

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

**АВІАЦІЙНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА
І ТЕХНОЛОГІЯ**

Збірка наукових праць
Випуск 35

Харків «ХАІ» 2002

УДК 62-65:621.382.82

Авіаційно-космічна техніка і технологія: Зб. наук. праць. Вип. 29. - Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2002. - 201 с.

Освітлено проблеми розвитку конструювання і технології систем управління літальними апаратами, радіотехнічних систем літальних апаратів, методів та пристроїв обробки сингалів, сучасних інформаційних технологій.

Для спеціалістів промислових і наукових організацій, викладачів, аспірантів і студентів.

Нормативні матеріали наведено за станом на 6 листопада 2002 р.

Затверджено до друку вченою радою Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут».

Редакційна колегія:

В.С. Кривцов, д-р техн. наук, проф., лауреат Державної премії України (відповідальний редактор);
О.Є. Федорович, д-р техн. наук, проф. (заступник відповідального редактора);
О.Б. Лещенко, канд. техн. наук, доц. (відповідальний секретар);
І.В. Баришев, д-р техн. наук, проф.;
К.В. Безручко, д-р техн. наук, проф.;
М.В. Білан, д-р техн. наук, проф., Лауреат премії Ради Міністрів СРСР;
В.С. Боголюбов, д-р техн. наук, проф., лауреат Державної премії України;
В.О. Богуслаєв, д-р техн. наук, проф., Герой України;
В.К. Борисевич, д-р техн. наук, проф., лауреат премії Ради Міністрів СРСР та Державної премії України, заслужений винахідник України;
В.Є. Гайдачук, д-р техн. наук, проф., лауреат Державної премії України;
В.М. Люшко, д-р техн. наук, проф.;
Є.О. Джур, д-р техн. наук, проф.;
А.І. Долматов, д-р техн. наук, проф., лауреат Державної премії України;
Я.С. Карпов, д-р техн. наук, проф., лауреат Державної премії України;
Д.С. Кива, д-р техн. наук, проф., лауреат Державної премії України;
А.В. Корольов, канд. техн. наук, проф., заслужений винахідник України;
Г.І. Костюк, д-р техн. наук, проф.;
А.С. Кулик, д-р техн. наук, проф.;
С.Г. Кушнарєнко, канд. техн. наук, проф.;
Л.О. Малашенко, д-р техн. наук, проф. Заслужений працівник вищої школи України;
А.К. М'ялиця, канд. техн. наук, лауреат Державної премії СРСР, Герой України;
Ф.М. Муравченко, д-р техн. наук, проф., лауреат Державних премій СРСР та України;
В.І. Рябков, д-р техн. наук, проф., лауреат Державної премії України;
Д.Ф. Симбірський, д-р техн. наук, проф., лауреат Державної премії СРСР;
В.В. Сухов, д-р техн. наук, лауреат Державної премії України.

ISBN 966-662-033-2

© Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2002 р.

А.Л. Надточей

ПРИМЕНЕНИЕ КЛАСТЕРНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НАДЕЖНЫХ
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ХРАНИЛИЩ ДАННЫХ БОЛЬШИХ ОБЪЕМОВ 174

А.Н. Торукало

СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ (СППР)
ДЛЯ ЧС: ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ ТРЕБОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ 178

Системний аналіз та теорія оптимальних рішень

А.В. Волковой, В.В. Скляр, к.т.н., В.С. Харченко, д.т.н.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ «НАДЕЖНОСТЬ-СТОИМОСТЬ»
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МНОГОВЕРСИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ 182

О.Н. Одарущенко, к.т.н., Е.Б. Одарущенко, Ю.Л. Поночовный

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ
ЖЕСТКИХ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ
В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ОБСЛУЖИВАЕМЫХ СИСТЕМ 187

О.Н. Одарущенко, к.т.н., А.В. Харьбин

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНОЙ
ЖИВУЧЕСТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ КРИТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ .. 192

О.М. Тарасюк, В.С. Харченко, д.т.н.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОФИЛИРОВАНИЯ И СИСТЕМНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ
МЕТРИК КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ 196

Шановні читачі !

Збірка «Авіаційно-космічна техніка і технологія» включена до переліку наукових видань, в яких можуть публікуватися основні результати дисертаційних робіт (див. «Бюлетень ВАК України», 1999, № 4, перелік № 1).

УДК 621.321

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЖЕСТКИХ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ОБСЛУЖИВАЕМЫХ СИСТЕМ*О. Н. Одарущенко к. т. н., Е. Б. Одарущенко, Ю. Л. Поночовный**Полтавский военный институт связи*

Рассмотрены вопросы решения жестких систем линейных дифференциальных уравнений в задачах оценки надежности обслуживаемых систем с применением математического аппарата марковских случайных процессов для случая, когда потоки отказов и восстановлений аппаратных и программных компонент подчинены экспоненциальному распределению. Представлена модель оценки надежности мажоритарно-резервированной системы с применением численных методов интегрирования Гира и экспоненциального. Даны рекомендации по применению указанных методов в задачах оценки надежности обслуживаемых систем для различных размерностей жестких систем дифференциальных уравнений

Розглянуті питання розв'язку жорстких систем лінійних диференціальних рівнянь у задачах оцінки надійності систем, що обслуговуються, із застосуванням математичного апарату марковських випадкових процесів для випадку, коли потоки відмов і відновлень апаратних і програмних компонент розподілені за експоненціальним законом. Представлено модель оцінки надійності мажоритарно-резервованої системи з застосуванням чисельних методів інтегрування Гіра та експоненціального. Дано рекомендації по застосування зазначених методів у задачах оцінки надійності систем, що обслуговуються, для різних розмірностей жорстких систем диференціальних рівнянь

Questions of the solving of rigid systems of the linear differential equations in tasks of a rating of reliability of the served systems with application of the mathematical device of Markov's casual processes for a case when streams of refusals and restorations hardware and program components are subordinated to exhibitors distribution are considered. The model of a rating of reliability of majority - reserved systems with application to numerical methods of Gir integration and exhibitors is submitted. Recommendations for application of the specified methods in tasks of a rating of reliability of served systems for various dimensions of rigid systems of the differential equations are given.

Среди сложных технических систем, отказ которых может привести к катастрофическим последствиям можно выделить системы военного назначения, АЭС, транспортные коммуникации, правительственные и банковские информационные системы; а также их подсистемы, как, например, телекоммуникационные системы (ТКС). Подчеркивая важность решаемых ими задач и возможность катастрофических последствий их отказов, такие системы называют критическими (КС).

Следует отметить, что надежность КС в значительной мере зависит от надежности их системы управления (СУ), которая построена на основе специализированных вычислительных комплексов (ВК). Выполнение растущих требо-

ваний к надежности ВК возможно только на основе тщательного анализа их функций, архитектуры, используемой элементной базы, условий применения по назначению и связанных с ними источников отказов.

Для проведения такого анализа необходимо применить определенный математический аппарат, который должен претерпевать изменения с каждым новым этапом развития обслуживаемых систем и в частности ВК. Цель данной статьи – в рамках анализа и моделирования ВК как сложной многокомпонентной системы получить численное значение показателя надежности ВК с помощью специальных численных методов интегрирования и указать область применения этих методов.

Известно [4], что нарушение работоспособности ВК может быть вызвано двумя основными причинами: кратковременными сбоями или устойчивыми отказами элементов аппаратных компонент (АК), а также дефектами проектирования и производства программных компонент (ПК).

Для повышения надежности системы применяют различные способы, среди которых особого внимания заслуживают варианты «горячего» структурного и программного резервирования, которые реализуются, например, в мажоритарно-резервированных структурах (МРС). Однако, высокая стоимость, а также сложность настройки и эксплуатации ВК требуют предварительного обоснования выбранной структуры системы.

Для случая, когда потоки отказов и восстановлений аппаратных и программных средств ВК подчинены экспоненциальному распределению [2,3] с параметрами:

$\lambda_{ДФ}$ — интенсивность потока отказов аппаратной компоненты;

$\lambda_{ДП}$ — интенсивность потока отказов программной компоненты;

$\mu_{ДФ}$ — интенсивность потока восстановлений аппаратной компоненты;

$\mu_{ДП}$ — интенсивность потока восстановлений программной компоненты,

возможно априорное определение показателей надежности с помощью математического аппарата марковских случайных процессов. Для этого необходимо построить размеченный граф состояний системы. По построенному графу, согласно правилу Колмогорова [2], составляется система линейных дифференциальных уравнений (СДУ), решение которой позволяет получить данные для расчета показателей надежности ВК.

Для примера рассмотрим МРС, в которой используется «горячее» резервирование трех аппаратных каналов и одинаковая программная версия во всех каналах (рис.1).

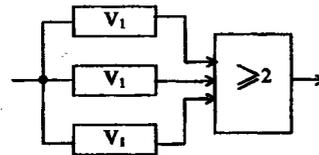


Рис. 1.

Граф состояний, описывающий функционирование такой системы представлен на рис.2.

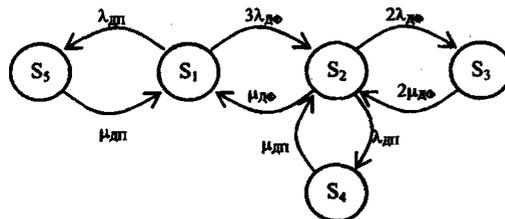


Рис. 2.

где

S_1 — состояние, в котором система исправна;

S_2 — состояние отказа одного из каналов по АК (система работоспособна);

S_3 — состояние отказа второго канала по АК (система неработоспособна);

S_4 — состояние отказа по ПК (до этого система работала в двухканальном режиме) — система неработоспособна;

S_5 — состояние отказа по ПК (система неработоспособна).

СДУ, описывающая граф, имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = -(3\lambda_{ДФ} + \lambda_{ДП})P_1 + \mu_{ДФ}P_2 + \mu_{ДП}P_5, \\ \frac{dP_2}{dt} = -(\mu_{ДФ} + 2\lambda_{ДФ} + \lambda_{ДП})P_2 + 3\lambda_{ДФ}P_1 + 2\mu_{ДФ}P_3 + \mu_{ДП}P_4, \\ \frac{dP_3}{dt} = -2\mu_{ДФ}P_3 + 2\lambda_{ДФ}P_2, \\ \frac{dP_4}{dt} = -\mu_{ДП}P_4 + \lambda_{ДП}P_2, \\ \frac{dP_5}{dt} = -\mu_{ДП}P_5 + \lambda_{ДП}P_1, \end{cases} \quad (1)$$

$$P_{\text{гом}}(t) = P_1 + P_2, \quad (2)$$

где $P_{\text{гом}}(t)$ — функция готовности системы.

Решение СДУ чрезвычайно усложняется при увеличении размерности задачи. Размерность СДУ, например, резко увеличивается при учете изменения надежности ПК после устранения очередного проявившегося программного дефекта [5]. При этом для решения системы целесообразно использовать чис-

ленные методы. Отличие значений параметров системы ($\lambda_{ДФ}$, $\lambda_{ДП}$, $\mu_{ДФ}$, $\mu_{ДП}$) на два и более порядка определяет большое число обусловленности

$$\nu = \frac{|A_{\max}|}{|A_{\min}|} \gg 1, \quad (3)$$

где

$|A_{\max}|$ - абсолютное значение максимального параметра СДУ;

$|A_{\min}|$ - абсолютное значение минимального параметра СДУ.

Откуда следует, что получаемая СДУ обладает свойством жесткости [1]. В силу этого применение методов Рунге-Кутты, а также Адамса и Эйлера невозможно в силу накопления большой ошибки при вычислении результатов. Получение точного решения возможно с использованием численных методов с изменяющимся шагом интегрирования. Такими методами являются методы Гира и экспоненциальный.

Метод Гира относится к методам дифференцирования «назад», где последующее значение функции $y(x_n)$ получают, используя предыдущее значение этой функции $y(x_{n-1})$. Для решения системы

$$\bar{Y}' = \bar{A}\bar{Y}, \quad (4)$$

применяется выражение:

$$\bar{y}(x_n) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{h^k \cdot \bar{y}^{(k)}(x_{n-1})}{k!} + O(h^{k+1}), \quad (5)$$

где

$\bar{y}^{(k)}(x_{n-1})$ - значение производной k -го порядка в точке x_{n-1} ;

h - шаг интегрирования, $h = x_n - x_{n-1}$;

$O(h^{k+1})$ - погрешность вычислений;

k - глубина разложения функции $y(x_n)$ в ряд производных.

Для устойчивости решения необходимо соблюдение условий

$$\sum_{i=1}^n y_i(x_n) = 1, \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i^{(k)}(x_n) = 0. \quad (7)$$

Выполнение этих условий обеспечивается вариативным выбором шага интегрирования.

Экспоненциальный метод использует следующее матричное решение СДУ

$$\bar{y}(x_0 + nh) = (e^{\bar{A}h})^n \bar{y}_0 = \left(\sum_{k=1}^{\infty} \frac{(h\bar{A})^k}{k!} \right)^n y_0, \quad (8)$$

где

\bar{A} - матрица значений параметров СДУ;

\bar{y}_0 - начальные значения функции $\bar{y}(x_n)$;

n - количество выполненных вычислений функции $\bar{y}(x_n)$,

при этом условие устойчивости решения имеет вид:

$$h < \frac{L}{|A_{\max}|}, \quad (9)$$

где

L - величина, зависящая от производительности ЭВМ ($L = 2 + 30$).

Так, например, для параметров

$$\begin{aligned} \lambda_{ДФ} &= 10^{-3} \text{ 1/час,} \\ \lambda_{ДП} &= 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/час,} \\ \mu_{ДФ} &= 4,2 \cdot 10^{-2} \text{ 1/час,} \\ \mu_{ДП} &= 0,1 \text{ 1/час,} \end{aligned} \quad (10)$$

полученных с помощью статистических исследований функционирования ВК, функция готовности МРС принимает следующие значения (рис.3).

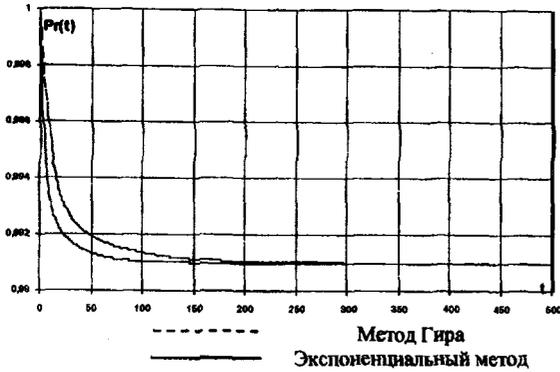


Рис. 3.

Для реалізації указаних методів була складена програма на мові Object Pascal в середі Delphi. В ході виконання обчислень проводився аналіз точності, часу і складності для обох методів. Погрешність обчислень визначалася з допомогою наступного вираження:

$$\xi = 1 - \sum_{i=1}^n y_i(x_n). \quad (11)$$

Для методу Гира отримана погрешність обчислень $\xi = 0,0012$, експоненціальний метод дозволяє отримати більш високу точність обчислень $\xi = 10^{-6}$.

Оцінка машинного часу при розв'язанні СДУ різними методами показала, що з збільшенням розмірності СДУ, час обчислень методом Гира значно зростає, що пов'язано з необхідністю отримання ряду похідних для обчислення кожного наступного значення функції. Експоненціальний метод, навпаки, передбачає одноразове розкладання функцій в експоненціальний ряд з наступним обчисленням всіх результатуючих значень функції виходячи з значень ряду.

Складність (кількість операцій при розв'язанні однієї і тієї ж системи різними методами) зростає з збільшенням розмірності СДУ. Для експоненціального методу характерно лінійне збільшення складності з ростом розмірності

СДУ, для методу Гира – збільшення складності по показальному закону, що пояснюється багаторазовим побудовою ряду похідних при обчисленні кожного значення функції розв'язання СДУ.

Однак, регулювання глибини розкладання k в ряд похідних (5) дозволяє при використанні методу Гира отримати достовірний результат на початковому інтервалі дослідження ($0 < t < 100h$), коли накопленням помилок, пов'язаних з особливостями диференціювання «назад», можна пренебрати, в відмінність від експоненціального методу, в якому спостерігається рівномірність погрешності на всьому інтервалі дослідження. Ця особливість добре розглядається на графіку (рис.3). Отже, на початковій стадії функціонування системи її поведінку краще розглядати виходячи з результатів, отриманих при використанні методу Гира. Висока складність методу Гира обмежує його використання для дослідження коротких часових інтервалів при розмірності СДУ до 25 членів. Необхідність застосування експоненціального методу виникає при розв'язанні класу жорстких СДУ великої розмірності (більше 25 невідомих).

Дослідження поведінки МРС з допомогою експоненціального методу при заданій погрешності можна організувати з допомогою вибору величини кроку інтегрування h і обмеження досліджуваного часового інтервалу.

Наприклад, для трьохканальної МРС (рис.1) багочастотна модель [5] в залежності від значення параметра $\Delta\lambda_{дп}$ – зміни інтенсивності відмов ПК після виправлення чергового відмови ПК, буде складатися з $n = \lambda_{дп0} / \Delta\lambda_{дп}$ фрагментів. Кожен з фрагментів описується наступною СДУ:

$$\begin{cases} \frac{dP_{5m-4}}{dt} = -(3\lambda_{до} + \lambda_{дп} - k\Delta\lambda_{дп})P_{5m-4} + \mu_{до}P_{5m-3}, \\ \frac{dP_{5m-3}}{dt} = -(\mu_{до} + 2\lambda_{до} + \lambda_{дп} - k\Delta\lambda_{дп})P_{5m-3} + 3\lambda_{до}P_{5m-4} + 2\mu_{до}P_{5m-3}, \\ \frac{dP_{5m-2}}{dt} = -2\mu_{до}P_{5m-2} + 2\lambda_{до}P_{5m-3}, \\ \frac{dP_{5m-1}}{dt} = -\mu_{дп}P_{5m-1} + (\lambda_{дп} - k\Delta\lambda_{дп})P_{5m-1}, \\ \frac{dP_{5m}}{dt} = -\mu_{дп}P_{5m} + (\lambda_{дп} - k\Delta\lambda_{дп})P_{5m-1}, \end{cases} \quad (12)$$

где m – порядковый номер фрагмента.

При десятифрагментной модели размерность СДУ равна 47. Решение СДУ на временном интервале $t = (0, 75000)$ при $h = 100$ дало следующие результаты (рис.4).

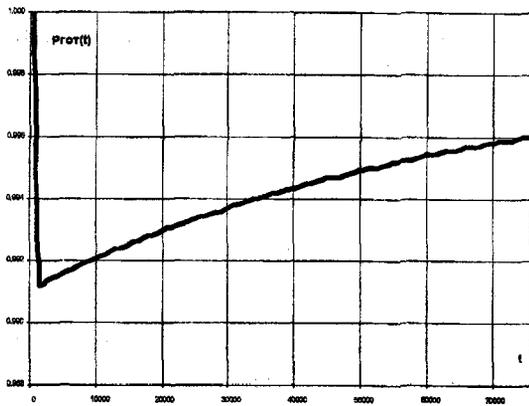


Рис. 4.

В силу того, что на этап приработки приходится основная часть отказов ПК, то исследование функции $P_{gom}(t)$ необходимо проводить с большой точностью. Так для рассмотренной МРС (рис.1) и ее параметров (10) значения $P_{gom}(t)$ при $t = (0, 100)$ и $h = 1$ представлены на рис.5.

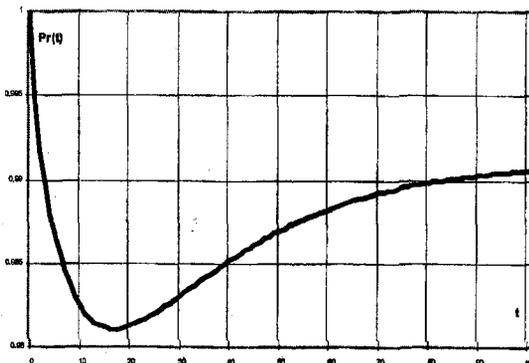


Рис. 5.

Анализ этого графика позволяет точно определить экстремум функции готовности.

Заключение

Анализ результатов, полученных при решении класса жестких СДУ численными методами, позволяет сформулировать следующие выводы:

- оба метода применимы для решения данного класса СДУ;
- применение метода Гира позволяет прогнозировать надежность систем на этапе приработки (переходной период) с меньшей погрешностью;
- применение экспоненциального метода целесообразно при большой размерности системы;
- для решения СДУ экспоненциальным методом с меньшей погрешностью необходимо сузить временной интервал исследования и уменьшить шаг интегрирования на этом интервале;
- параллельное использование двух методов при оценке надежности систем позволяет проводить проверку правильности полученных результатов.

Литература

1. Арушанян О.Б., Залеткин С.Ф. Численное решение обыкновенных дифференциальных уравнений на ФОРТРАНЕ. – М.: Издательство МГУ. 1990. – С. 127-135.
2. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Советское радио. 1972. – С. 94-115
3. Холстед М. Начала науки о программах / пер.с англ. В.М. Юфы. – М.: Финансы и статистика. 1981. – С. 57-69.
4. Харченко В.С. Теоретические основы дефектоустойчивых цифровых систем с версионной избыточностью. – Х.: МОУ. 1996. – С. 26.
5. Одаруценко О.Н., Одаруценко Е.Б. Оценка надежности программно-технических комплексов на основе многофрагментных марковских моделей. – Х.: Системи обробки інформації. Збірник наукових праць. Вип.3 (13). 2001. – С. 113-118.

АВІАЦІЙНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЯ

Випуск 35

Підписано до друку: 26.11.2002

Формат: А4

Папір офс. № 2

Надруковано на різнографі

Умовн.-друк. арк. 12,8

Облік.-вид. арк. 11,9

Тираж 100 прим.

Замовлення № 576

Ціна вільна

Комп'ютерна верстка
Інформаційно-діловий центр факультету РТС ЛА

Національний аерокосмічний університет
ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
61070, Харків, вул. Чкалова, 17

Надруковано ООО Поліграфічна фірма «ВСВ»
Харків, м. Конституції, 1, Палац Праці, 2 під., 3 пов.