вычислительных систем [8].

Поскольку в распределенной ВС возможно одновременное существование i физических подсистем, то для оценки качества структуры ее с этой точки зрения мы будем использовать вектор-функцию дробления

$$\vec{D}(t) = \{d_i(t)\}, \quad i \in \overline{1, N},$$

где $d_i(t)$ – вероятность существования в момент времени t , $t \geq 0$, i физических подсистем.

Для оценки стационарного режима работы будем использовать вектор-коэффициент готовности распределенной ВС

$$\vec{S} = \{s_k\}, \quad s_k = \lim_{t \rightarrow \infty} s_k(t),$$

коэффициент готовности подсистемы

$$s_n = \lim_{t \rightarrow \infty} s_n(t)$$

и вектор-коэффициент дробления

$$\vec{D} = \{d_i\}, \quad d_i = \lim_{t \rightarrow \infty} d_i(t).$$

Стационарный режим работы ВС не зависит от начального состояния элементов системы и характеризуется распределением вероятностей P_i существования физической подсистемы ранга i , $i \in \overline{0, N}$.

В этом случае

$$S_k = \sum_{i=k}^N P_i . \quad (1)$$

Для получения более полной информации о ранге главной физической подсистемы в стационарном режиме будем использовать математическое ожидание ранга

$$m(r^*) = \sum_{i=0}^N i \cdot P_i \quad (2)$$

и среднеквадратичное отклонение ранга

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=0}^N [i - m(r^*)]^2 \cdot P_i} . \quad (3)$$

Введенные показатели позволяют оценивать качество функционирования распределенных ВС с надежностной точки зрения при различных характеристиках составляющих ее элементов.

3. Исследование надежностных свойств распределенных ВС

Необходимость учета структуры распределенной ВС при вычислении введенных выше характеристик приводит к значительным трудностям в получении соответствующих аналитических выражений. Поэтому наиболее приемлемым методом исследования является статистическое моделирование. Для этого разработан комплекс программ анализа структур, позволяющий вычислять характеристики структур различных классов, в том числе и нерегулярных [9].

Исследование структур ВС проводилось для стационарного режима работы системы. С помощью указанного комплекса программ определялись распределения вероятностей P_i и компоненты вектор-коэффициента дробления, затем по формулам (1)–(3) рассчитывались значения компонент вектор-коэффициента готовности, математическое ожидание ранга главной физической подсистемы и его среднеквадратичное отклонение.

Очевидно, что наилучшими надежностными свойствами обладает структура со связями по полному графу. Однако для нее, уже при небольших значениях N , требуется значительное число каналов связи. Поэтому вполне закономерна такая постановка задачи: можно ли строить системы с надежностными характеристиками, близкими к характеристикам полного графа, используя при этом меньшее число каналов связи?

Для получения ответа на этот вопрос были проведены исследования по выявлению характера взаимосвязи между надежностными свойствами структуры и количеством содержащихся в ней каналов связи M . В ходе этих исследований рассчитывались характеристики структур ВС с различными значениями N и M/N . Для синтеза структур использовался алгоритм [10], обеспечивающий построение для заданных N и M псевдорегулярного максимально связанного графа. Расчеты приведены для систем с так называемыми независимыми системными устройствами [11], при $K_{\text{вм}} = K_{\text{кс}} = 0,9$ и $K_{\text{су}} = 0,95$. N полагалось равным 20, 30, 40, 50.

На рис. 1 и 2 отражена зависимость значений S_k от избыточности по каналам связи для $N = 20$ и для $N = 50$ соответственно. Здесь показаны компоненты вектор-коэффициента готовности для достаточно высоких значений ранга, поскольку остальные S_k уже при небольших отношениях M/N принимают значения, близкие к единице.

Результаты статистических экспериментов показывают нелинейную зависимость надежностных свойств структур распределенных ВС от избыточности по каналам связи. На обоих графиках можно выделить два участка: на первом при изменении избыточности от 1 до 1,5 наблюдается существенное повышение значений S_k ; для второго участка, начинающегося примерно со значения $M/N = 1,5$, характерно незначительное увеличение S_k . Можно показать, что на втором участке значение S_k близко к предельному, получаемому у полного графа. Действительно, в полном графе систему каналов связи можно считать абсолютно надежной, ошибка будет составлять величину порядка $(1 - K_{\text{кс}})^{N-1}$. В этом случае распределение вероятностей P_i можно подсчитать, используя биномиальный закон

$$P_i = C_N^i \cdot K_{\text{эм}}^i \cdot (1 - K_{\text{эм}})^{N-i},$$

где $K_{\text{эм}} = K_{\text{вм}} \cdot K_{\text{су}}$.

Например, для S_{16} (при $N = 20$, $K_{\text{вм}} = 0,9$ и $K_{\text{су}} = 0,95$) предельное значение получается равным 0,824. Из рис. 1 следует, что уже при $M/N = 1,5$ значение S_{16} ($k = 0,8N$) равно 0,8, что соответствует 0,97 предельного значения. При этом отношение количества использованных каналов связи к числу их в полном графе составляет 0,158. Следовательно, уже при небольшом количестве каналов связи значения компонент вектор-коэффициента готовности принимают значения, близкие к предельным.

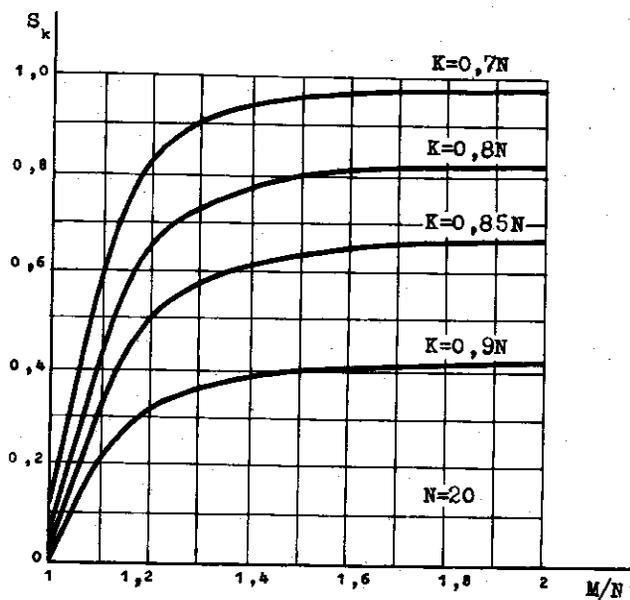


Рис.1

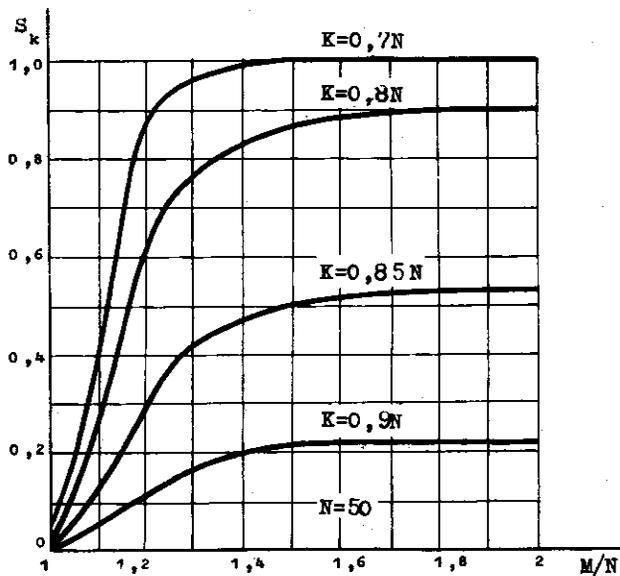


Рис.2

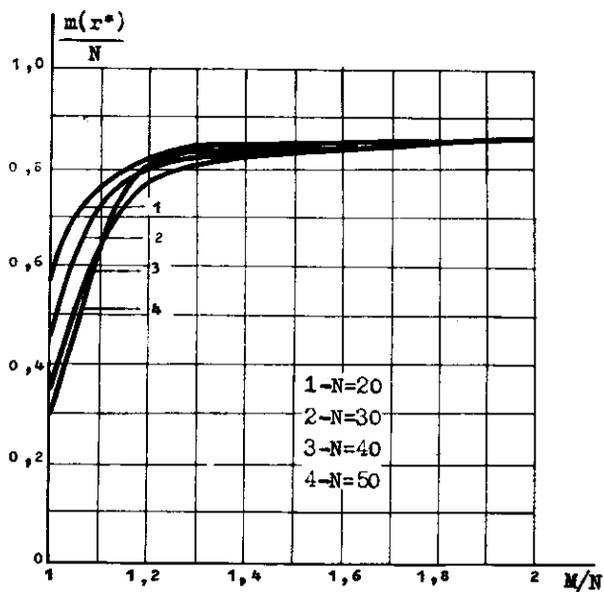


Рис. 3

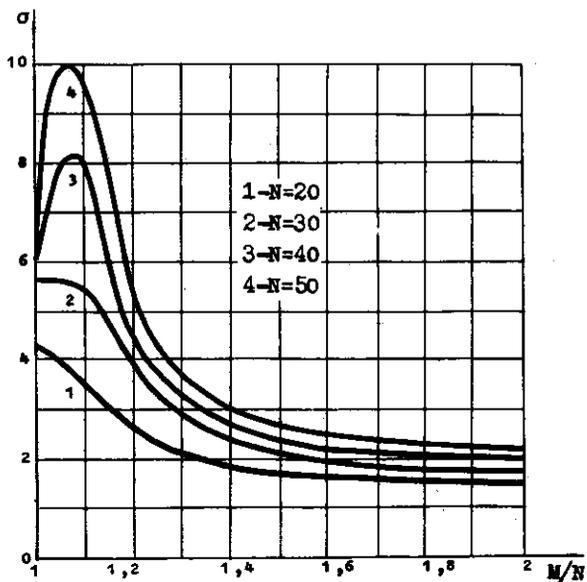


Рис. 4

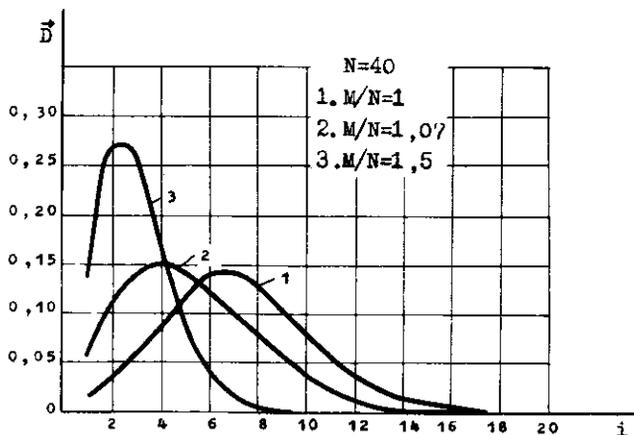


Рис. 5

Построение аналогичных зависимостей для $m(r^*)$ и σ (рис.3,4) также показывает их нелинейное изменение. Причем при $M/N \geq 1,5$ их значения близки к предельным. На рис.5 показаны вектор-коэффициенты дробления для различных уровней избыточности по каналам связи ($N = 40$). Здесь также наблюдается подобная зависимость.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. При организации функционирования распределенных ВС по типу живучей или структурно-избыточной системы можно повысить уровень готовности всех подсистем гораздо более, чем у отдельной элементарной машины.

2. При правильной организации структуры надежность свойства ВС приближаются к свойствам системы со структурой полного графа при относительно небольшом числе каналов связи. Для рассмотренных примеров это выполняется уже при отношении числа каналов связи к числу элементарных машин, равном 1,5.

3. Разработанный комплекс программ анализа надежностных свойств распределенных ВС позволяет исследовать системы произвольной структуры, содержащие до 500 ЭМ и 2500 каналов связи с различными коэффициентами готовности.

В заключение считаю необходимым выразить благодарность Корнееву В.В. и Малайко А.А. за ряд ценных советов и критических замечаний.

Л и т е р а т у р а

1. ЕВРЕЙНОВ Э.В., КОСАРЕВ Ю.Г. Однородные универсальные вычислительные системы высокой производительности. Новосибирск, "Наука", 1966.

2. ЕВРЕЙНОВ Э.В., ЖИРАТКОВ В.И. Распределенные вычислительные системы и особенности их построения. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 63. Новосибирск, 1975, с.109-120.

3. ВОРОБЬЕВ В.А., КОРНЕЕВ В.В. Некоторые вопросы теории структур однородных вычислительных систем. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 60. Новосибирск, 1974, с. 3-16.

4. ХОРОШЕВСКАЯ Э.Г. Функции готовности распределенных вычислительных систем. -В кн.: Вычислительные системы. Вып. 63, Новосибирск, 1975, с. 121-131.

5. КАРАЕВ Р.А., ЛЕВИН А.А. Сбор и передача информации в АСУ трубопроводами. М., "Энергия", 1975.

6. ВЕНТЦЕЛЬ Е.С. Введение в исследование операций. М., "Сов. радио", 1964.

7. ХОРОШЕВСКИЙ В.Г. О двух классах однородных универсальных вычислительных систем. -В кн.: Труды I Всесоюзной конференции по вычислительным системам. Новосибирск, "Наука", 1968, вып. I., с.70-84.

8. ЕВРЕЙНОВ Э.В., ХОРОШЕВСКИЙ В.Г. Однородные вычислительные системы. -В кн.: Вычислительные системы. Вып.58, Новосибирск, 1974, с. 32-60.

9. ВОЛКОВ Ю.М. Программа анализа надежности связанных систем. Информационный листок Новосибирского ЦНТИ № 89-77.

10. WILSON R.S. Design of computer networks based on a new reliability measure.- In: Proc.Symp.Comput.-Commun Networks and Teletraffic, New York, 1972, Brooklyn, N.Y., 1972, p. 371-384.

11. ВОЛКОВ Ю.М., ЖИРАТКОВ В.И. Некоторые вопросы организации связи в распределенных вычислительных системах. -В кн.: Вычислительная техника. Сб. научных трудов ЦНТИ. Новосибирск, 1974, с.39-43.

Поступила в ред.-изд.отд.
14 июня 1977 года