

УДК 50.43

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИДАНИЯ ПРОСТЕЙШИМ ОДНОРОДНЫМ СРЕДАМ СВОЙСТВ ПОВЫШЕННОЙ ЖИВУЧЕСТИ

В. К. Габелко

Научно-производственное объединение "Алмаз", Москва, Россия

Введено понятие простейшей однородной среды. Дано определение повышенной ее живучести. Утверждается, что для достижения указанной живучести рассматриваемую среду необходимо строить на элементах с определенной спецификой. Рассмотрены и проанализированы варианты использования в этих целях элементов трех разных типов.

Технические устройства, именуемые однородными средами (системами^{*}), строятся по типу т. н. итеративных цепей, основными признаками которых являются конструктивная однородность элементов, однородность соединений между элементами, возможность наращивания схемы путем присоединения к крайним элементам новых. При этом под элементом среды понимается минимально возможная ее доля, способная выполнять в соответственно меньшем масштабе функции, возлагаемые на среду в целом. Естественно, что число элементов в составе среды должно быть не менее двух.

Последствия отказов отдельных элементов среды рассматривают обычно с позиций проявления ею свойств живучести или отказоустойчивости. Системы, выполненные в виде однородных сред, благодаря указанным свойствам могут обеспечивать приемлемый уровень работоспособности, даже когда сохраняется лишь часть исходной системы.

Вопросам построения и анализу функционирования однородных сред посвящено немало количество монографий и статей [1].

В настоящей статье ряд понятий и представлений, касающихся однородных сред, отличается от традиционных. В частности, вводятся понятия простейшей однородной среды и повышенной живучести, причем живучесть трактуется как свойство более широкого смысла, чем отказоустойчивость. Показано, что живучесть, провозглашаемая во многих публикациях лишь декларативно, может быть описана аналитически и проиллюстрирована графически. Значительная часть статьи посвящена изложению принципов, на основе которых возможна реализация повышенной живучести описываемых сред.

Итак, будем называть простейшей такую однородную среду, функционирование которой представляет собой результат простого суммирования функций отдельных ее элементов. Полагаем, что среда не может называться простейшей, если в ней осуществляется какой-либо обмен информацией между элементами. В то же время понятию "простейшей" не противоречит наличие централизованного управления режимами работы элементов среды (со стороны некоторого ядра).

Живучесть однородной среды рассматриваемого типа показана графически на рис. 1, где N — исходное число элементов среды; n — число отказавших элементов; Φ — способность среды выполнять заданные функции.

Полагаем также, что каждый элемент среды может быть либо в полностью исправном состоянии, либо в неисправном. Переход элемента из исправного состояния в неисправное считаем скачкообразным. С учетом сказанного среда может иметь три состояния:

при $\Phi = 1$ она полностью работоспособна, т. е. выполняет заданные функции в полном их объеме;

* Далее для краткости и среды, и системы — просто среда.

при $0 < \Phi(n/N) < 1$ заданные функции выполняются частично;
при $\Phi = 0$ среда целиком неработоспособна.

Зависимость $\Phi(n/N)$ — это, вообще говоря, совокупность точек. Однако смысл данной зависимости не изменится, если каждую пару соседних точек соединять отрезками прямых. Вместо совокупности точек получим ломаную линию. В случае неоднозначных зависимостей будут видны физически осуществимые пути перехода из одной точки в другую, а при $N \rightarrow \infty$ ломаная превращается в плавную кривую. Далее для простоты будем называть все зависимости $\Phi(n/N)$ кривыми.

Разделим все множество реально представимых кривых $\Phi(n/N)$ на два класса: с монотонным убыванием $\Phi(n/N)$ по мере возрастания n/N , начиная с его первого значения $1/N$ до значения n/N , равного заданному; в пределе до значения $(N-1)/N$ — см. рис. 2, а, где для примера взят случай $N=5$;

с горизонтальным участком вида $\Phi = 1$ протяженностью от 0 до заданного значения n/N (см. рис. 2, б).

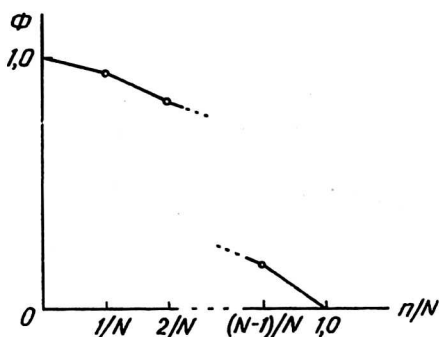


Рис. 1. Общий характер снижения способности среды выполнять заданные функции по мере увеличения числа отказов ее элементов

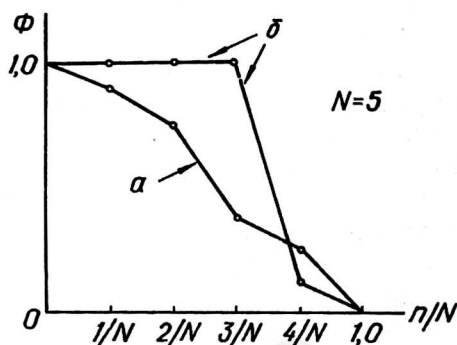


Рис. 2. Типовые разновидности реакций среды на отказы ее элементов: а — в варианте живучести; б — в варианте отказоустойчивости

Примем, что зависимость “а” иллюстрирует живучесть, а зависимость “б” — отказоустойчивость среды. Иначе говоря, полагаем, что живучесть среды — это ее свойство реагировать на возрастающее число отказов элементов постепенным снижением возможностей выполнять заданные функции. В свою очередь, отказоустойчивость — это свойство среды сохранять способность к выполнению заданных функций несмотря на отказы оговоренного числа элементов.

Таким образом, отказоустойчивость в данной трактовке — это частный случай живучести.

Один из возможных вариантов выполнения среды со свойствами живучести — функционально единая группа параллельно действующих элементов, каждый из которых вносит одинаковую долю в общую заданную функцию среды и не подвергается какому-либо управлению со стороны. Реакция такой среды на возрастание отношения n/N описывается, как правило, линейным законом $\Phi(n/N)$. Живучесть, отображаемую линейным законом, считаем тривиальной.

Введем понятие “повышенная живучесть”. Живучесть считается повышенной, если точки отображающей ее зависимости располагаются выше точек линейного закона. Превышение над линейным законом может иметь место лишь для части диапазона n/N . В таком случае речь должна идти о повышенной живучести на интересующем нас участке значений n/N .

Для того чтобы простейшая среда обладала повышенной живучестью, необходимо строить ее на элементах с некоторыми специфическими свойствами [2]. К числу

последних отнесем наличие у элемента резерва мощности (производительности) или высокую повторяемость (массовость) элементов в случае их информационной зашумленности, или же отличие элементов друг от друга по массе (значимости, рангу).

Рассмотрим варианты выполнения сред с повышенной живучестью на элементах указанных типов.

СРЕДЫ НА ЭЛЕМЕНТАХ С РЕЗЕРВОМ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Пусть в качестве таких элементов используются вычислительные модули (ВМ). образуем из них среду, состоящую из N одинаковых ВМ и некоторого ядра. На каждый ВМ возлагается отдельная подзадача. Все они образуют в итоге задачу, решаемую средой.

Примем, что длительность рабочего цикла $T_{ц}$ одинакова у всех ВМ и состоит из двух долей. В течение одной из них выполняются штатные программы, в течение другой — фоновое тестирование ВМ. Под резервом производительности любого из ВМ понимается возможность увеличивать (в пределах $T_{ц}$) время выполнения штатных программ за счет уменьшения времени фонового тестирования.

Обозначим через $P_{исх}$ производительность одного ВМ в условиях, когда все ВМ, входящие в состав среды, исправны. По мере выхода из строя отдельных ВМ остающиеся исправные должны увеличивать свою производительность за счет использования указанного резерва. Функции обнаружения отказов и принятие решений по их "нейтрализации" возлагаются, естественно, на ядро системы, в состав которой входит среда.

Максимально возможную производительность ВМ обозначим через $P_{макс}$. Пусть переход от $P_{исх}$ к $P_{макс}$ происходит равными долями величиной ΔP каждая при числе ступеней N . В частности, при $N = 4$ зависимость $P = f(n/N)$ имеет четыре ступени (рис. 3). Исходной является ступень 1. При отказе одного из ВМ происходит перевод оставшихся исправных на ступень 2, при отказе двух ВМ — на ступень 3, при отказе трех — на ступень 4.

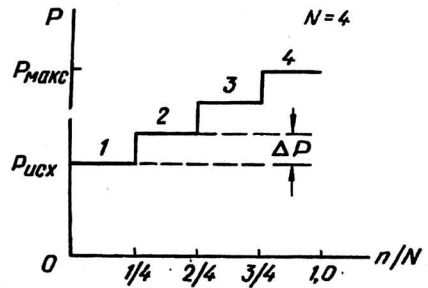


Рис. 3. График возрастания производительности каждого неотказавшего элемента среды по мере увеличения числа отказавших ВМ

При выборе величины ΔP могут быть приняты во внимание различные соображения, в частности, потребуем, чтобы при отказе одного ВМ остающиеся $N-1$ исправных обеспечивали бы после перевода их на ступень 2 в сумме ту же производительность, что и до этого N модулей.

Требование запишем в виде

$$(P_{исх} + \Delta P) (N - 1) = P_{исх} N.$$

Отсюда

$$\Delta P = \frac{P_{исх}}{N - 1} \quad \text{и} \quad P_{исх} = \frac{1}{2} P_{макс}.$$

Среда, все ВМ которой исправны, имеет производительность

$$P(0) = P_{исх} N. \tag{1}$$

Если же в составе среды имеется n отказавших ВМ, то производительность $P(n/N)$ будет определяться выражением

$$P(n/N) = (P_{\text{исх}} + n \Delta P) (N - n) = P_{\text{исх}} N \left(1 - \frac{n}{N}\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \frac{n}{N}\right). \quad (2)$$

Введем показатель способности среды выполнять заданные функции $\Phi_p(n/N)$ в виде

$$\Phi_p(n/N) = \frac{P(n/N)}{P(0)}.$$

С учетом (1) и (2) находим

$$\Phi_p(n/N) = \left(1 - \frac{n}{N}\right) \left(1 + \frac{N}{N-1} \frac{n}{N}\right). \quad (3)$$

Для случая $N = 4$ показатель (3) представлен графиком на рис. 4; а. Из рис. 4, а видно, что среда обладает повышенной живучестью. Для сравнения штрих-пунктиром изображен линейный закон живучести. В ситуациях, когда отказывает один ВМ, среда проявляет свойства отказоустойчивости, так как $\Phi(1/4) = 1$. При $N \rightarrow \infty$ будем иметь

$$\Phi_p'(n/N) = 1 - \left(\frac{n}{N}\right)^2. \quad (4)$$

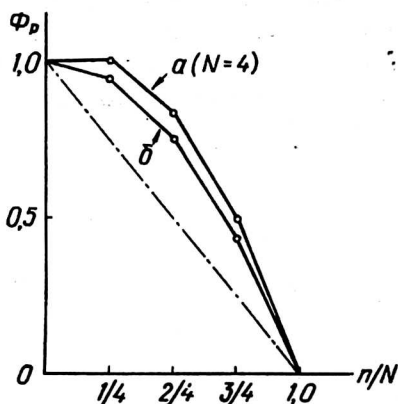


Рис. 4. Зависимости, отображающие повышенную живучесть среды на элементах с резервом производительности:
а — при $N = 4$; б — при $N \rightarrow \infty$

Зависимость (4) выполнена на рис. 4, б. Конкретное значение n/N , равное, например, $1/4$, следует читать не как “один элемент из четырех”, а как “четверть всех элементов”.

СРЕДЫ НА МАССОВЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Возможность проиллюстрировать свойства среды, выполненной на массовых элементах, предоставляет нам голография.

Пусть в качестве среды этого типа фигурирует голограмма с записанной на ней информацией. Число элементов подобной среды обычно настолько велико, что не представляется возможным пронумеровать их. Отсюда и понятие “массовость элементов”. Размеры же элементов могут интересовать нас только с позиций оценки разрешающей способности голограммы. Рассмотрим задачу восстановления записанной на голограмме информации.

Массовость элементов сочетается в голограмме с их информационной зашумленностью вследствие зернистости фотослоя. При считывании информации с одного элемента голограммы отношение сигнал/шум очень мало. Но голограмма в целом может обеспечить вполне удовлетворительное превышение сигнала над шумом с помощью широко применяемого в радиотехнике интегрирования сигналов и шумов, когда сигнал — когерентен, а шум — белый. Считаем, что сигнал во всех элементах голограммы одинаков, а “шумы” беспорядочно изменяются от элемента к элементу. Поэтому сигналы можно суммировать непосредственно, а “шумы” — под знаком квадратного корня.

Опуская промежуточные выкладки, приведем окончательное выражение для показателя $\Phi_r(n/N)$, характеризующего пригодность голограммы для целей восстановления информации

$$\Phi_r(n/N) = \sqrt{1 - \frac{n}{N}}, \tag{5}$$

где дробь n/N количественно указывает, какая доля общей площади голограммы выведена по каким-либо причинам из строя.

В соответствии с (5) строим график в осях $\Phi_r \div n/N$ (рис. 5). Из графика видно, что и в данном случае имеет место повышенная живучесть.

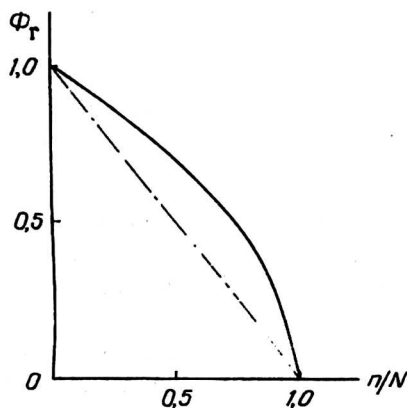


Рис. 5. Зависимость, отображающая повышенную живучесть среды на массовых элементах

Обратим внимание на кажущееся отсутствие у среды данного типа механизма обнаружения дефектов в голограмме и принятия соответствующих мер по противодействию этим дефектам. В действительности, среда как объект — это и голограмма, и потребитель голограммы, т. е. потребитель восстановленной информации. И если ее качество ухудшается, то потребитель принимает соответствующие меры, увеличивая, например, время прочтения информации или предпринимая другие целенаправленные действия.

СРЕДЫ НА ЭЛЕМЕНТАХ С РАЗНЫМИ ВЕСАМИ

Положим, что элементами среды являются вычислительные модули ВМ одного и того же типа и что задача, решаемая средой, допускает иерархическое разбиение на N подзадач, ценность каждой из которых отличается от ценности любой другой подзадачи данного разбиения.

В качестве примера рассмотрим случай, когда количество подзадач равно двум, а их условные ценности соотносятся как 1 и 2, где 2 означает более высокую ценность, чем 1. Тогда условный вес ВМ, решающего подзадачу 2, будем считать вдвое большим, чем вес ВМ, решающего подзадачу 1. Последствия отказа одного из них не будут при этом равны последствиям отказа другого.

Для оценки живучести такой среды придется оперировать с двумя зависимостями $\Phi(n/N)$, получающимися в результате расщепления линейного закона на выпуклую и вогнутую составляющие (рис. 6, а). Выпуклая составляющая отображает повышенную живучесть, вогнутая — живучесть, уступающую линейной. С ростом числа подзадач расщепление зависимости $\Phi(n/N)$ приобретает более сложный вид. Например, для случая трех подзадач с иерархией их ценностей вида 1 — 2 — 3 имеем картину, представленную на рис. 6, б, здесь, помимо выпуклой и вогнутой составляющих, имеются составляющие промежуточного вида.

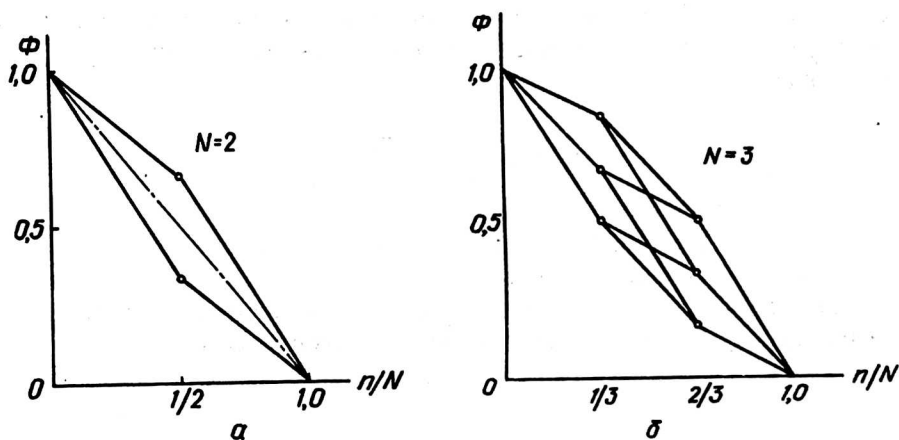


Рис. 6. Реакция среды, выполненной на элементах с разными весами, на отказы этих элементов:
а — при $N=2$, б — при $N=3$

Поскольку отказы ВМ равновероятны, то складывается впечатление, что ВМ в роли элементов с разными весами менее выгодны, чем элементы с резервом производительности и чем массовые элементы. Однако у элементов с разными весами есть свои преимущества.

Одно из преимуществ — возможность увеличения степени расщепления на выпуклую и вогнутую составляющие кривой $\Phi(n/N)$ путем увеличения разницы между весами элементов. При этом получается картина живучести, как бы отвечающая принципу: “Нельзя крупно выиграть, не рискуя крупно проиграть”. По-видимому, использование данного принципа сыграло немаловажную роль в ходе биологической эволюции.

Другое преимущество — возможность превращения выпуклой кривой в основную характеристику среды.

Чтобы реализовать указанную возможность, необходимо обеспечить превышение надежности элемента с превосходящим весом над надежностью элемента с меньшим весом. Добиться этого можно разными способами.

Согласно одному из способов среда выполняется в виде, представленном на рис. 7 в варианте решения двух подзадач с весами 1 и 2. В ее основе — две однотипные интегральные схемы: ИС1 и ИС2. Каждая из них представляет собой твердотельный монолитный кристалл, разделенный лишь функционально на две доли. Поведение этих долей в смысле исправности или неисправности может быть двояким: либо они отказывают как одно целое, либо — независимо одна от другой. Первый случай говорит о наличии корреляции между отказами отдельных долей ИС, второй — об отсутствии таковой.

Среда, представленная на рис. 7, выполнена в расчете на наличие указанной корреляции. Поэтому ВМ2 основной и ВМ2' резервный размещены в разных ИС, что является принципиальным моментом в построении среды. Из расчета на нали-

чие той же корреляции строится и контроль исправности ИС2, одна из долей которой подвергается только тестированию. При непрохождении теста переключатель П переводится во второе возможное положение по сравнению с изображенным на рис. 8.

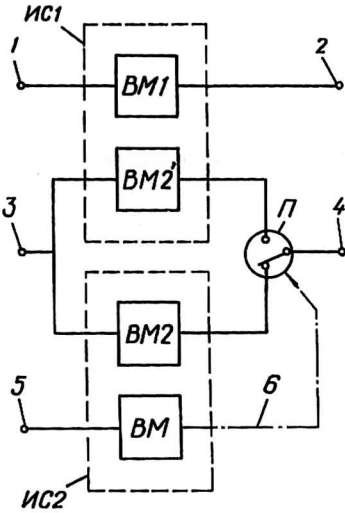
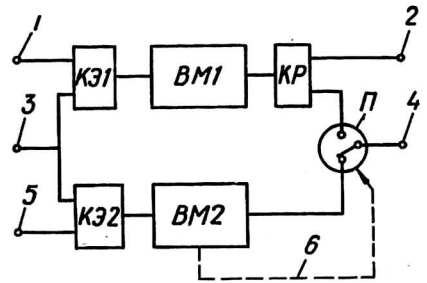


Рис. 7. Среда на двух однотипных ИС (ИС1 и ИС2) с использованием корреляции "по месту":

- 1 — вход 1-й подзадачи; 2 — выход 1-й подзадачи;
- 3 — вход 2-й подзадачи; 4 — выход 2-й подзадачи;
- 5 — вход тестовой последовательности; 6 — команда переключения на резерв; П — переключатель

Рис. 8. Среда с использованием корреляции "по времени":

- 1 — вход 1-й подзадачи; 2 — выход 1-й подзадачи;
- 3 — вход 2-й подзадачи; 4 — выход 2-й подзадачи;
- 5 — вход тестовой последовательности; 6 — команда переключения на резерв; П — переключатель



С увеличением степени корреляции увеличивается и вероятность функционирования среды в соответствии с выпуклой (см. рис. 6) зависимостью $\Phi(n/N)$, аналитическое выражение для которой имеет вид

$$\Phi_{\text{ВМ}}(n/N) = 1 - \frac{2^n - 1}{2^N - 1}.$$

Другой возможный способ построения сред на ВМ с разными весами (с достижением повышенной живучести) — использование временной связи между процессами тестирования и штатного функционирования. Данный способ не требует применения ИС с независимыми функциональными узлами в одном кристалле и с сильной корреляцией между отказами этих узлов. По-прежнему берем в качестве примера вычислительный процесс, допускающий разбиение на две подзадачи с весами 1 и 2. Структура среды изображена на рис. 8.

Решение подзадач осуществляется модулями ВМ1 и ВМ2. Рабочий цикл каждого из них разбит на две фазы: ВМ1 решает в первой фазе подзадачу 1, во второй фазе — подзадачу 2. Переключение подзадач производится коммутационным элементом КЭ1. Через ВМ2 в первой фазе прогоняется тест, во второй — подзадача 2. Соответствующее переключение производится коммутационным элементом КЭ2. В случае непрохождения теста через ВМ2 последний выдает команду, переводящую переключатель П в положение, при котором результаты решения подзадачи 2 берутся с выхода ВМ1 и через коммутатор-распределитель КР и переключатель П поступают на выход устройства.

Таким образом, подзадача 2-го уровня (старшего) решается одновременно на двух ВМ, один из которых для нее — основной (ВМ2), другой — резервный (ВМ1). Вместо корреляции “по месту” здесь используется корреляция “по времени”: каждому циклу работы ВМ2 предшествует тестирование этого модуля на предмет проверки его исправности. В результате надежность решения подзадачи 2 превышает аналогичную надежность для подзадачи 1. Среда работает в соответствии с выпуклой составляющей (см. рис. 6).

Таким образом, показаны лишь принципиальные технологические возможности придания простейшим однородным средам свойств повышенной живучести. Эти возможности в значительной мере определяются спецификой элементов, на базе которых выполняется среда. Отмечена также необходимость наличия в составе среды механизма обнаружения дефектов различного рода и соответствующего противодействия им. Правда, этот механизм несколько своеобразен в случае использования для построения среды массовых элементов.

Литература

1. *Хорошевский В. Г.* Инженерный анализ функционирования вычислительных машин и систем. — М.: Радио и связь, 1987.
2. *Габелко В. К.* Вопросы обеспечения живучести и отказоустойчивости цифровых устройств. — М.: ГОНТИ, 1990. — 64 с.

ON THE POSSIBILITY OF IMPARTING HIGHER SURVIVABILITY FEATURES TO THE SIMPLIEST HOMOGENEOUS MEDIA

V. K. Gabelko

Scientific Industrial Corporation "Almaz", Moscow, Russia

A concept of the simplest homogeneous medium is introduced. Determination of its increased survivability is presented. It's stated that to achieve the survivability given it's necessary to create the discussed medium based on the components with a certain specificity.

For this purpose the application of three different types of elements has been discussed and analysed.