УДК 681.32:65.012.122

Леонтьев А.С., к.т.н., ст. научный сотрудник
доцент кафедры математического обеспечения и стандартизации информационных технологий
МИРЭА – Российский технологический университет
Россия, г. Москва
ORCID: 0000-0003-3673-2468
Тимошкин М.С.
магистрант
МИРЭА – Российский технологический университет
Россия, г. Москва
ORCID: 0000-0003-1842-8331

МЕТОДИКА ВЫБОРА КОНТРОЛЬНЫХ ТОЧЕК ПРИ РЕШЕНИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗАДАЧ

Аннотация: разработана методика выбора рационального числа контрольных точек при решении функциональных задач в вычислительных комплексах со структурной избыточностью. Рассмотрены функциональные уравнения для оценки времени выполнения задачи с контрольными точками в условиях возникновения отказов и сбоев. Показано, что рациональный выбор контрольных точек можно производить, рассматривая решение задачи на нерезервированной структуре. При этом получаются результаты близкие к оптимальным, также и в том случае, когда задача выполняется в системах со структурной избыточностью.

Ключевые слова: вычислительный комплекс, контрольные точки, уравнение, структурная избыточность, функции распределения (ФР), преобразование Лапласа-Стильтьеса.

Leontyev A.S., Ph.D. of Engineering Sciences, Senior Research Officer
Associate Professor at the Department of Mathematical Support and Standardization of Information Technologies
MIREA – Russian Technological University
Russian Federation, Moscow
ORCID: 0000-0003-3673-2468
Timoshkin M.S.
Master Student
MIREA – Russian Technological University
Russian Federation, Moscow
ORCID: 0000-0003-1842-8331

METHODOLOGY FOR SELECTING CONTROL POINTS IN SOLVING FUNCTIONAL PROBLEMS

Abstract: a methodology was developed for choosing a natural number of control points in solving functional problems in computer systems with structural redundancy. The functional equations for estimating the time of task with control points executing in the event of failures and rejection was excluded. It is shown that a valid choice of control points can be made by considering the solution of a problem with a non-redundant structure. In this case, results are obtained that are close to optimal, as well as in the case when task executes in the systems with structural redundancy.

Keywords: computer complex, control points, equation, structural redundancy, distribution functions (DF), Laplace-Stieltjes transform.

Введение

Одним из путей построения надежных вычислительных комплексов (ВК) является введение резервирования на различных уровнях и организация рационального процесса обработки информации. В вычислительных системах (ВС) автоматизированной обработки данных могут происходить сбои и отказы, обесценивающие полученные результаты. Поэтому возникает необходимость запоминания промежуточных результатов в устройствах, где информация хорошо защищена от разрушения [1, 2, 3, 4]. В работах [5, 6] показано, что разбиение задания на этапы с запоминанием промежуточных результатов приводит не только к повышению производительности системы, но и к существенному повышению эффективности временного резервирования. Наиболее эффективная борьба с отказами осуществляется при использовании комплексных мер, в частности, таких, как одновременное использование резервирования системы и организации контрольных точек. В таких условиях возникает задача рационального выбора контрольных точек в ВС с резервированием. Вопросам выбора контрольных точек посвящен целый ряд работ [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14], однако в них не рассматриваются важные с практической точки зрения вопросы организации контрольных точек в вычислительных системах со структурной избыточностью.

Определение ФР времени восстановления системы при возникновении отказов

При неограниченном восстановлении, а также в том случае, когда процессор с оперативной памятью и периферийные устройства обслуживаются различными ремонтными бригадами ФР времени восстановления системы определяется из соотношения (1).

$$F_{om}(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} F_1(t) + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} F_2(t), \qquad (1)$$

где λ_1 – интенсивность отказов процессора и оперативной памяти;

λ_2 – интенсивность отказов одного из эквивалентных параллельных элементов, описывающих периферийную часть ВС;

$F_1(t)$ – ФР времени восстановления системы после отказов процессора и оперативной памяти;

$F_2(t)$ – ФР времени восстановления после отказов одного из эквивалентных параллельных элементов периферийной части ВС.

Пусть при решении задачи наступают отказы, разрушающие информацию с интенсивностью $\lambda_{om} = \lambda_{om1} + \lambda_{om2}$ и сбои с интенсивностью $\lambda_{сб}$.

Длительность восстановления системы после отказов и сбоев случайные величины с конечными средними $F_{om}^{(1)} u F_{сб}^{(1)}$. Управление процессом решения задачи состоит в том, что в любой момент времени выполнения задачи может быть принято решение об остановке процесса наработки для запоминания промежуточных результатов, полученных к этому моменту. Длительность запоминания – случайная величина с конечным средним $\overline{\varphi}$.

Под задачей уровня B понимается задача, для решения которой необходимо время B в абсолютно надежной системе без учета прерывания процесса решения для выполнения задач высшего приоритета.

Вывод функциональных уравнений для оценки времени решения задачи с контрольными точками

Пусть задача уровня B делится на n сегментов $b_1, b_2, ..., b_n$ $(B = \sum_{i=1}^{n} b_i)$, причем запоминание промежуточных результатов производится всякий раз, как только заканчивается выполнение какого-либо сегмента. Если при выполнении сегмента наступил отказ, то это сегмент повторяется заново после восстановления системы.

Используя метод катастроф, легко получить функциональные уравнения для преобразования Лапласа–Стильтьеса функции распределения времени выполнения сегмента с учетом отказов и сбоев (2).

$$\eta_{\kappa}^{*}(S) = \exp\left\{-b_{\kappa}\left[\lambda_{om} + S + \lambda_{c\delta} - \lambda_{c\delta}F_{c\delta}^{*}(S)\right]\right\} + \frac{\lambda_{om}}{\lambda_{om} + S + \lambda_{c\delta} - \lambda_{c\delta}F_{c\delta}^{*}(S)} \times$$

$$\times (1\text{-}exp\left\{-b_{\kappa}\left[\lambda_{om} + S + \lambda_{c\delta} - \lambda_{c\delta}F_{c\delta}^{*}(S)\right]\right\} \cdot F_{om}^{*}(S) \cdot \eta_{\kappa}^{*}(S) \qquad (2)$$

Действительно, $\eta_{\kappa}^{*}(S) = \int\limits_{0}^{\infty} e^{-st} d\eta_{\kappa}(t)$ есть вероятность того, что во время выполнения κ-го сегмента катастрофы не наступят.

Для этого достаточно, чтобы во время обработки сегмента не наступили ни катастрофы, ни отказы, ни плохие сбои (сбои называются плохими, если во время восстановления системы после сбоев наступила катастрофа). Вероятность этого события

$$\int\limits_{0}^{\infty} \exp\left[-(\lambda_{om} + S + \lambda_{c\delta} - \lambda_{c\delta}F_{c\delta}^{*}(S)\right]\delta(b_{\kappa})dt = \exp\left[-b_{R}(\lambda_{om} + S + \lambda_{c\delta} - \lambda_{c\delta}F_{c\delta}^{*}(S))\right],$$

где $\delta(b_{\kappa)}$ – дельта функция.

Либо во время обработки сегмента наступило одно из этих событий, причем наступившее событие является отказом, вероятность этого равна:

$$\left\{1 - \exp\left[-b_{\kappa}(\lambda_{om} + S + \lambda_{c\delta} - \lambda_{c\delta}F_{c\delta}^{*}(S)\right]\right\} \cdot \frac{\lambda_{om}}{\lambda_{om} + S + \lambda_{c\delta} - \lambda_{c\delta}F_{c\delta}^{*}(S)}$$

Во время восстановления системы после отказа катастрофы не наступили $\left(\int\limits_{0}^{\infty} e^{-st} dF_{om}(t) = F_{om}^{*}(S)\right)$ и во время обработки сегмента после восстановления системы катастрофы не наступили $\left(\eta_{\kappa}^{*}(S)\right)$.

Отметим, что описанный способ вывода функционального уравнения является довольно общим и может быть использован не только в том случае, когда b_{κ} - детерминированная величина, но и тогда когда b_{κ} - случайная величина с заданной функцией распределения.

Преобразование Лапласа-Стильтьеса ФР времени выполнения задачи уровня В определяется из очевидного соотношения (3).

$$\eta_{B}^{*}(S) = \mathop{\Pi}\limits_{\kappa=1}^{n} \eta_{\kappa}^{*}(S)\left(\varphi^{*}(S)\right)^{n-1} \qquad (3).$$

Моменты ФР времени выполнения задачи уровня B, имеющей n сегментов, легко определяются дифференцированием по S выражений (2) и (3).

Управление процессом запоминания промежуточных результатов

Оптимальное управление процессом запоминания промежуточных результатов заключается в их периодическом запоминании. Среднее время решения задачи разбитой на n равных сегментов, определяется выражением (4).

$$M_B = \frac{nH}{\lambda_{om}}\left[\exp(\lambda_{om}B/n)-1\right]+(n-1)\overline{\varphi}\ , \qquad (4)$$

где $H = 1+\lambda_{om}F_{om}^{(1)}+\lambda_{c\delta}F_{c\delta}^{(1)}$.

Для определения оптимального числа контрольных точек необходимо выбрать такое целое n, при котором значение M_B минимально.

Данная задача имеет единственное решение.

Результаты исследования (расчетов) [15] показывают, что оптимальное число контрольных точек несущественно зависит от организации обеспечения функционирования технических средств при отказах и от использования резервирования системы.

Оптимальное число контрольных точек для задачи уровня B с абсолютной погрешностью порядка 1 определяется выражением (5).

$$n_{opt} = \lfloor x \rfloor$$

$$x = (B-\frac{\overline{\varphi}}{1+\lambda_{c\delta}F_{c\delta}^{(1)}})\cdot\sqrt{\frac{\lambda_{om}(1+\lambda_{c\delta}F_{c\delta}^{(1)})}{2\overline{\varphi}}} \qquad (5)$$

На основании результатов исследования можно сделать важный с практической точки зрения вывод, что выбор контрольных точек можно производить, рассматривая решение задачи на неизбыточной структуре. При этом получатся результаты, близкие к оптимальным, также и в том случае, когда задача выполняется в системах со структурной избыточностью. Если по технологическим причинам необходимо обеспечить неэквидистантное размещение контрольных точек, их число желательно выбирать несколько большим, чем n_{opt}. Выбор осуществляется так, чтобы максимальная длина сегмента при неэквидистантном размещении была близка к оптимальной длине сегмента при эквидистантном размещении. Это обусловлено тем, что время решения задачи любого уровня изменяется несущественно даже при значительном увеличении числа контрольных точек по сравнению с n_{opt}.

Заключение

Разбиение задачи на этапы с запоминанием промежуточных результатов приводит к уменьшению дисперсии времени выполнения и к увеличению вероятности ее отработки в заданные директивные сроки.

Для удовлетворения временных ограничений может возникнуть необходимость организации числа контрольных точек ($N_{треб}$) большего, чем n_{opt}. Значение $N_{треб}$ определяется с помощью следующей процедуры:

1. Для задачи заданного уровня определяется оптимальное число контрольных точек (целевая функция определяется выражением (4)).

2. С помощью разрабатываемых методов анализа временных характеристик обработки информации в информационных системах проверяется удовлетворение ограничений на вероятность обработки задачи в заданные директивные сроки.

3. При удовлетворении ограничений процедура заканчивается, в противном случае число контрольных точек увеличивается на 1 и осуществляется переход к пункту 2.

При выполнении процедуры задается максимальное число возможных итераций. Описанная процедура выполняется только в том случае, если ограничения на вероятность обработки в директивные сроки удовлетворяются в условиях абсолютно надежной работы.

Использованные источники:

1. Андреев А.В., Яковлев В.В., Короткая Т.Ю. Теоретические основы надежности технических систем // Учебное пособие. – Спб.: Изд-во Политех. ун-та. – 2018. – 164 с.
2. Павский В.А., Павский К.В. Математическая модель для расчета показателей надежности масштабируемых вычислительных систем с учетом времени переключения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 2 (212). – с. 134-145. – DOI: 10/18522/2311-3103-2020-2-134-145.
3. Акимова Г.П., Соловьев А.В., Тарханов И.А. Моделирование надежности распределенных вычислительных систем // ИТиВС. – 2019. – вып. 3. – с. 70-86. – DOI: 10.14357/20718632190307.
4. Иваничкина Л.В., Непорада А.Л. Модель надежности распределенной системы хранения данных в условиях явных и скрытых дисковых сбоев // Труды Института системного программирования РАН. – 2015. – том 27, вып. 6. – с. 253-274.
5. Дорохов А.Н., Керножицкий В.А., Миронов А.Н., Шестопалова О.Л. Обеспечение надежности сложных вычислительных систем. – Спб.: Лань. – 2011. – 352 с.
6. Креденцер Б.П. Надежность систем с двумя типами отказов при наличии временной избыточности // Автоматика и телемеханика. – 1973. – № 4. – с. 169-176.
7. Сафронова Е.М., Черненькая Л.В. Модель учета контрольных точек при планировании производства // Организатор производства. – 2022. – т. 30, № 1. – с. 52-59. – DOI: 10.36622/VSTU.2022.54.75.005.
8. Бондаренко А.А., Якубовский М.В. Обеспечение отказоустойчивости высокопроизводительных вычислений с помощью локальных контрольных точек // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. «Вычислительная математика и информатика». – 2014 – том 3, вып. 3 – с. 20-36.

9. Исаева Н.А., Милков М.Л. Динамическое управление надежным выполнением комплексов взаимосвязанных программных модулей на основе адаптивного многоверсионного их резервирования в параллельных вычислительных системах реального времени // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9-5. – с. 983-987.

10. Бродецкий Г.Л. Эффективность запоминания промежуточных результатов в системах с отказами, разрушающими информацию // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1978. – № 6. – с. 97-103.

11. Бродецкий Г.Л. К вопросу оптимальной организации запоминания промежуточной информации при случайных отказах системы // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1980. – № 2. – с. 69-73.

12. Chandy K.M. A survey of analytic models of rollback and recovery strategies // Computer. – 1975. – vol. 8, № 5. – p. 40-47.

13. Chandy K.M., Ramamurthy C.V. Rollback and recovery strategies for computer programs // IEEE Transactions on computer. – 1972. – vol. C-21, № 6. – p. 546-556.

14. Yong J.W. A first order approximation to the optimum checkpoint interval // Communications of the ACM. – 1974. – vol. 17, № 9. – p. 530-531.

15. Леонтьев А.С., Тимошкин М.С. Разработка методики выбора контрольных точек в вычислительных комплексах со структурной избыточностью // Наукосфера. – 2023. – № 4 (2). – DOI: 10.5281/zenodo.7860606.