

УДК 681.321

В.С. ХАРЧЕНКО<sup>1</sup>, О.Н. ОДАРУЩЕНКО<sup>2</sup>, Е.Б. ОДАРУЩЕНКО<sup>2</sup><sup>1</sup>*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*<sup>2</sup>*Полтавский военный институт связи, Украина*

## БАЗОВЫЕ МНОГОФРАГМЕНТНЫЕ МАКРОМОДЕЛИ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ

В статье рассмотрены вопросы оценки надежности отказоустойчивых компьютерных систем информационно-управляющих комплексов (ОКС ИУК). Предложен подход по формированию множества базовых многофрагментных макромоделей оценки надежности ОКС ИУК, в основу которого положен введенный ранее принцип многофрагментности и анализ возможных вариантов комбинаций параметров, определяющих надежностные характеристики программных средств ОКС ИУК.

**базовая многофрагментная макро модель, дефект физический, дефект проектирования программных средств**

### Введение

Стремительное развитие общества, рост экономики, проблемы обеспечения безопасности государства неразрывно связаны с разработкой и внедрением сложных информационно-управляющих систем (комплексов) различного назначения. Примерами таких систем являются: ИУС военного назначения; АЭС; транспортных коммуникаций; правительственных и банковских телекоммуникационных систем и другие. Естественно, что с учетом общественной важности таких систем, к ним предъявляются повышенные требования по надежности.

Ядром таких систем являются отказоустойчивые компьютерные системы. Важность ОКС можно подчеркнуть тем, что на долю разработки, производства и испытаний таких систем выпадает до 40% стоимости ИУС в целом.

Выполнить высокие требования к надежности ОКС ИУС возможно только прогнозируя состояние системы на ранних этапах проектирования. Прогноз возможен на основе использования соответствующих моделей и методов оценки надежности ОКС ИУС. Очевидно, что эти методы должны учитывать

основные функции системы; архитектуру построения; используемую элементную базу; условия применения; и связанные с этими факторами источники отказов.

**Формулирование проблемы.** Известно, что современные ОКС ИУС представляют собой сложные программно-аппаратные комплексы. При этом нарушение функционирования таких комплексов обусловлено проявлением дефектов различных групп. К одной из таких групп относятся дефекты, которые возникают под действием внешних и внутренних факторов – физические дефекты (ДФ). Эти дефекты проявляются в виде устойчивых отказов или кратковременных сбоев аппаратных средств ОКС. К другой группе относятся дефекты проектирования и производства (ДП), которые являются следствием ошибочных действий, допущенных при создании системы. Эти дефекты проявляются при определенных условиях в процессе применения системы по назначению. В основном ими могут быть поражены программные средства. Анализ тенденций развития ОКС ИУС показывает, что с ростом числа функций возлагаемых на такие системы увеличивается влияние дефектов проектирования программных средств

(ДП ПС) на надежность систем в целом. Это вызвано в основном следующими факторами [1, 2]:

- проектирование ПС плохо поддается автоматизации;
- чаще всего создание новых систем требует разработки нового программного обеспечения;
- проведение контроля ПС требует значительных материальных и временных затрат при необходимости разработки индивидуальных методов контроля и испытаний;
- несовершенство применяемых методов и средств тестирования и отладки приводит к "переносу" части дефектов на этап применения.

Из выше приведенного следует вывод о том, что высокие требования к надежности ОКС ИУС могут быть выполнены только при условии снижения влияния последствий дефектов как аппаратных, так и программных средств. В настоящее время существует целый ряд методов оценки и обеспечения надежности ОКС ИУС, учитывающих при расчетах проявление ДФ. В основе этих методов лежат теория резервирования и методы использования различных видов избыточности: структурной, временной, функциональной. С позиции оценки надежности ОКС одним из основных недостатков таких методов является учет ими только надежностных характеристик аппаратных средств, без учета параметров, определяющих надежностные характеристики ПС. В то же время существует большой набор методов оценки надежности ПС. Основой этих методов являются модели оценки надежности программных средств [6 – 12]. Следовательно, для повышения достоверности проводимых оценок необходимо разрабатывать научно-методический аппарат, с помощью которого решалась бы задача комплексной оценки надежности ОКС ИУС.

Комплексность заключается в разработке моделей и методов оценки надежности рассматриваемых систем с учетом параметров, определяющих надежность как аппаратной, так и программной компо-

нент. Кроме того, опыт применения сложных программных продуктов показывает, что в ходе эксплуатации производится устранение проявляющихся ДП ПС, и в ПС вносятся дополнительные изменения [10 – 12]. Очевидно, что этот фактор также приводит к изменению надежностных характеристик ПС и его учет является важным вопросом. Решить поставленную задачу возможно несколькими этапами. Основное их содержание сводится к следующему [13]:

- необходимо идентифицировать объект (выбрать из множества существующих архитектуру построения ОКС и построить функциональную схему системы);
- определить основные режимы и условия функционирования системы;
- определить цель проводимого анализа (определить номенклатуру показателей надежности);
- определить исходные данные для проведения моделирования (перечень параметров, определяющих надежностные характеристики АС и ПС);
- провести качественный анализ (построение графа состояний системы);
- провести количественный анализ (расчет значений показателей из определенной ранее номенклатуры);
- сформулировать выводы о возможности применения выбранной архитектуры.

Изложению основных подходов по разработке научно-методического аппарата проведения качественного и количественного анализа посвящена данная статья.

### **Модели и результаты их исследования**

Решение задачи комплексного моделирования надежности ОКС ИУС осуществляется на основе разработки математических моделей, которые учитывают параметры, характеризующие надежностные свойства аппаратных и программных средств. В качестве таких параметров выбираются следующие.

Параметры АС:  $\lambda_{ДФ}$  – интенсивность проявления ДФ АС;  $\mu_{ДФ}$  – интенсивность восстановления после проявления ДФ АС.

Параметры ПС:  $\lambda_{ДП}$  и  $\Delta\lambda_{ДП}$  – интенсивность проявления ДП ПС и величина ее изменения после устранения проявившегося дефекта;  $\mu_{ДП}$  и  $\Delta\mu_{ДП}$  – интенсивность восстановления системы после проявления ДП ПС и величина ее изменения после устранения проявившегося дефекта.

Параметры  $\lambda_{ДФ}$  и  $\mu_{ДФ}$  определяются на основе существующих статистических данных по отказам ИУС. Параметры, определяющие надежность характеристики ПС, определяются на основе разработанной методики, которая основана на комплексировании моделей оценки надежности ПС, предложенных М. Холстедом [10], Дж.Д. Мусой [9] и Г. Миллсом [10].

Следует отметить, что параметры  $\Delta\lambda_{ДП}$  и  $\Delta\mu_{ДП}$  могут быть как постоянными величинами и приводить к линейному характеру изменения соответствующих интенсивностей, так и изменяющимися. В последнем случае характер изменения интенсивностей проявления ДП и восстановления будет носить нелинейный вид. Вид нелинейности можно определить после исследования характера и „веса” соответствующего дефекта. Само по себе такое определение представляет отдельную достаточно сложную задачу. Для учета изменения рассматриваемых параметров во времени при построении математических моделей применен принцип многофрагментности, который заключается в представлении марковских моделей оценки надежности ОКС ИУС в виде совокупности повторяющихся фрагментов, отличающихся одним или несколькими параметрами и описываемых системой дифференциальных уравнений Колмогорова [3 – 5].

Применение этого принципа позволяет:

- снизить размерность решаемой задачи;
- повысить наглядность исследуемой модели;
- более полно учесть особенности некоторых

режимов функционирования систем.

Возможные варианты комбинаций интенсивностей проявления и устранения ДП и величин их изменения удобно представить в виде дерева вариантов (рис. 1). Дерево составлено путем логических рассуждений и отражает полное множество вариантов комбинаций параметров и соответствующие им стратегии построения базовых многофрагментных моделей (БММ) оценки надежности ОКС ИУС.

Под БММ понимается совокупность повторяющихся макромоделей (фрагментов), внутренняя структура которых и внешние связи зависят от наборов выбранных базовых параметров, определяющих надежность характеристики АС и ПС.

Дерево вариантов получено в соответствии с четырьмя признаками: первый признак – исходные параметры  $\lambda_{ДП}$  и  $\mu_{ДП}$ ; второй признак – варианты изменения исходных параметров; третий признак – варианты изменения величин  $\Delta\lambda_{ДП}$  и  $\Delta\mu_{ДП}$ ; четвертый признак – стратегии, определяющие вид БММ и формализованный номер БММ, где первая цифра номера определяет основные параметры  $\lambda_{ДП}$ ,  $\mu_{ДП}$ ; вторая определяет номер варианта характера изменения параметров  $\lambda_{ДП}$  и  $\mu_{ДП}$ ; третья определяет номер варианта изменения величин  $\Delta\lambda_{ДП}$  и  $\Delta\mu_{ДП}$ ; четвертая определяет номер стратегии изменения величин  $\Delta\lambda_{ДП}$  и  $\Delta\mu_{ДП}$ . Полная числовая последовательность определяет основное содержание базовой многофрагментной макромоделей.

Таким образом, получено множество БММ, описывающих функционирование ОКС ИУС:

1) БММ №1 (1.2.1.1) –  $\Delta\lambda_{ДП}$  – величина постоянная в каждом фрагменте  $\Delta\lambda_{ДП} \in \{\Delta\lambda_{ДП1}, \dots, \Delta\lambda_{ДПN}\}$ , где  $N$  – число фрагментов.

2) БММ №2 (1.2.1.2) –  $\Delta\lambda_{ДП}$  – величина постоянная в зоне фрагментов БММ  $\Delta\lambda_{ДП} \in \{\Delta\lambda_{ДП1}, \dots, \Delta\lambda_{ДПN}\}$ .

3) БММ №3 (1.2.2.1) –  $\Delta\lambda_{ДП}$  – величина, изменяющаяся в каждом фрагменте  $\Delta\lambda_{ДП} \in \{\Delta\lambda_{ДП1}, \dots, \Delta\lambda_{ДПN}\}$ .

**ВАРИАНТЫ**

**Признаки классификации**

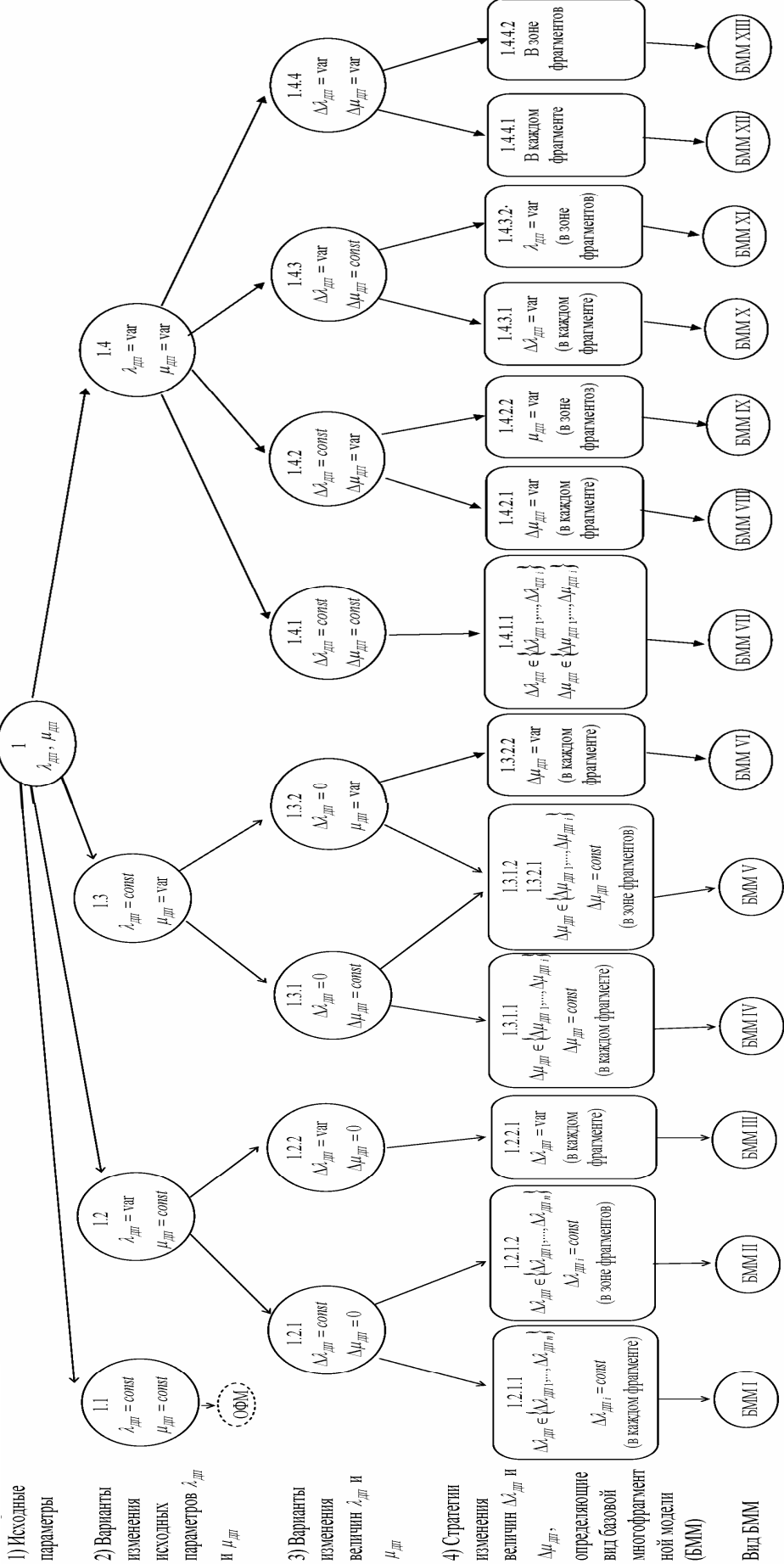


Рис. 1. Дерево вариантов

4) БММ №4 (1.3.1.1) –  $\Delta\mu_{ДП}$  – величина постоянная в каждом фрагменте  $\Delta\mu_{ДП} \in \{\Delta\mu_{ДП1}, \dots, \Delta\mu_{ДПN}\}$ .

5) БММ №5 (1.3.1.2 и 1.3.2.1)  $\Delta\mu_{ДП}$  – величина постоянная в зоне фрагментов  $\Delta\mu_{ДП} \in \{\Delta\mu_{ДП1}, \dots, \Delta\mu_{ДПN}\}$ .

6) БММ №6 (1.3.2.2) –  $\Delta\mu_{ДП}$  – величина, изменяющаяся в каждом фрагменте  $\Delta\mu_{ДП} \in \{\Delta\mu_{ДП1}, \dots, \Delta\mu_{ДПN}\}$ .

7) БММ №7 (1.4.1.1) – в модели учитывается изменение величин  $\lambda_{ДП}$  и  $\mu_{ДП}$ . Величины  $\Delta\lambda_{ДП}$  и  $\Delta\mu_{ДП}$  постоянны в каждом фрагменте, где  $\Delta\lambda_{ДП} \in \{\Delta\lambda_{ДП1}, \dots, \Delta\lambda_{ДПN}\}$  и  $\Delta\mu_{ДП} \in \{\Delta\mu_{ДП1}, \dots, \Delta\mu_{ДПN}\}$ .

8) БММ №8 (1.4.2.1) – в модели учитывается изменение величин  $\lambda_{ДП}$  и  $\mu_{ДП}$ . Величина  $\Delta\lambda_{ДП}$  постоянна в каждом фрагменте и  $\Delta\lambda_{ДП} \in \{\Delta\lambda_{ДП1}, \dots, \Delta\lambda_{ДПN}\}$ . Величина  $\Delta\mu_{ДП}$  изменяется в каждом фрагменте.

9) БММ №9 (1.4.2.2) – в модели учитывается изменение величин  $\lambda_{ДП}$  и  $\mu_{ДП}$ . Величина  $\Delta\lambda_{ДП}$  постоянна в каждом фрагменте и  $\Delta\lambda_{ДП} \in \{\Delta\lambda_{ДП1}, \dots, \Delta\lambda_{ДПN}\}$ . Величина  $\Delta\mu_{ДП}$  изменяется в зоне фрагментов.

10) БММ №10 (1.4.3.1) – в модели учитывается изменение величин  $\lambda_{ДП}$  и  $\mu_{ДП}$ . Величина  $\Delta\mu_{ДП}$  постоянна в каждом фрагменте и  $\Delta\mu_{ДП} \in \{\Delta\mu_{ДП1}, \dots, \Delta\mu_{ДПN}\}$ . Величина  $\Delta\lambda_{ДП}$  изменяется в каждом фрагменте.

11) БММ №11 (1.4.3.2) – в модели учитывается изменение величин  $\lambda_{ДП}$  и  $\mu_{ДП}$ . Величина  $\Delta\mu_{ДП}$  постоянна в каждом фрагменте и  $\Delta\mu_{ДП} \in \{\Delta\mu_{ДП1}, \dots, \Delta\mu_{ДПN}\}$ . Величина  $\Delta\lambda_{ДП}$  изменяется в зоне фрагментов.

12) БММ №12 (1.4.4.1) – в модели учитывается изменение величин  $\lambda_{ДП}$  и  $\mu_{ДП}$ . Величины  $\Delta\mu_{ДП}$  и  $\Delta\lambda_{ДП}$  изменяются в каждом фрагменте.

13) БММ №13 (1.4.4.2) – в модели учитывается изменение величин  $\lambda_{ДП}$  и  $\mu_{ДП}$ . Величины  $\Delta\mu_{ДП}$  и  $\Delta\lambda_{ДП}$  изменяются в зоне фрагментов.

Моделирование процесса функционирования вычислительной системы в рамках параметров БММ №1, 2, 4, 5, 7 относительно легко реализуется при помощи математического аппарата марковских случайных процессов с непрерывным временем и

дискретными состояниями. Для БММ № 8 – 13 также возможно использование указанного методического аппарата. Однако вследствие учета изменения параметров  $\lambda_{ДП}$  и  $\mu_{ДП}$  на величины  $\Delta\lambda_{ДП}$  и  $\Delta\mu_{ДП}$  размерность задачи значительно возрастает, что приводит к выводу о необходимости применения специальных методов. В качестве таких математических методов возможно использование методов, описывающих полумарковские случайные процессы и метод имитационного моделирования.

Опираясь на приведенные выше сведения, разработано множество макрографов БММ, описывающих процесс функционирования ОКС ИУС с учетом одного из вариантов изменения параметров, характеризующих надежность программной компоненты.

Макрограф БММ № 1 представлен на рис. 2.

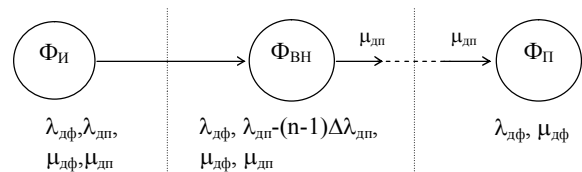


Рис. 2. Макрограф БММ №1 (1.2.1.1)

Он содержит:

$$M_{\phi} = \{\Phi_{и}, \Phi_{вн}, \Phi_{п}\}.$$

где  $\Phi_{и}$  – исходный фрагмент;

$\Phi_{вн}$  – внутренний фрагмент,

$\Phi_{п}$  – последний фрагмент.

В общем случае  $\Phi_{и}$  соответствуют параметры  $\lambda_{дф}, \lambda_{дп}, \mu_{дф}, \mu_{дп}$ ;  $\Phi_{вн}$  соответствуют параметры  $\lambda_{дф}, \lambda_{дп(n)} = (\lambda_{дп(0)} - (n-1)\Delta\lambda_{дп}), \mu_{дф}, \mu_{дп}$ ;  $\Phi_{п}$  соответствуют параметры  $\lambda_{дф}, \mu_{дф}$ .

Логика функционирования состоит в следующем. Момент начала функционирования системы описывается исходным фрагментом. Переход к внутренним фрагментам определяется последовательностью событий. Они заключаются в проявлении ДП ПС и восстановлении ПС после их проявления. Переходы между внутренними фрагментами определяются параметром  $\mu_{дп}$ . При этом  $\mu_{дп}$  остается величиной постоянной. В последнем фрагменте

все ДП ПС устранены, и функционирование системы определяется параметрами  $\lambda_{ДФ}, \mu_{ДФ}$ .

Макрограф БММ № 2 представлен на рис. 3.

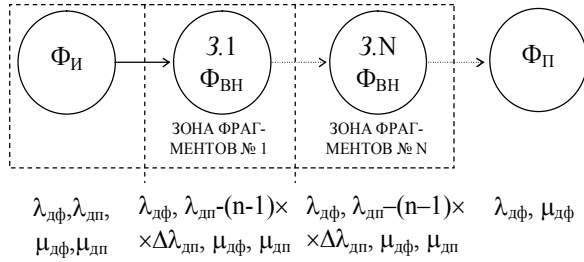


Рис. 3. Макрограф БММ № 2 (1.2.1.2)

Он содержит:

$$M_{\Phi} = \{\Phi_{И}, \Phi_{ВН}(3.1, 3.N), \Phi_{П}\}.$$

где  $\Phi_{И}$  – исходный фрагмент;

$\Phi_{ВН}(3.1)$  – внутренний фрагмент 1-й зоны;

$\Phi_{ВН}(3.N)$  – внутренний фрагмент N-й зоны;

$\Phi_{П}$  – последний фрагмент.

Зона фрагментов БММ № 2 – это набор внутренних фрагментов модели, в которых величина изменения интенсивности проявления  $\Delta\lambda_{ДП}$  ДП ПС не изменяется.

В общем случае  $\Phi_{И}$  соответствуют параметры  $\lambda_{ДФ}, \lambda_{ДП}, \mu_{ДФ}, \mu_{ДП}$ ;  $\Phi_{ВН}$  соответствуют параметры  $\lambda_{ДФ}, \lambda_{ДП(N)} = (\lambda_{ДП(0)} - (n - 1)\Delta\lambda_{ДП}), \mu_{ДФ}, \mu_{ДП}$ ;  $\Phi_{П}$  соответствуют параметры  $\lambda_{ДФ}, \mu_{ДФ}$ .

Логика функционирования состоит в следующем. Момент начала функционирования системы описывается исходным фрагментом. Переход к внутренним фрагментам определяется последовательностью событий. Они заключаются в проявлении ДП ПС и восстановлении ПС после их проявления. Переходы между зонами внутренних фрагментов определяются параметром  $\mu_{ДП}$ . При этом  $\mu_{ДП}$  остается величиной постоянной. В последнем фрагменте все ДП ПС устранены, и функционирование системы определяется параметрами  $\lambda_{ДФ}, \mu_{ДФ}$ .

Базовой многофрагментной макромоделю БММ № 3 (1.2.2.1) соответствует следующий вариант комбинации базовых параметров.

Интенсивность проявления ДП ПС величина  $\lambda_{ДП} = var$  (в каждом внутреннем фрагменте).

Величина изменения интенсивности проявления ДП ПС  $\Delta\lambda_{ДП}$  величина изменяющаяся  $\Delta\lambda_{ДП} \in \{\Delta\lambda_{ДП1}, \dots, \Delta\lambda_{ДПN}\}$  – по числу внутренних фрагментов.

Интенсивность восстановления после проявления ДП ПС есть величина постоянная  $\mu_{ДП} = const$ .

Макрограф аналогичен представленному на рис. 3. Определение закона изменения параметра  $\Delta\lambda_{ДП}$  от одного фрагмента к другому представляет собой отдельную достаточно сложную задачу. Решить эту задачу возможно, разработав методику определения „веса“ (сложности) ДП ПС.

В рамках БММ № 4, 5 и 6 представляется возможным проанализировать влияние на надежность ОКС изменения параметра  $\mu_{ДП}$ . При этом модель БММ № 4 учитывает изменение  $\mu_{ДП}$  в каждом внутреннем фрагменте, а БММ № 5 – изменение этого параметра при переходе от одной зоны фрагментов к другой.

В БММ № 7 осуществляется учет изменения интенсивностей проявления ДП ПС и восстановления после проявления. Данной модели соответствует следующий вариант комбинации параметров:

$$\lambda_{ДП} = var \rightarrow \Delta\lambda_{ДП} = const \text{ (величина постоянная в каждом внутреннем фрагменте);}$$

$$\mu_{ДП} = var \rightarrow \Delta\mu_{ДП} = const \text{ (величина постоянная в каждом внутреннем фрагменте).}$$

Макрограф БММ № 7 представлен на рис. 4.

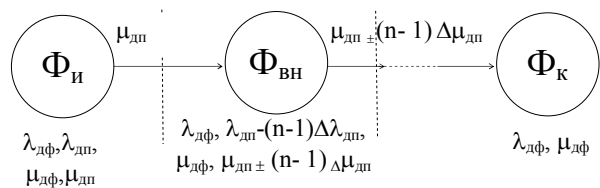


Рис. 4. Макрограф, соответствующий БММ № 7

Возможны другие варианты комбинаций параметров, определяющих надежность программной компоненты, что описывается базовыми многофрагментными макромоделю БММ № 8 ÷ 13.

Опираясь на разработанные БММ, возможно получить марковские многофрагментные (МФМ) модели оценки надежности ОКС ИУС и провести рас-

чет коэффициента готовности. В качестве примера выбрана непрерывно функционирующая ОКС с двумя аппаратными каналами. В процессе функционирования производится сравнение результатов вычислений каналов. Для построения моделей приняты следующие допущения:

- время до проявления отказов и восстановления после обнаружения распределено экспоненциально;
- контроль непрерывный (поканальное сравне-

ние);

- восстановление осуществляется при неограниченных ресурсах;
- встроенные средства контроля каналов отсутствуют;
- в ходе эксплуатации системы все ДП ПС устраняются.

МФМ, построенная на основе БММ № 1 ( $\lambda_{ДП} = var$  и  $\mu_{ДП} = const$ ), представлена на рис. 5.

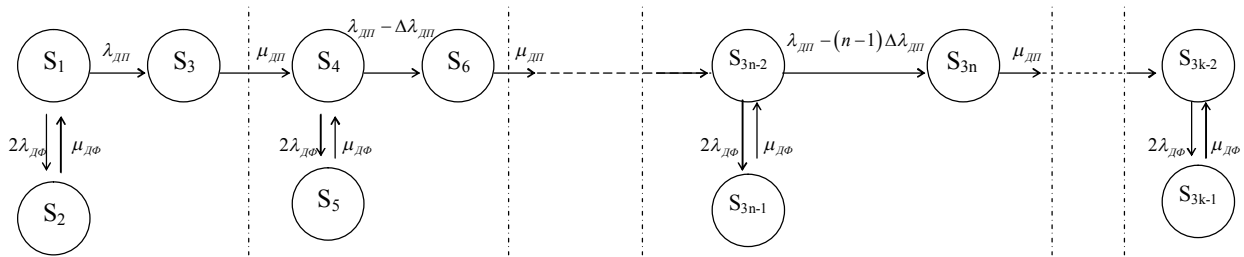


Рис. 5. МФМ для дублированной архитектуры, построенная на основе БММ № 1

Здесь:

- $SF_1 = \{S_1, S_4, \dots, S_{3n-2}\}$  – множество функциональных состояний, в которых система работоспособна;
- $SF_2 = \{S_2, S_5, \dots, S_{3n-1}\}$  – множество функциональных состояний, в которых произошел отказ одного из каналов по АК;
- $SF_3 = \{S_3, S_6, \dots, S_{3n}\}$  – множество функциональных состояний, в которых произошел отказ одного из каналов по ПК.

Логика функционирования системы состоит в следующем. Реализуется схема простого канального сравнения. Отказ системы по АК одного из каналов приводит к отказу системы в целом. В начальный момент времени система реализует все предписанные функции и находится в состоянии  $S_1$ . В случайный момент времени проявляются ДППС или ДФАС. При проявлении ДФАС система переходит в состояние  $S_2$  с интенсивностью  $2\lambda_{ДФ}$ . Далее с интенсивностью  $\mu_{ДФ}$  система восстанавливается. При проявлении ДППС система переходит в состояние  $S_3$  и с интенсивностью  $\mu_{ДП}$  восстанавливается, переходя во второй фрагмент графа (состояние  $S_4$ ). В соответ-

ствии с принятыми допущениями, после каждого события, связанного с интенсивностью проявления ДППС, параметр  $\lambda_{ДП}$  уменьшается на постоянную величину  $\Delta\lambda_{ДП}$ . Число фрагментов определяется величиной шага  $\Delta\lambda_{ДП}$ . Система ведет себя аналогично во всех внутренних фрагментах. В последнем фрагменте все ДП устранены и нарушение функционирования может быть вызвано только ДПАС.

СДУ в обобщенном виде имеет вид:

$\Phi_u$  – исходный фрагмент

$$\begin{cases} dP_1/dt = -(2\lambda_{ДФ} + \lambda_{ДП})P_1(t) + \mu_{ДФ}P_2(t); \\ dP_2/dt = -\mu_{ДФ}P_2(t) + 2\lambda_{ДФ}P_1(t); \\ dP_3/dt = -\mu_{ДП}P_3(t) + \lambda_{ДП}P_1(t), \end{cases} \quad (1)$$

$\Phi_{вн}$  – внутренний фрагмент

$$\begin{cases} dP_{3n-2}/dt = -[\lambda_{ДП} - (n-1)\Delta\lambda_{ДП}] + 2\lambda_{ДФ} \times \\ \quad \times P_{3n-2}(t) + \mu_{ДП}P_{3n}(t) + \mu_{ДФ}P_{3n-1}(t); \\ dP_{3n-1}/dt = -\mu_{ДФ}P_{3n-1}(t) + 2\lambda_{ДФ}P_{3n-2}(t); \\ dP_{3n}/dt = -\mu_{ДП}P_{3n}(t) + [\lambda_{ДП} - (n-1)\Delta\lambda_{ДП}]P_{3n-2}(t), \end{cases} \quad (2)$$

$\Phi_n$  – последний фрагмент

$$\begin{cases} dP_{3n-2}/dt = -2\lambda_{ДФ}P_{3n-2}(t) + \mu_{ДФ}P_{3n-1}(t); \\ dP_{3n-1}/dt = -\mu_{ДФ}P_{3n-1}(t) + 2\lambda_{ДФ}P_{3n-2}(t). \end{cases} \quad (3)$$

Начальные условия:  $P_1(t) = 1$  и  $P_i(t) = 0$ , где  $i = \overline{2, 3, \dots, n-1}$  при  $t = 0$ .

МФМ, построенная на основе БММ № 7 ( $\lambda_{ДП} = var$  и  $\mu_{ДП} = var$ ) представлена на рис. 6.

Условие нормировки:  $\sum_{i=1}^{3n-1} P_i(t) = 1$ .

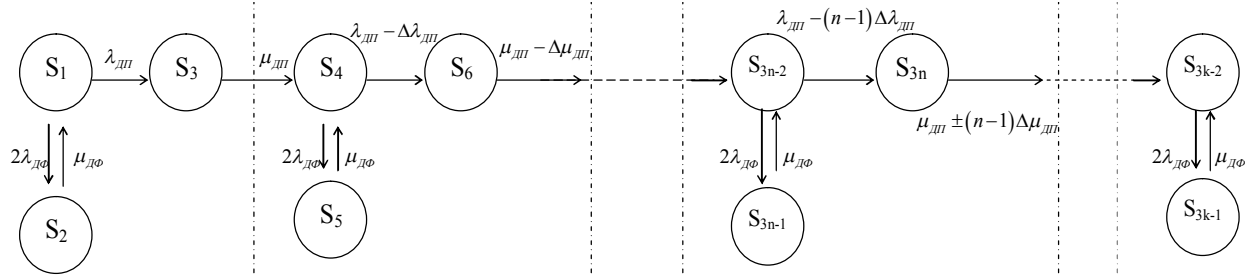


Рис. 6. МФМ для дублированной архитектуры, построенная на основе БММ № 7

Физический смысл функциональных состояний аналогичен описанию представленному выше. Логика функционирования системы подобна описанию графа рис. 5. Основное отличие заключается в том, что граф рис. 6 учитывает изменение (уменьшение) интенсивности восстановления ПС после проявления ДППС.

Функция готовности определяется как сумма вероятностей нахождения системы в работоспособных состояниях. Численные значения используемых параметров представлены в табл. № 1.

Таблица 1

Численные значения параметров МФМ

$\lambda_{ДФ}$ (1/ч)	$\mu_{ДФ}$ (1/ч)	$\lambda_{ДП}$ (1/ч)	$\mu_{ДП}$ (1/ч)	$\Delta\lambda_{ДП}$ (1/ч)	$\Delta\mu_{ДП}$ (1/ч)
$10^{-3}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,2	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-2}$

Графики зависимости функции готовности от времени для дублированной архитектуры, полученные на основе рассмотренного научно-методического аппарата анализа надежности ОКС ИУС, представлены на рис. 7.

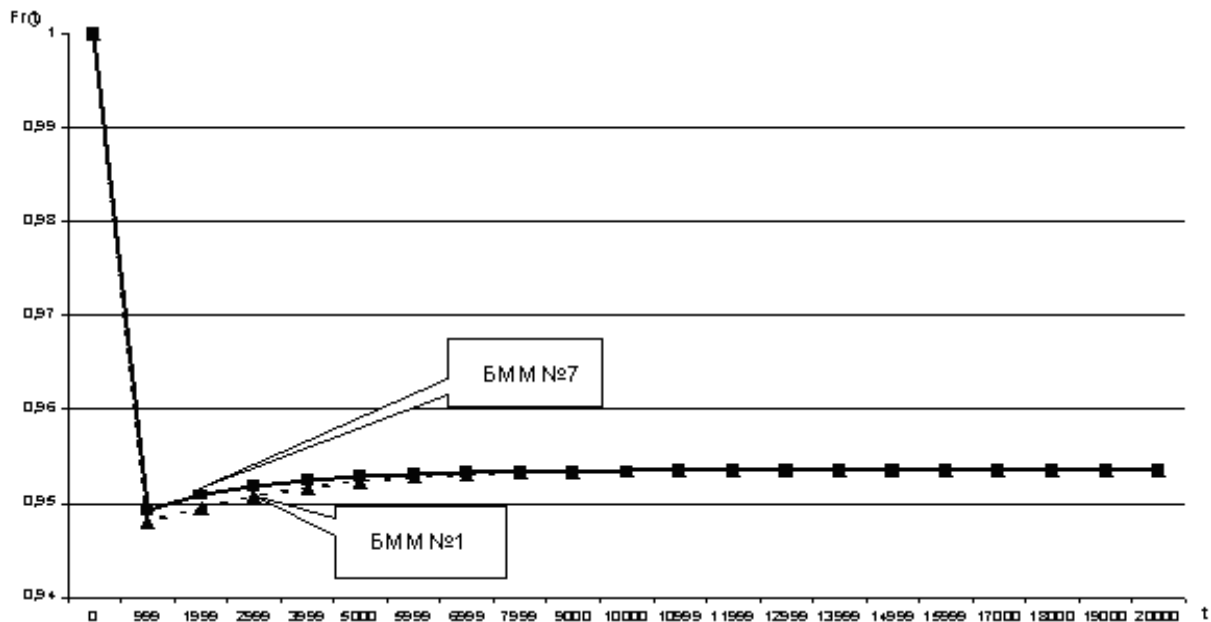


Рис. 7. Графики зависимости функции готовности от времени, полученные для дублированной архитектуры с применением БММ № 1 и 7



### Заключення

1. Применение метода получения базовых многофрагментных макромоделей, описывающих процесс функционирования ОКС ИУС с учетом параметров АК и ПК, позволяет повысить точность оценок готовности таких систем. Из анализа графиков рис. 7 видно, что учет изменения интенсивности восстановления после проявления ДППС особенно важен для прогнозирования поведения системы на начальном этапе применения.

2. Многофрагментные марковские модели оценки надежности ОКС ИУС, учитывающие, в отличие от известных, стратегии изменения параметров, определяющих надежность характеристики АС и ПС, позволяют получить уточненные количественные оценки показателей надежности таких систем.

3. Экспериментально уточнены значения интенсивностей и их изменения во времени, исследовано их влияние на погрешности ОКС.

### Литература

1. Харченко В.С. Теоретические основы дефекутоустойчивых цифровых систем с версионной избыточностью. – Х.: МОУ, 1996. – 505 с.

2. Харченко В.С., Жихарев В.Я., Илюшко В.М., Нечипорук Н.В. Многоверсионные системы, технологии, проекты. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т "Харьк. авиац. ин-т", 2003. – 486 с.

3. Одарущенко Е.Б. Оценка надежности восстанавливаемых цифровых систем на основе многофрагментных марковских моделей // Системы обработки информации. – Х.: ХФВ „Транспорт України”, 2000. – Вып. 4 (10). – 212 с.

4. Терминологические аспекты теории надежности программных средств // Радиоелектронні і

комп'ютерні системи. – 2004. – Вып. 30. – С. 125-132.

5. Одарущенко О.Н., Одарущенко Е.Б., Стороженко А.В., Гроза П.Н. Оценка надежности программно-технических комплексов на основе многофрагментных марковских моделей // Системы обработки информации. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2001. – Вып. 3 (13). – 188с.

6. Производительность Web-служб. Анализ, оценка и планирование. Пер. с англ. / Дэниел А. Менаске, Виргилио А.Ф. Алмейда – Спб.: ООО «ДиаСофтЮП», 2003. – 480 с.

7. Ежедневник "Computerworld", # 47, 2000. – // Издательство "Открытые системы". – [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: www.osp.ru.

8. K. Vaidyanathan, R. Harper, S.V. Hunter, and K.S. Trivedi, „Analysis and Implementation of Software Rejuvenation in Cluster Systems” Proc. Joint Intl. Conf. Measurement and Modeling of Computer Syst., ACM Sigmetrics and IFIP WG 7.3. – Cambridge, Massachusetts, June 16-20. – 2001. – P. 62-71.

9. Муса Д. Измерение и обеспечение надежности программных средств // ТИИЭР. – 1980. Т. 68, №9. – С. 113-128.

10. Холстед М.Х. Начала науки о программах. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 128 с.

11. Майерс Г. Искусство тестирования программ: Пер. с англ. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 164 с.

12. Карповский Е.Я., Чижов С.А. Надежность программной продукции. – К.: Техніка, 1990. – 160 с.

13. ДСТУ Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення. Держстандарт України, 1995.

*Поступила в редакцію 3.02.2006*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Б.М. Конорев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.