

УДК 621.03

В.С. ХАРЧЕНКО<sup>1</sup>, Н.П. БОРОДАВКА<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина<sup>2</sup>НТ СКБ «ПОЛИСВИТ» ГНПП «Объединение Коммунар», Украина

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АНАЛИЗА ЖИВУЧЕСТИ БОРТОВЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Проанализированы возможности использования цветных сетей Петри как имитационных моделей функционирования бортовых информационно-управляющих систем (БИУС). Предложено два вида сетей Петри для моделирования функционирования БИУС: собственная и унифицированная сети. Даны элементы методики анализа живучести БИУС с использованием этих сетей.

**живучесть, имитационное моделирование, сети Петри**

### Введение

В [1, 2] в качестве одного из средств повышения живучести БИУС предложено использовать функциональную структуру (ФС) БИУС, определены положения, на которых базируется анализ живучести БИУС, разработано единое формализованное представление ФС для построения моделей разных типов, используемых при проведении такого анализа.

Понятие ФС основывается на том, что БИУС функционально представляет собой множество задач, а выполнение каждой задачи представляется тройкой функций: прием данных, принятие решения, выдача данных. Под ФС понимается вариант разбиения функций всех задач на множества и логических связей между ними так, что каждое множество выполняется отдельным компонентом (компонент – аппаратные или программные составляющие БИУС или их объединения).

Анализ живучести БИУС базируется на том, что функционирование БИУС представляется, как и выполнение задач, приемом, формированием и выдачей данных. Живучесть БИУС определяется способностью БИУС обеспечивать при возникновении отказов наличие данных, характеризующих ее работоспособность и безопасность функционирования

(контролируемых данных). Для моделирования БИУС представляется как совокупность данных, компонентов и каналов связи. Получение данных зависит от работоспособности компонентов, каналов связи и правильности формирования данных. Результатами моделирования являются оценки получения контролируемых данных.

Формализованное представление БИУС отражает принадлежность данных и каналов связи компонентам и зависимость данных от других данных, компонентов и каналов связи. Для этого используются: матрицы зависимости данных друг от друга  $L^{D_0}$  и  $L^D$ , матрица зависимости данных от компонентов  $L^C$ , матрица зависимости данных от каналов связи  $L^{CH}$ , матрица  $CH$  с информацией о том, какими каналами связи выдаются и принимаются данные. Такое представление полностью описывает избыточную БИУС, а для избыточной БИУС описывает нерезервированную часть и дополняется информацией о резерве. Формализованное представление уточнено по отношению к приведенному в [1].

В [2] описаны аналитические детерминированные и вероятностные модели получения данных для избыточной БИУС и введена детерминированная количественная оценка живучести БИУС  $Dt$  (в [2]

обозначена как  $W$ ). Для избыточной БИУС полученные модели дополняются соответственно используемому резерву. Для оценки живучести БИУС используются также вероятностная и комплексная оценки. Вероятностная оценка  $P$  есть вероятностная оценка того, что БИУС не попадет в критическое состояние. Комплексная оценка  $DtP$  показывает, насколько живучесть БИУС далека от идеальной ( $Dt = 1$ ,  $P = 1$ ) и определяется по формуле:

$$DtP = \sqrt{(1 - Dt)^2 + (1 - P)^2}.$$

Для современных БИУС построение аналитических моделей по ряду причин становится все более трудоемким. В [2] обоснован выбор сетей Петри как математического аппарата для построения имитационных моделей. Целью данной статьи является разработка элементов для построения и использования сетей Петри как моделей функционирования БИУС при проведении анализа ее живучести.

## 1. Общие положения использования сетей Петри

Такие особенности сетей Петри, как асинхронная природа, недетерминированность и неодновременность выполнения [3] могут создать проблемы имитации функционирования БИУС. Асинхронная природа требует решения задачи отсчета времени при определении вероятностной оценки живучести. Недетерминированность и неодновременность выполнения могут привести к неравномерному формированию данных (выполнению задач) вплоть до его прекращения для некоторых из них. Поэтому выполнение сети должно обеспечивать равномерность выполнения задач. Возможны проблемы поддержания наличия в сети независимых данных, возникновения множества одинаковых фишек-данных, моделирования элементов системы и ситуаций, возникающих в процессе функционирования БИУС.

Для имитации функционирования принято, что при получении всех входных данных, отсутствии

отказа компонента и условий неправильного формирования данные будут сформированы, а при отсутствии отказа канала связи – переданы. Анализ живучести БИУС может проводиться или на основании результатов моделирования, или путем анализа самой сети Петри. Задачи анализа сети Петри решены только для некоторых классов сетей, имеют экспоненциальную сложность и затруднительны для практического использования [3, 4]. Поэтому для анализа живучести БИУС строится произвольная сеть Петри, а анализ проводится на основании результатов моделирования. Предлагается два вида сетей Петри, условно названных “собственная сеть Петри” и “унифицированная сеть Петри”. Собственная сеть соответствует структуре БИУС – множествам компонентов, каналов связи, данных, принадлежности каналов связи и данных компонентам. Унифицированная сеть не отражает структуру БИУС и имеет общий принцип построения для всех БИУС. Соответствие унифицированной сети той или иной БИУС определяется множеством фишек и их влиянием друг на друга. Для обоих видов сетей должны быть решены следующие задачи:

- для БИУС – представление данных, их формирования и передачи, отказов и их влияния;
- для сети Петри – начальная маркировка, равномерность отработки всех задач БИУС.

## 2. Собственная сеть Петри

Для построения собственной сети Петри требуются матрицы  $L^{D_0}$ , СН и информация о резервировании. Фишки представляют данные. Позиции соответствуют условиям функционирования компонентов и каналов связи, переходы – процессу функционирования. Используются сдерживающие дуги, цветные фишки и дуги для представления данных и отказов, “нейтральные” дуги, по которым могут двигаться фишки любых цветов. Использование цветных сетей Петри для расширения их функцио-

нальных возможностей известно [5] и требует специальных правил выполнения сети. Вводятся следующие правила построения и выполнения собственной сети Петри:

- фишки не могут быть “нейтрального” цвета;
- по цветной дуге могут двигаться только фишки того же цвета, что и дуга;
- переход имеет или только цветные, или только нейтральные входные и выходные дуги;
- переход с цветными дугами запускается, если для каждой его входной дуги есть фишка того же цвета, что и дуга, и нет фишки того же цвета, что и сдерживающая дуга; фишки, образующиеся в результате запуска перехода, имеют тот же цвет, что и его выходные дуги;
- переход с нейтральными дугами запускается по классическим правилам выполнения сети Петри; фишки, образующиеся в результате запуска такого перехода, имеют тот же цвет, что и фишка, запустившая переход; переход с нейтральными дугами имеет только одну входную дугу;
- переход, соответствующий формированию компонентом выходных данных, имеет только цветные дуги;
- переход, соответствующий передаче данных по каналу связи, может иметь или цветные, или нейтральные дуги;
- пока не будут запущены все возможные переходы, соответствующие одному компоненту или каналу связи, никакие другие переходы запускаться не должны; это правило обеспечивает равномерность отработки задач БИУС.

Проблемы поддержания наличия в сети независимых данных и возникновения множества одинаковых фишек-данных решаются введением специальных комбинаций позиций и переходов.

Начальная маркировка соответствует наличию всех независимых данных и входных данных каждого компонента, что равносильно исправности БИУС в начальный момент времени.

Для моделирования отказов используются фишки и сдерживающие дуги. Фишки представляют сами отказы. Сдерживающие дуги являются входными дугами переходов, соответствующих процессу функционирования компонентов и каналов связи. Для получения детерминированных оценок возникновения отказов моделируется различными вариантами размещения фишек отказов. Для получения вероятностных оценок проводятся статистические испытания. Каждое испытание состоит в моделировании функционирования БИУС и отказов в течение времени, для которого оценивается живучесть БИУС. Результатом испытания является факт получения контролируемых данных. Отказы моделируются как случайные события [6]. Для отсчета времени в соответствии одному шагу моделирования ставится время  $\Delta t$ . Текущее время определяется как  $t_{тек} = k \cdot \Delta t$ , где  $k$  – номер шага моделирования. Если интенсивность отказов постоянна, отсчитывать время не надо – оно задано интервалом, на котором определяется вероятностная оценка живучести БИУС. Испытание будет состоять только в определении, возникнут или нет отказы и их последствия. В процессе получения вероятностных оценок не надо моделировать функционирование БИУС при каждом испытании, т.к. последствия отказов детерминированы и могут быть определены заранее. Для этого требуется предварительное моделирование с учетом всех возможных комбинаций отказов для определения их последствий.

Проявление всех последствий отказов определяется по повторению маркировки после воздействия последнего на текущий момент отказа.

### 3. Унифицированная сеть Петри

Принципиальное отличие унифицированной сети от собственной состоит в том, что унифицированная сеть не отражает особенностей функционирования компонентов и каналов связи и последовательность формирования и передачи данных. Уни-

унифицированная сеть предоставляет только информацию о том, какие отказы имеются, получение каких данных осуществляется и получение каких данных прекращено в текущий момент моделирования. Для построения унифицированной сети требуются матрицы  $L^D$ ,  $L^C$ ,  $L^{CH}$  и информация о резервировании. Фишки представляют данные и отказы. Унифицированная сеть имеет три позиции, каждая из которых содержит фишки соответственно предоставляемой информации – позиция отказов  $P_{отк}$ , позиция данных  $P_{нал}$ , получение которых продолжается, позиция данных  $P_{отс}$ , получение которых прекращено. Переходы не имеют интерпретации с точки зрения функционирования системы. Общий вид унифицированной сети приведен на рис. 1.

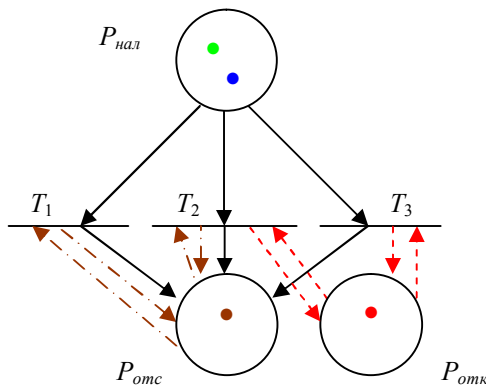


Рис. 1. Общий вид унифицированной сети Петри

Фишки-данные из позиции  $P_{нал}$  перемещаются только в позицию  $P_{отс}$ . Фишки позиций  $P_{отк}$  и  $P_{отс}$  всегда остаются в этих позициях. Комбинации фишек в позициях  $P_{отк}$  и  $P_{отс}$  определяют запуск переходов, переводящих фишки из позиции  $P_{нал}$  в позицию  $P_{отс}$ . Суть таких переводов в том, что при появлении отказов и прекращении получения некоторых данных или их комбинаций прекращается получение других данных. Каждый из переходов соответствует одной из таких комбинаций. Используются цветные фишки и дуги для представления данных и отказов и нейтральные дуги, по которым

могут двигаться фишки любых цветов. Кроме того, каждой фишке-данному ставится в соответствие множество  $F_{err}$  комбинаций отказов и отсутствующих данных, наличие хотя бы одной из которых приводит к прекращению получения этого данного (переводу фишки из позиции  $P_{нал}$  в позицию  $P_{отс}$ ). Вводятся следующие правила построения и выполнения унифицированной сети Петри:

- фишки не могут быть “нейтрального” цвета;
- по цветной дуге могут двигаться только фишки того же цвета, что и дуга;
- каждый переход имеет ненулевое количество входных цветных дуг, являющихся выходными дугами позиций  $P_{отк}$  и  $P_{отс}$ , и только одну входную нейтральную дугу, являющуюся выходной дугой позиции  $P_{нал}$ ;

– множество выходных дуг перехода полностью соответствует множеству его входных дуг;

– переход с запускается, если для каждой его входной цветной дуги есть фишка того же цвета, что и дуга, и для входной нейтральной дуги в позиции  $P_{нал}$  есть фишка, в множество  $F_{err}$  которой входит комбинация, определяемая входными цветными дугами этого перехода; по выходной нейтральной дуге движется фишка из позиции  $P_{нал}$ , запустившая переход.

Проблемы обеспечения равномерности обработки задач БИУС, поддержания наличия в сети независимых данных и возникновения множества одинаковых фишек-данных в унифицированной сети отсутствуют. Начальная маркировка соответствует наличию всех данных. Моделирование отказов и получение вероятностных оценок проводится так же, как и для собственной сети Петри.

#### 4. Пример проведения анализа живучести БИУС с использованием унифицированных сетей Петри

Анализ живучести проводится для двух вариантов ФС избыточной БИУС, описанных в [2]. Кон-

тролируемыми данными являются данные  $1^M, 2^M, 3^M, 4^M$ . Анализ проводится на множестве отказов  $E = \{e_1, e_2, \{e_1, e_2\}\}$ . Т.к. БИУС избыточна, в множества  $F_{err}$  входят только отказы и не входят данные. В табл. 1 приведены множества  $F_{err}$  контролируемых данных.

менно приводит к такому же состоянию, как и наличие только отказа  $e_1$ .

Таблица 1

Множества  $F_{err}$  контролируемых данных

Вариант ФС	Контролируемые данные			
	$1^M$	$2^M$	$3^M$	$4^M$
1	$\{e_1\}$	$\{e_1\}$	$\{e_1, e_2\}$	$\{e_1\}$
2	$\{\emptyset\}$	$\{e_1\}$	$\{e_1, e_2\}$	$\{\emptyset\}$

На рис. 2 показаны унифицированные сети Петри исходного состояния БИУС и состояний после каждого из отказов. Наличие двух отказов одновре-

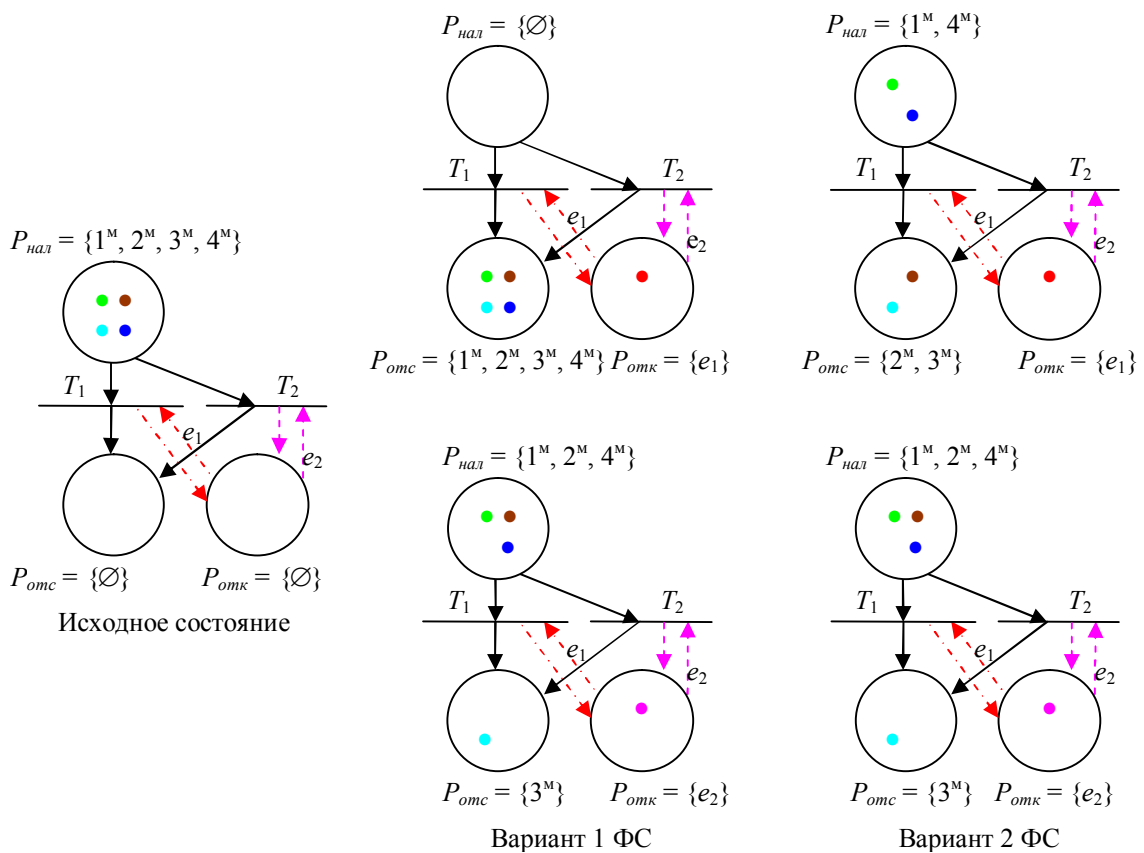


Рис. 2. Унифицированные сети Петри анализируемой БИУС

Для каждой позиции указано множество ее фишек. Дуги, изображенные непрерывными линиями, являются нейтральными. Остальные дуги являются цветными дугами отказов.

ками, полученными с использованием аналитических моделей, как описано в [2].

Любой отказ переводит БИУС в критическое положение независимо от варианта ФС. Детерминированные оценки, полученные с использованием имитационного моделирования, совпадают с оцен-

Вероятностная оценка живучести определяется для следующих условий:

- закон распределения – экспоненциальный;
- интенсивность каждого из отказов равна  $\lambda = 10^{-4}$  1/час;
- интервал времени  $t = 1$  год.

Аналитически вероятностная оценка определяется по формуле:

$$P = e^{-2\lambda t}.$$

Для определения вероятностной оценки с использованием статистических испытаний задается погрешность  $\delta = 0,01$ . В табл. 2 приведены оценки живучести БИУС.

Таблица 2

Оценки живучести БИУС

Модель	$Dt$	$P$	$DtP$
аналитическая	-1	0,1734	2,1641
имитационная	-1	0,1811	2,1612

Оценки, полученные с использованием аналитических и имитационных моделей, совпадают с учетом допустимой погрешности  $\delta$ , что подтверждает правильность моделей и значений оценок.

### Выводы

Представляется возможным и целесообразным использование сетей Петри как имитационных моделей функционирования БИУС, что расширяет область применения этого математического аппарата.

Недостатком использования сетей Петри является приближенность вероятностных оценок; достижение высокой точности требует значительных временных ресурсов. Собственные сети Петри имеют большой объем, их построение и выполнение трудоемки. Применение унифицированных сетей Петри упрощает имитационное моделирование.

Использование сетей Петри имеет преимущества по сравнению с аналитическими моделями, поскольку:

- не требуется формирование сложных логических или алгебраических выражений;
- представление функционирования системы более наглядно;
- одна и та же модель позволяет получить и детерминированные, и вероятностные оценки;

– для одной БИУС могут быть построены разные сети Петри; это позволяет проверить правильность самих моделей, оставаясь в рамках одного математического аппарата.

Основным результатом выполненных исследований является, по мнению авторов, разработка унифицированных сетей Петри.

### Литература

1. Харченко В.С., Бородавка Н.П. Формализованное представление номинальной функциональной структуры для анализа живучести бортовых информационно-управляющих систем // Моделирование та інформаційні технології: Збірник наукових праць. – К.: ІПМЕ НАН України ім. Г.Є. Пухова. – 2004. – Вип. 26. – С. 206-212.
2. Харченко В.С., Бородавка Н.П. Моделирование и анализ живучести бортовых информационно-управляющих систем по избыточной функциональной структуре // Радиоэлектроника и информатика. – 2005. – № 2. – С. 89-95.
3. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. – М.: Мир, 1984. – 264 с.
4. Дружинин В.А., Юдицкий С.А. Конструирование хорошо сформированных сетей Петри из типовых блоков // Автоматика и телемеханика. – 1992. – № 12. – С. 115-121.
5. Данько Н.И. “Цветные” сети Петри в задачах моделирования неоднородных технологических процессов // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2003. – № 6. – С. 78-81.
6. Гулятьев А. Визуальное моделирование в среде MATLAB: учебный курс. – С.-Пб.–М.–Х.–Минск: Питер, 2000. – 432 с.

Поступила в редакцию 14.03.2006

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