

И. В. Бурдышев
Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЗА СЧЕТ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ

В сферах с повышенным требованием безопасности задачи повышения надежности актуальны. Часто в таких сферах надежность достигается за счет резервирования вычислительных каналов. Методы резервирования применяются различные и имеют различную избыточность, и соответственно стоимость. Такие ограничения, как например стоимость, подталкивают разработчиков находить оптимальные решения. Поэтому широкое распространение получили задачи оптимизации. Предлагается оптимальное перераспределение интенсивности отказов между резервированными блоками, которое способствует оптимальному выигрышу в надежности.

Ключевые слова: надежность, резервирование, проблемы распределения избыточности, интенсивность отказов.

I. V. Burdyshev
Perm National Research Polytechnic University, Perm

INCREASING RELIABILITY BY REALLOCATING THE FAILURE RATES

In areas with increased safety requirements, the tasks of increasing reliability are relevant. Often in such areas, it is achieved through redundant computing channels. Redundancy methods are used in different ways and have different redundancy and, accordingly, cost. Constraints such as cost push developers to find optimal solutions. Therefore, optimization problems have become widespread. An optimal redistribution of the failure rate between redundant blocks is proposed, which contributes to the optimal gain in reliability.

Keywords: reliability, redundancy, redundancy allocation problem, failure rate.

Введение. Одним из свойств, которыми характеризуются технические средства, является надежность (Reliability). Данное свойство определяется как способность объекта сохранять работоспособность, выполнять требуемые функции в пределах определенного времени [1]. Надежность может обеспечиваться отказоустойчивостью [2]. Отказоустойчивость достигается за счет введения избыточности в систему (увеличивается стоимость, вес, габариты и пр.) и может быть обеспечена с помощью резервирования (Redundancy). Наиболее распространено структурное резервирование, подразумевающее введение дополнительных элементов. Оно широко применяется там, где существуют высокие требования безопасности. [3]. Помимо методов резервирования для повышения надежности применяют методы снижения интенсивности отказов [4]. Далее рассмотрим основные методы структурного резервирования.

Методы структурного резервирования. Широкое распространение имеют методы мажоритарного резервирования, в которых достоверность результата определяется по принципу большинства. Наибольшее

распространение получило тройное модульное резервирование (triple modular redundancy, TMR) – выбор 2 из 3 [5]. Помимо данного метода, существуют методы мажоритирования с выбором 3 из 5, 4 из 7 и т. д. Для оценки надежности часто используют вероятность безотказной работы [6]. В общем случае для мажоритарных схем, с нечетным числом каналов, он будет равен (1):

$$P(t) = (e^{-\lambda t})^{2n-1} + \sum_{i=1}^{\frac{2n-1}{2}} \left\{ C_{2n-1}^i \left[(e^{-\lambda t})^{2n-1-i} (1 - e^{-\lambda t})^i \right] \right\} \quad (1)$$

где λ – интенсивность отказов элемента, n – параметр избыточности.

Существенно повышает надежность глубокое мажоритирование. В данном случае каналы делятся на несколько частей. Глубокое мажоритирование существенно повышает надежность, но при этом требуется более сложная аппаратура, стоимость системы увеличивается [6]. Вероятность безотказной работы (2):

$$P(t) = \left[3e^{-\frac{\lambda t}{k}} - 2e^{-\frac{3\lambda t}{k}} \right]^k \quad (2)$$

где k – число частей.

В отличие от методов мажоритарного резервирования, при резервировании замещением резервные элементы не задействованы в случае исправности основного элемента [3]. Это так называемый ненагруженный вид резервирования (3):

$$P(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^k \quad (3)$$

Еще одним видом резервирования является транзисторное расчетверение. При расчетверении требуется большей избыточности, чем при мажоритировании. Парировается один отказ или сбой в одном из четырех элементов, которыми могут быть и КМОП транзисторы и каналы [6, 7]. Вероятность безотказной работы равна (4):

$$P(t) = \left[e^{-4 \cdot n \cdot \lambda \cdot t} + 4e^{-3 \cdot n \cdot \lambda \cdot t} (1 - e^{-n \cdot \lambda \cdot t}) \right]^n \quad (4)$$

Так же активно развиваются методы селективного резервирования. Обеспечиваются полным резервированием лишь те части, которые наиболее подвержены отказам и являются наиболее значимыми для функционирования системы. Одним из таких методов является Selective TMR [8, 9]. Другой метод – Approximate Triple Modular Redundancy (ATMR) [10, 11]. При ATMR используются аппроксимированные логические схемы для создания резервных каналов.

Проблема повышения надежности путем структурного резервирования заключается в ограничениях избыточности, таких как стоимость, вес, габариты, производительность и т. д. Поэтому требуется нахождение оптимального решения. Широкое распространение получают задачи оптимизации (Reliability redundancy allocation problem (RRAP)) [12, 13]. Представляем задачу перераспределения интенсивности отказов с целью повышения надежности всей системы.

Постановка задачи. Есть система, которая состоит из n четного числа подсистем, соединенных последовательно. Надежность системы равна (5):

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) \quad (5)$$

Каждая подсистема может быть резервирована. Нам известно какую часть функций можно снять с одной подсистемы и перенести в другую. Знаем так же с какой надежностью она будет выполняться в той или иной подсистеме. Матрица коэффициентов, определяющих вес переносимых функций из одной подсистемы в другой имеет вид (6):

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} \\ a_{21} & \cdots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{nj} \end{pmatrix} \quad (6)$$

где i – номер подсистемы с которой снимается часть функций, j – подсистемы, в которые эти функции перераспределяются.

Перераспределению части функций из одной подсистемы в другую будет производиться с помощью выражения (7):

$$\lambda_j = A \cdot \lambda_i \quad (7)$$

Таким образом нужно найти пары подсистем, между которыми производится перераспределение этих функций, с целью увеличения надежности всей системы.

Оптимизация. Оптимизация связана с поиском экстремума математической функции. В данном случае это вероятность безотказной работы, которую необходимо увеличить. В качестве детерминированного алгоритма был применен метод обобщенного приведенного градиента, посредством пакета Microsoft Excel. В таблице 1, 2 представлен пример оптимизации системы с мажоритарным резервированием подсистем.

Таблица 1 – Исходные данные для TMR.

Номер подсистемы	$\lambda, 1/h \cdot 10^{-5}$
1	0,055
2	0,071
3	0,035
4	0,03
5	0,047
6	0,062

Таблица 2 – Результаты оптимизации для TMR.

Пары	Подсистема i	Подсистема j	$P_{in}(t)$	$P_{out}(t)$
1	1	4	0,956	0,961
2	6	3		
3	2	5		

Как видно из таблицы 2 найдены пары подсистем, между которыми производится перераспределение части функций. На рис. 1. представлены результаты оптимизации для схем, с резервированием замещением, 2 из 3, 3 из 5, с глубоким мажоритированием, транзисторным расчетверением и со смешанным резервированием.

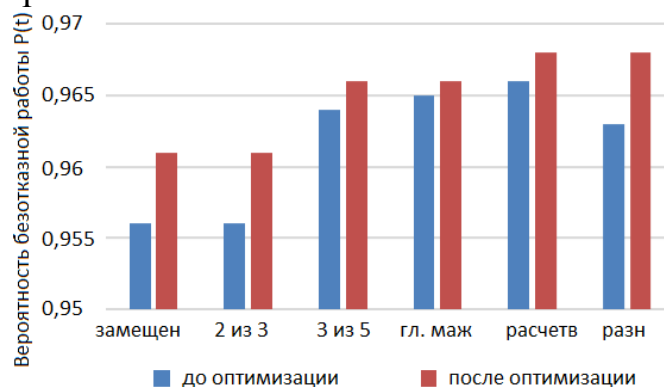


Рисунок 1 – Результаты оптимизации

Вывод. Таким образом повышение надежности возможно добиться благодаря грамотному распределению интенсивности отказов, то есть задач между разными подсистемами, что может дать выигрыш в стоимости и других показателях. Также возможно дальнейшее применение данной методики с целью выигрыша во времени работы подсистем, токовой нагрузки и других показателей.

Список литературы

1. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике Основные понятия. Термины и определения [Текст]. – Введ. 2017–03–01. – М.: Старнартинформ, 2016. – 23 с.
2. Avizienis A, Fault-Tolerant Systems, IEEE transactions on computers, vol. c-25, no. 12, december 1976.
3. Тюрин С.Ф. Надёжность систем автоматизации: учеб. пособие. Перм. нац. иссл. политехн. ун-т. — Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2012.-262 с.
4. Черкесов Г. Н. Надежность аппаратно-программных комплексов: учебное пособие / Г. Н. Черкесов. – СПб.: Питер, 2005. – 479 с. : ил
5. Тюрин С. Ф. Обеспечение надежности технических средств путем их троирования и расчетверения // Надежность. 2019. Т. 19. № 1. С. 4–9.
6. Тюрин С.Ф. Ланцов В.М. Дискретная математика & математическая логика. Перм. нац. ис-след. политехн. ун-т. — Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2013.-271 с. УМО.
7. Тюрин С.Ф., Греков А.В., Громов О.А., Греков А.В., Сулейманов А.А. Анализ методов обеспечения пассивной отказоустойчивости цифровых устройств и систем // Вестник ПГТУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2011. № 5. С. 143–153.
8. Albandes, I.; Serrano-Cases, A.; Martins, M.; Martínez-Álvarez, A.; Cuenca-Asensi, S.; Kastensmidt, F.L. Design of approximate-TMR using approximate library and heuristic approaches. Microelectron. Reliab. 2018, 88, 898–902.

9. Arifeen, T.; Hassan, A.S.; Moradian, H.; Lee, J.A. Input Vulnerability-Aware Approximate Triple Modular Redundancy: Higher Fault Coverage, Improved Search Space, and Reduced Area Overhead. *Electron. Lett.* 2018, 54, 934–936.
10. Sánchez-Clemente, A.J.; Entrena, L.; García-Valderas, M. Partial TMR in FPGAs using approximate logic circuits. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2016, 63, 2233–2240.
11. Polian, I.; Hayes, J.P. Selective hardening: Toward cost-effective error tolerance. *IEEE Des. Test Comput.* 2011, 28, 54–63.
12. M. S. Chern, "On the computational complexity of reliability redundancy allocation in a series system." *Operations research letters* 11.5 (1992): 309-315.
13. R. Bulfin, C. Y. Liu. "Optimal allocation of redundant components for large systems." *Reliability, IEEE Transactions on* 34.3 (1985): 241-247.

Сведения об авторах

Бурдышев Иван Васильевич – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, email: iburdyshev@mail.ru

Aboutn the authors

Burdyshev Ivan Vasilievich – post-graduate student of the Department of Automation and Telemechanics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, email: iburdyshev@mail.ru