

**ПРОБЛЕМА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ДЕФЕКТΟΣКОПИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИНФОСФЕРЫ****Ю. В. Бородакий, Р. М. Юсупов, Б. П. Пальчун (Москва)**

Компьютерная инфосфера некоторой структуры – это полная совокупность всей цифровой информации (как обрабатываемой, так и обрабатывающей), содержащейся в компьютерах (ЭВМ) данной структуры. Сама же структура в общем случае представляет собой компьютеризированную организационно-техническую структуру любой сложности с соответствующей цифровой системой управления, например, автоматизированное рабочее место, локальная вычислительная сеть в организации, автоматизированная система управления производственным объектом, автоматическая система управления динамическим объектом, информационно-расчётная система, распределённая автоматизированная система управления организацией, ведомством, отраслью и так далее вплоть до масштабов государства.

В любом случае именно компьютерная инфосфера фактически определяет семантику функционирования управляемой структурой. Поэтому наличие каких-либо дефектов в компьютерной инфосфере напрямую влияет на безопасность и саму возможность жизнедеятельности соответствующей управляемой структуры (системы, объекта). В первую очередь это касается так называемых критических систем, к которым относятся энергетические (особенно атомные), транспортные, коммутационные, военно-технические, финансовые системы, медицинская и биологическая промышленность, экологически опасные производства, системы управления государством, в том числе силовыми структурами.

Говоря в общем, реально существует глобальная коллизия современности – с одной стороны, без компьютеризации (без компьютерной инфосферы и её развития) не возможен прогресс человечества в сфере высоких технологий, с другой – компьютерная инфосфера представляет собой неиссякаемый источник угроз техносфере цивилизации и, в принципе, самой цивилизации.

Таким образом, проблема создания безопасной компьютерной инфосферы чрезвычайно важна и весьма актуальна. Поскольку основу компьютерной инфосферы составляют компьютерные программы (КП), которые реально функционируют в компьютерах в виде так называемых машинных кодов, то и безопасность компьютерной инфосферы зависит от бездефектности КП.

Теоретической основой надёжности и технологической безопасности КП, обеспечивающей исследования непреднамеренных (случайных) и преднамеренных (диверсионных) программных дефектов, является дефектология КП, которая в рамках теоретического программирования изучает все свойства КП, связанные с дефектами в программах, и все свойства самих программных дефектов.

Дефектология КП базируется на фундаментальных свойствах самих КП: полирности («ветвистости»), энтропийной сложности, идентичной копируемости, локальной стабильности. Основные дефектологические свойства КП следующие: дефектоскопичность, дефектабельность, дефектогенность, дефектомобильность, дефектодиагностируемость, дефектокорректируемость, дефектоустойчивость. Для описания свойств самих дефектов в КП служат такие дисциплины, как программная дефектоника и программная дефектометрия. Для потребителя наиболее важным дефектологическим свойством КП является дефектоскопичность – это свойство КП проявлять дефекты в заданных условиях эксплуатации. Исследование дефектологических свойств КП весьма сложная и трудоёмкая задача [1–6]. Только аналитическое решение этой задачи проблематично, поэтому большую роль здесь сможет сыграть имитационное моделирова-

ние, причём оно в этом случае носит тандемный характер: имитация (моделирование) с помощью КП свойств, в том числе и дефектоскопических, КП [2].

Рассмотрим сначала исходные положения для создания имитационной модели дефектоскопических свойств компьютерных программ.

КП состоят из вычислительных путей (ВП), а те, в свою очередь, из вычислительных траекторий (ВТ). {Определение ВТ: полная последовательность всех операторов с конкретными значениями их операндов, участвующих в вычислении при некотором фиксированном варианте задания входного вектора, называется вычислительной траекторией. Определение ВП: полная совокупность всех ВТ, имеющих идентичную последовательность одних и тех же операторов, называется вычислительным путем.}

У каждой КП есть вектор входных величин (ВВВ). Учитывая дискретность современной компьютерной техники, а следовательно, и КП, ВВВ является дискретным (с дискретностью ВТ). ВВВ каждой КП имеет своё дискретное множество допустимых значений. Условно приписав каждой ВТ некоторую непрерывную элементарную подобласть, это множество будем для удобства представлять в виде области допустимых значений (ОДЗ). Каждому ВП однозначно соответствует некоторая фиксированная входная подобласть, сумма которых равна ОДЗ КП.

Задача оценки надежности компьютерных программ – это задача по созданию методики оценки показателей надежности КП и её применению с учётом соответствующей информации о КП и процессе испытания КП. Важно заметить, что данная методика создается при уже существующем способе оценки правильности КП. Если такого способа нет, то никакой методики оценки надежности КП, да и самой КП создать, разумеется, невозможно.

В данном случае рассматривается подход, полностью основанный только на учёте дефектоскопических свойств входной области КП (т.е. ОДЗ), разработанный в рамках построения так называемой «мозаичной модели» надежности КП. Под входом данной модели подразумевается мозаичная структура входной области. Каждый элемент этой мозаики всегда соответствует некоторому вычислительному пути, а каждому вычислительному пути в общем случае может соответствовать более одного элемента, причем все элементы могут иметь весьма разнообразное взаимоположение, в общем случае элементы, принадлежащие одному ВП, могут не иметь общих границ. Условно «тёмная» окраска элементов мозаики обозначает дефектные входные подобласти, «светлая» – бездефектные. Локальные дефектные и инвариантные подобласти локально дефектных вычислительных путей также имеют соответственно темную и светлую окраску, ничем не отличаясь на данном мозаичном отображении от предыдущих.

Представление ОДЗ КП в виде тёмно-светлой мозаики, состоящей из конечного числа элементов, позволяет отладку КП (обнаружение и соответствующее исправление дефектных ВП) описать в виде дефектоскопического процесса, опираясь на аксиоматику Колмогорова.

Под входом мозаичной модели надежности понимается элементарное событие ω_j , полное множество которых будет являться пространством событий Ω . При этом справедливы следующие соотношения:

$$\omega_j \in \Omega, \bigcup_{j=1}^{N_\Sigma} \omega_j = \Omega; \quad (1)$$

$$\omega_j \cap \omega_{\bar{j}} = \emptyset, j = \overline{1, N_\Sigma}, \bar{j} = \overline{1, N_\Sigma}, j \neq \bar{j},$$

где N_{Σ} – максимальное возможное число уникальных вариантов задания вектора X в области $\{X^D\}$, на входе получаем элементарное событие ω_j – элементарная входная подобласть $\{\delta x\}_j$, т. е. некий гиперкуб с x_j в центре, ребрами которого являются значения возможных операторов с фиксированными операндами.

Считается, что для каждого j -го вычисления установлен критерий пригодности:

$$G_j : \bigcup_{q=1}^Q (z_{qi} \in \{z_{qj}^D\}),$$

где z_{qj}^D – q -й показатель качества, $q = \overline{1, Q}$; $\{z_{qj}^D\}$ – область допустимых значений показателя z_{qj} .

Можно сказать, что j -ое вычисление пригодно, если его показатель качества входит в область определения показателя качества. В результате чего для идентификации дефектности (или бездефектности) каждой испытываемой ВТ ставится в соответствие следующий индикатор I_j события ω_j :

$$I_j = \begin{cases} 0, & \text{если (1),} \\ 1 & \text{– в противном случае.} \end{cases} \quad (2)$$

Т. е., если $I_j=0$, то ВТ – бездефектна, иначе ВТ – дефектна.

Введем

A – событие, для которого $I_j=0$ (бездефектное событие);

B – событие, для которого $I_j=1$ (дефектное событие);

Рассмотрим множество $S=(A, B, 0)$, где 0 – пустое множество.

Для данного множества справедливы следующие аксиомы, введенные А.Н. Колмогоровым:

1. S является алгеброй множеств из Ω .
2. Каждому множеству A и B поставлены в соответствие неотрицательные числа $P(A)$ и $P(B)$. Эти числа называются вероятностями событий соответственно A и B .
3. $P(\Omega) = P(A + B) = 1$.
4. Так как A и B не пересекаются, то $P(A+B)=P(A)+P(B)$.

Совокупность (Ω, S, P) , удовлетворяющая аксиоматике Колмогорова, называется полем вероятности, а дефектоскопический процесс – случайным процессом.

Как известно, все случайные процессы делятся на стационарные и нестационарные. Стационарный случайный процесс – это процесс, при котором в программу не вносятся никаких изменений и исправлений. Нестационарный случайный процесс – случайным образом вносятся изменения и исправления, причем входная область не меняется.

Каждому элементарному событию w_j из Ω соответствует свое число $P(w_j)$, при этом

$$\sum_{j=1}^{N_{\Sigma}} P(w_j) = 1.$$

Тогда в стационарном случае вероятности событий A и B соответственно равны

$$P(A) = \sum_{j=N_0+1}^{N_{\Sigma}} P(w_j);$$

$$P(B) = \sum_{j=1}^{N_g} P(w_j),$$

где N_g – мощность множества B (общее число дефектных ВТ). Учитывая, что система чисел $P(w_j)$, $j = 1 \dots N_g$ представляет собой закон распределения дискретного аргумента x_j на множестве допущенных значений $\{X^D\}$, получаем, что вероятность $P(A)$ является показателем надежности КП, для которого справедливо следующее выражение:

$$R = P(A) = 1 - \sum_{j=1}^{N_g} P(w_j) I_j. \quad (3)$$

В нестационарном случае, когда в программу вносятся исправления и изменения (без изменения самой входной области), общее число дефектных ВТ N_g может изменяться, а следовательно, изменяются и вероятности. Таким образом, для каждого i -го этапа испытаний события A и B имеют в общем случае разные вероятности, зависящие от номера испытаний $i = 1 \dots N$, где N – общее число испытаний (при уникальных значениях входного вектора). Схема событий при каждом отдельно взятом i -м испытании качественно (но не количественно) ничем не отличается от вышеизложенной, т.е., аксиоматика Колмогорова применима для каждого i -го испытания. Поэтому для соответствующего номера испытания $i + 1$ будет справедливо выражение (3), которое запишем в следующем виде:

$$R(i + 1) = 1 - \sum_{j=1}^{N_g} P(w_j) I_i(j), \quad i = 1 \dots N.$$

Таким образом, дефектоскопический процесс при испытаниях КП является в общем случайным процессом, причем на практике наблюдаются не конкретные ВТ, а только результаты N испытаний в виде соответствующего протокола $I_i, i = 1 \dots N$, из которого может быть получена более наглядная дефектоскопическая функция:

$$\omega(i) = \sum_{j=1}^i I_j, \quad (4)$$

$$i = 1 \dots N.$$

Т.е., другими словами можно сказать, что получена функция, отражающая общее количество дефектных ВТ при N испытаниях. Мы получили, что при введенной выше постановки задачи формула (4) является единственным источником информации, на основе которой должна быть получена оценка показателя $R(i)$ надежности КП.

Задача оценки надежности КП по результатам ее испытаний сводится к нахождению функции (оператора преобразований) $F(\Psi, i)$:

$$w(i) \rightarrow F(\Psi, i) \rightarrow R(i),$$

где Ψ – вектор параметров функции $F(\Psi, i)$.

Функцию $F(\Psi, i)$ в литературе принято называть моделью надёжности программ [2–5]. Для проверки правильности построения той или иной модели надёжности программ, т.е., функции $F(\Psi, i)$, практически единственным средством в настоящее время является использование соответствующей имитационной модели [2].

Построение самой такой имитационной модели базируется на фиксации того обстоятельства, что процесс выбора события A или B для любой КП является вероятностным и в статистическом смысле зависит (при одном и том же законе распределения ВВВ в ОДЗ) только от структуры входной мозаики и от всех остальных свойств КП. Отсюда следует, что дефектоскопические процессы для КП можно исследовать в

статистическом же смысле, используя только входную «мозаику», т. е. ОДЗ с различными вариациями её структуры.

Значит, любые входные мозаики со свойствами ОДЗ КП статистически однородны при условии возможности вариаций входной «мозаики». Поэтому базовая имитационная модель дефектоскопических свойств компьютерных программ (ИМДКП) представляет собой обычный массив данных, в котором различными группами из элементов этого массива имитируется входная «мозаика» КП.

Данный массив может быть одно-, двух-, трёх- и более мерным (всё это статистически эквивалентные структуры), но исключительно из соображений наглядности ИМДКП будет представлена двумерным массивом – числовой матрицей $M_{вх}$ размером $M \times M$. Одноцифровые элементы (каждый из которых имитирует элементарную входную подобласть ВТ КП) матрицы $M_{вх}$ содержит одну из цифр: 0 или 1. Причём 0 (нуль) соответствует бездефектной ВТ, а 1 (единица) соответствует дефектной ВТ. Такая ИМДКП может в принципе имитировать входную «мозаику» любой КП, так как размер матрицы $M_{вх}$ может быть задан любой (как и для КП этот размер ограничен лишь характеристиками используемого компьютера). В общем случае в этой имитационной модели входные подобласти ВП имитируются группами (не обязательно связанных) элементов, т.е. «элементарных входных подобластей ВТ».

На первом этапе создания и исследования ИМДКП рассматривается усреднённый случай, когда входные подобласти ВП равны в статистическом смысле, т.е., вероятность попадания в них одинакова (при равномерном законе распределения задания значений ВВВ в ОДЗ). Это упрощение приводит к тому, что КП состоит как бы из одних статистически одинаковых ВП (без ВТ). Погрешность этого упрощения будет оценена в процессе исследования ИМДКП.

Задачи, решаемые ИМДКП:

1. Определение точностных характеристик моделей надёжности программ, т. е. функций $F(\Psi, i)$ на основе обработки широкого спектра семейств дефектоскопических функций при максимальном диапазоне изменения характеристик мозаичной структуры ОДЗ ВВВ (входной «мозаики») КП.

2. Коррекция моделей надёжности программ [функций $F(\Psi, i)$] путём вариаций параметров вектора Ψ с целью улучшения их точностных характеристик.

3. Коррекция значения показателя надёжности $R(i)$ конкретной КП, полученной на основе обработки конкретной дефектоскопической функции $w(i)$.

4. Коррекция погрешности $\sigma_R(i)$ оценки значения показателя надёжности $R(i)$ конкретной КП, полученной на основе обработки конкретной дефектоскопической функции $w(i)$.

5. Прогноз значений погрешности $\sigma_R(i+n)$ и оценки значения показателя надёжности $R(i+n)$ конкретной КП, полученной на основе обработки конкретной дефектоскопической функции $w(i)$, где n – прогнозируемый интервал.

6. Реконструкция мозаичной структуры ОДЗ ВВВ (входной «мозаики») конкретной КП, полученной на основе обработки конкретной дефектоскопической функции $w(i)$.

7. Определение точностных характеристик ИМДКП на основе принципа автоимитации.

Решение вышеприведённых задач надо начинать с решения задачи № 7, т. е. с определения инструментальной погрешности самой ИМДКП. Для этого необходимо выявить и описать все источники погрешностей ИМДКП. Это возможно сделать путём дифференциального сравнения конкретной ИМДКП с идеальной ИМДКП. Проблема идеализации имитационных моделей в рассматриваемом случае решается в практиче-

ском плане, так как любые КП – это те же ИМДКП, и есть возможность учесть любые нюансы, вплоть до единичных ВТ.

В целом идеальная ИМДКП имеет следующие характеристики:

1. Размер матрицы $M_{вх}$ ограничен лишь конструктивными параметрами используемого компьютера, т. е. могут совпадать с размерами ОДЗ ВВВ любой КП.

2. Размеры входных подобластей ВП могут изменяться в диапазоне от одной ВТ до всей ОДЗ, причём образуются эти подобласти ВП с размерами, определяемыми в соответствии с задаваемыми и параметрически варьируемыми функциями распределения.

3. ВВВ для ИМДКП задаются в соответствии с различными и параметрически варьируемыми функциями распределения.

4. Имеется режим имитации стохастического внесения в КП дополнительных дефектов при исправлении обнаруженных дефектов.

Выводы

1. Показана возможность имитационного моделирования дефектоскопических свойств компьютерной инфосферы на базе ИМДКП, причём в пределе такая имитация может быть идеальной (в отличие от имитации физических систем).

2. Препятствий для создания такой идеальной ИМДКП не существует, но при её полномасштабном применении возникнут неудобства с обеспечением необходимого быстродействия, так как для решения всех остальных шести задач необходимы длительные вычисления многомиллионных вариантов, обусловленных необходимостью получения достаточной статистической информации.

3. На практике надо использовать более простые, удобные и быстродействующие ИМДКП, наподобие описанной выше базовой ИМДКП. Возникающую при этом задачу оценки инструментальной погрешности можно решить на основе принципа автоимитации. Этот принцип обусловлен цифровой мозаичностью всех ИМДКП и позволяет получить рейтинговый (в смысле инструментальной погрешности) ряд ИМДКП: от идеальной до самой простой – базовой.

Литература

1. **Бородакий Ю. В., Пальчун Б. П., Назаренко Д. Д.** Проблема оценки надёжности компьютерных программ//Проблемы информатизации регионального управления. Материалы Второй Всероссийской конференции. КБНЦ. Нальчик, 2006.
2. **Пальчун Б. П., Юсупов Р. М.** Оценка надёжности программного обеспечения. СПб.: Наука, 1994. 84 с.
3. **Шаракшанэ А. С., Шохин В. П., Халецкий Л. К.** Испытания программ сложных автоматизированных систем. М.: Высшая школа, 1982.
4. **Липаев В. В.** Надёжность программного обеспечения (обзор)//АиТ. 1986. № 10.
5. **Майерс Г.** Надёжность программного обеспечения. М.: Мир, 1980.
6. **Пальчун Б. П., Стрельцов А. А.** Модели надёжности программного обеспечения АСУ//Тез. докл. респ. конф. «Надёжность и качество программного обеспечения» (Львов, 29–31 января 1985 г.). Киев, 1985.