В. О. Чуканов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО БЕЗОПАСНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С КОМБИНИРОВАННЫМ РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ

Актуальной проблемой при проектировании функционально безопасных информационно-вычислительных систем (ИВС) является повышение их надежности.

Одним из эффективных и широко распространенных способов обеспечения надежности является введение структурной избыточности или резервирования. Появление СБИС, микропроцессоров и микроЭВМ открыло большие возможности для более рационального использования избыточного оборудования в резервированных ИВС. Наличие однородности, шинная организация, а также модульность и микропрограммируемость привели к широкому распространению ИВС с резервированием. Основные классы таких систем следующие: системы с комбинированным резервированием (КР), резервированием замещением, постоянным резервированием.

Комбинированным резервированием называется резервирование, основанное на сочетании методов резервирования замещением (РЗ) и постоянного резервирования (ПР) [1]. Можно выделить из методов комбинированного резервирования гибридное резервирование (ГР) (мажоритарное ядро с резервом), параллельно-гибридное резервирование (ПГР) (несколько однородных мажоритарных ядер и общий скользящий резерв), итеративное резервирование (ИР) (методы резервирования вложены один в другой) (Рис. 1) [2].

Резервирование замещением делится на фиксированное резервирование (ФР) и скользящее резервирование (СР).

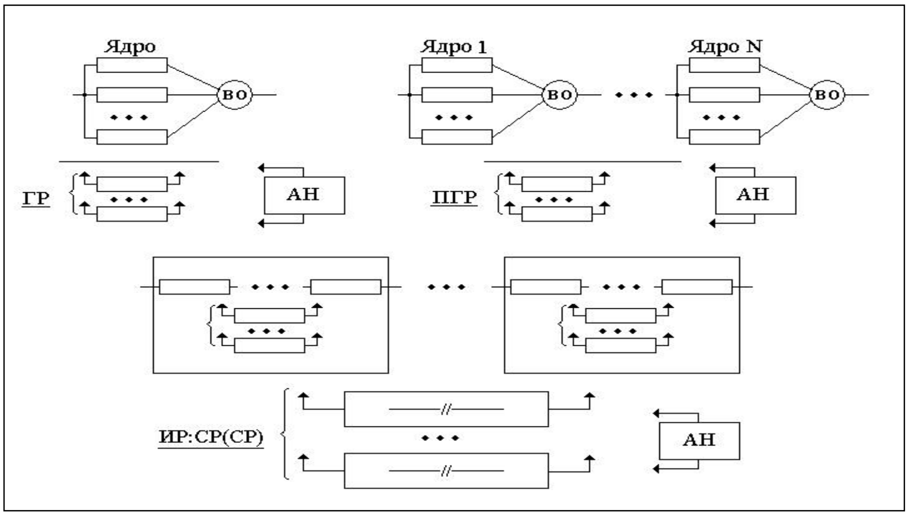

Рис. 1. Методы комбинированного резервирования

Рассмотрим задачу оптимального резервирования для случая, когда необходимо определить параметры устройства ИВС с КР (уровни, кратности резервирования на различных уровнях вложения для ИР, параметры систем контроля и т. д.) и обеспечить при этом требования технического задания по нескольким критериям (вероятности безотказной, функционально безотказной работы, вероятность решения пакета задач, среднее время безотказной работы и т. д.) и ограничениям (объем оборудования, габаритные характеристики, рассеиваемая мощность и т. д.), заданным в виде равенств.

Пусть: $\{x_i\}$, $i \in \overline{1,n}$, — вектор искомых параметров;

$\varphi(x_1,..,x_n)$, $i \in \overline{1,\alpha}$, — функционалы, отражающие зависимость критериев от искомых параметров;

$\varphi_i(x_1,..,x_n)$, $i \in \overline{\alpha+1,m}$, — функционалы, отражающие зависимость ограничений от искомых параметров;

α — количество критериев;

$(m - \alpha)$ — количество ограничений.

Например, для ИР [СР (СР)] с двумя уровнями вложения на обоих уровнях используется СР, если ИВС состоит из r устройств, вероятность безотказной работы определяется выражением:

$$\varphi_1 = \prod_{j=1}^{r} P_j(x_j^1, y_j^1, x_j^2, y_j^2),$$

где $x^1_j(x^2_j)$ — уровень резервирования на 1-м (2-м) уровне вложения; $y^1_j(y^2_j)$ — кратность резервирования на 1-м (2-м) уровне вложения; P_j определяется с учетом параметров схем контроля, реконфигурации; вероятностей обнаружения ошибок, реконфигурации; структуры и т. д.

Переобозначим переменные:

$\{x^1_j, y^1_j, x^2_j, y^2_j\}=\{x_1,..,x_n\}$,

где $n=4r$.

Пусть $\alpha=1$, $m=2$, тогда объем оборудования резервированной системы определяется:

$$\varphi_2 = \sum_{j=1}^{r} G_j(x_j^1, y_j^1, x_j^2, y_j^2),$$

где G_j — функция, отражающая зависимость объема j-го устройства в корпусах от искомых параметров.

В общем случае задача формулируется следующим образом.

Найти такие $\{x_j\}$, чтобы обеспечить параметры f_j (заданная вероятность безотказной, функционально безотказной работы, заданная вероятность решения пакета задач за заданное время и т. д., а также заданный объем оборудования, вес, габариты и т. д.) из технического задания, т. е. необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{cases} \varphi_1(x_1,\ldots,x_n) = f_1 \\ \varphi_2(x_1,\ldots,x_n) = f_2 \\ \qquad \ldots \\ \varphi_m(x_1,\ldots,x_n) = f_m. \end{cases}$$

Эта система, вообще говоря, несовместна при $m<n$, и для известных величин ищутся наиболее вероятные значения. Наиболее вероятные значения неизвестных можно определить при условии, если сумма квадратов отклонений будет наименьшей (метод наименьших квадратов [3]):

$$\varepsilon_i = \varphi_i - f_i;$$

$$H = \sum_{i=1}^{m} \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^{m} (\varphi_i - f_i)^2 \to \ min.$$

Это справедливо, если все значения имеют одинаковую точность, в противном случае целесообразно использовать выражение:

$$\overline{H} = \sum_{i=1}^{m} \left(\frac{\varphi_i - f_i}{d_i}\right)^2 \to \ min,$$

где d_i — среднеквадратическая погрешность при вычислении φ_i.

Например, если $\varphi_i=Q(t)$ — вероятность отказов, то $d_i \le (0,3 \div 0,4)Q(t)$, что следует из анализа погрешностей при вычислении $Q(t)$.

В ряде случаев на переменные x_n могут накладываться дополнительные ограничения в виде неравенств:

$x_u \le x_{u з д а т}$, $u \in \overline{1,\beta}$, $\beta \le n$.

В этом случае можно ввести штрафную функцию и целевая функция $\overline{H}$ будет иметь вид [4]:

$$\overline{H}=\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{\varphi_i-f_i}{d_i}\right)^2+S\sum_{u=1}^{\beta}\frac{1}{x_u-x_{uизд}}\rightarrow\ min,$$

где S — коэффициент, определяющий сходимость алгоритма при оптимизации.

Итак, в общем виде задача формулируется следующим образом:

$\{x_1,..,x_n\}$ — ? $\overline{H}\{x_1,..,x_n\}\rightarrow min.$

Анализ методов оптимизации — Хука—Дживса, Нелдера—Мида, Пауэла, стохастической оптимизации — позволил сделать вывод, что наиболее эффективным методом является метод Пауэла [5], который при некоторых условиях (в том числе на выпуклость функции) позволяет найти оптимум за n шагов. В данной статье этот метод использовался для решения поставленной задачи. Рассмотрим модификацию метода с ориентацией на реализацию его на ЭВМ. При больших значениях n множество $\{x_i\}$ разбивается на 2 группы — первичные переменные и вторичные переменные:

$\{x_i^п\}$, $i\in\overline{1,\rho}$ — первичные;

$\{x_i^в\}$, $i\in\overline{\rho+1,n}$ — вторичные.

Разбиение может определяться важностью параметров при надежностном проектировании.

В этом случае предлагается следующий машиноориентированный алгоритм оптимизации:

1. Вторичные переменные выбираются случайным образом из диапазона:

$x_{i\min}^в<x_i^в<x_{i\max}^в$

в соответствии с равномерным законом распределения.

2. Минимизируется функция методом Пауэла:

$$\overline{H}=\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{\varphi_i-f_i}{d_i}\right)^2+S\sum_{u=1}^{\beta_п}\frac{1}{x_u^п-x_{uзад}^п}\rightarrow\ min,$$

где $\beta п$ — количество первичных переменных, для которых есть ограничения в виде неравенств:

$\beta_в=\beta-\beta_п$ — количество вторичных переменных, для которых есть ограничения в виде неравенств,

$x_{u\ \max}\leq x_{uзад}$.

Если $\beta=0$, то:

$$\overline{H}=\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{\varphi_i-f_i}{d_i}\right)^2\rightarrow\ min. \tag{1}$$

В результате находим первичные переменные

$\{x_i^п\}$.

3. Фиксируются первичные переменные.

4. На основе метода Пауэла находятся вторичные переменные

$\{x_i^в\}$:

$$\overline{H}=\sum_{i=1}^{m}\left(\frac{\varphi_i-f_i}{d_i}\right)^2+S\sum_{u=1}^{\beta_в}\frac{1}{x_u^в-x_{uзад}^в}\rightarrow\ min.$$

При $\beta=0$ функция имеет вид (1).

5. Фиксируются вторичные переменные.

6. Проверяются условия окончания работы алгоритма по одному из соотношений:

а) $|\overline{H}^l-\overline{H}^{l-1}|<\Delta_1$;

б) $|\varphi_i^l-\varphi_i^{l-1}|<\Delta_2$, $i\in\overline{1,m}$;

в) $|x_i^l-x_i^{l-1}|<\Delta_3$, $i\in\overline{1,n}$.,

где l — номер итерации; Δ_i — погрешность вычисления соответствующих значений, $i\in\overline{1,3}$.

Соотношение а) носит интегральный характер, б) и в) — дифференциальный. Возможны комбинации всех трех условий.

7. Если условие окончания работы выполняется, то конец работы алгоритма, иначе — переход к пункту 1.

Рассмотрим вопросы сходимости алгоритма:

1) В [6] показывается, что для ИВС с КР φ_i — выпуклые функции (доказано на основе матрицы Гессе — матрицы вторых частных производных).

2) Рассмотрим случай m=1 — один критерий.

3) Пусть $\beta = 0$ — нет ограничений в виде неравенств.

4) Переменные не делятся на первичные и вторичные.

5) $\overline{H}$ — выпуклая функция (исследовалась с помощью матрицы Гессе для высоконадежных ИВС).

В этом случае алгоритм сводится к методу Пауэла и, как показано в [5], сходится к оптимуму n шагов.

Итак, если выполняются условия 1)—5), алгоритм дает оптимальное значение. В противном случае дает приближенное значение, но позволяет гибко варьировать временем решения на ЭВМ, что важно при итеративном характере надежностного проектирования.

Данный алгоритм реализован в диалоговой системе «Петро» для IBM PC.

Заключение

В статье рассмотрена проблема повышения безопасности ИВС на основе резервирования. Формализована задача синтеза безопасных ИВС по критериям надежности. Определяются такие параметры, как уровни и кратности резервирования, параметры систем контроля и т. д. При решении задачи синтеза обеспечиваются требования по критериям: вероятность безотказной работы (функционально безотказной работы), среднее время безотказной работы, вероятность решения пакета задач и т. д. Предложен оригинальный метод решения задачи оптимального резервирования, который использовался на практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Козлов Б. А., Ушаков И. А.* Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М: Советское радио, 1975. — 472 с.

2. *Чернышев Ю. А., Чуканов В. О.* Повышение надежности изделий электронной техники на основе комбинированного резервирования // Электронная промышленность. 1982. Вып. 2 (108). С. 37—39.

3. *Бронштейн И. Н., Семендяев К. А.* Справочник по математике. М., Л.: ОГИЗ, Гостехиздат, 1948. — 556 с.

4. *Зангвилл У. И.* Нелинейное программирование. М.: Советское радио, 1973. — 312 с.

5. *Банди Б.* Введение в методы оптимизации. М., 1976.

6. *Чуканов В. О.* Некоторые вопросы надежностного проектирования специализированных ЭВМ с комбинированным резервированием. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: МИФИ, 1980. — 224 с.