

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ НАКАПЛИВАЮЩИХСЯ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ БОРТОВЫХ СИСТЕМ

© 2004 В. Д. Еленев

Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассмотрен подход, позволяющий моделировать процессы функционирования космических аппаратов (КА) с учетом вероятности появления накапливающихся отказов элементов бортовых систем (БС). В качестве средства описания и исследования математических моделей предлагается использовать формальный аппарат теории макро-Е-сетей (являющихся модификацией сетей Петри), который обладает возможностью иерархического описания систем с учетом динамики изменения технического состояния КА, простотой представления событий, большой описательной мощностью. Показано, как с использованием сетевых моделей можно учитывать разнесенные по времени накапливающиеся отказы элементов.

1. Введение

Для КА процесс функционирования зависит от сложного взаимодействия временных распределений различных дискретных событий (временной циклограммы работы бортовых систем (БС), технического состояния отдельных элементов и т. д.). Поэтому КА можно рассматривать в виде динамической системы с дискретными событиями (ДСДС), в которой “состояние” БС изменяется во времени не непрерывно, а только в эти дискретные моменты времени.

Разработка моделей процессов функционирования КА является очень сложной и трудоемкой проблемой, при решении которой необходимо учитывать большое количество разнообразных факторов, в том числе и вероятность накапливающихся отказов элементов. Динамика наступления отказов элементов играет существенную роль в исследовании процессов функционирования технических систем.

При рассмотрении задач оценки эффективности функционирования будем использовать формальную модель, учитывающую смену состояний КА, разработка которой осуществляется с использованием подхода, предложенного Н. Н. Бусленко и базирующегося на понятии агрегативной системы [1].

Любой агрегат рассматриваемой системы характеризуется следующими множествами: множеством моментов времени T , множеством входных сигналов X , множеством

выходных сигналов Y , множеством состояний Z в каждый момент времени $t \in T$. Агрегат переходит из состояния $z(t_1)$ в состояние $z(t_2)$ за малый промежуток времени, т. е. имеет место скачок состояний Δz . Переход агрегата из состояния $z(t_1)$ в состояние $z(t_2)$ происходит под действием внутренних параметров $h(t) \in H$ и входных сигналов $x(t) \in X$ с учетом случайных операторов V (описывающего случайный характер входного сигнала X) и U (описывающего случайный характер состояний агрегата в моменты времени между поступлениями входных сигналов). Таким образом, будем описывать техническую систему следующей совокупностью множеств: $A = \{T, X, Y, Z, H, V, U\}$. (1)

Формальная модель (1) позволяет организовать моделирование процессов функционирования с учетом накапливающихся отказов элементов в виде итерационного процесса вычислений. Состояние системы $z(t_{i+1})$ в некоторый момент времени t_{i+1} после наступления $(i+1)$ -го отказа определяется ее текущим $z(t_i)$ состоянием и вероятностью появления $(i+1)$ -го отказа. Можно считать, что процесс смены состояний в данном случае является процессом накопления повреждений технической системой, который определяется потоком отказов ее поврежденных элементов.

2. Моделирование отказов элементов

В [2, 3] обсуждалась возможность использования аппарата теории сетей Петри

при моделировании процессов функционирования КА. В данном случае при моделировании рассматривается возможность использования макро-*E*-сетевых моделей [4].

Очевидно, что методическая сложность учета накапливающихся отказов элементов возникает только при сложной структуре взаимосвязи и взаимодействия элементов БС. Наиболее сложными случаями моделирования процессов функционирования является моделирование разветвляющихся процессов, схем с резервированием, учет циклограмм работы БС.

Для схемы с последовательным соединением элементов выход из строя одного из них приводит к нереализации выходных характеристик всей схемы. Поэтому в целях упрощения участки схемы с последовательным соединением элементов будем представлять в виде одного обобщенного элемента.

Временная последовательность отказов элементов легко учитывается в макро-*E*-сетевых моделях процессов функционирования, так как в них динамика смены состояний может быть непосредственно увязана со временем.

Формально макро-*E*-сеть определяется множеством $MEN = (P, T, K, S)$, где $P = (p, r, Q)$ - конечное непустое множество позиций; T - конечное непустое множество переходов; K - множество дуг, связывающих между собой множества позиций и переходов; $S = \{m, b, R, l\}$ - множество функциональных правил.

Элементы множества $P = \{p, r, Q\}$ называются: p - простыми позициями, r - решающими позициями, Q - макропозициями.

Множество переходов $T = \{T^T, T^E, T^A, T^F, T^J, T^{(c,g)}, T^X, T^Y\}$ описывает базовые структуры переходов, которые подразделяются на простые переходы $T^T, T^E, T^A, T^F, T^J, T^{(c,g)}$ (соответственно, переходы “исполнение”, “включение”, “выключение”, “разветвление”, “объединение”, “перераспределение”) и макропереходы T^X (“распределение”) и T^Y (“выбор”).

Дуги $k \in K$ связывают вершины P и T по следующему правилу: начало и конец любой дуги соединяет только разноименные вершины P и T , т. е. $P \cap T = \emptyset$.

Функциональные правила $S = (m, b, R, L)$ включают разметочную функцию $m: P \rightarrow (0, 1)$, функцию обозначения $b: T \rightarrow L$, решающую функцию R и используемый алфавит $L = U \cup V$, где U - входной и V - выходной алфавиты сигналов управления, соответственно.

Разметочная функция m устанавливает в каждой позиции p_e в соответствии с правилом срабатывания переходов определенное число меток $\Sigma = (0, 1)$.

Функция обозначения b показывает, какие входные сигналы U из внешней среды влияют на срабатывание переходов T и какие воздействия формируются в сети в результате их срабатывания.

Решающая функция R позволяет указать позиции, от которых зависит срабатывание перехода T в рассматриваемый момент времени, и указать позиции, в которые должна перейти метка после его срабатывания.

В макро-*E*-сетях решающие позиции r_s позволяют реализовать управление появлением меток в одной или нескольких простых позициях p_e с помощью внутренних связей.

Анализ технического состояния БС.

В общем случае задача анализа технического состояния БС в некоторый фиксированный момент времени t^* решается с учетом циклограмм работы БС и заданных вероятностей отказов элементов БС.

В модели отказов необходимо обеспечить установление факта пребывания j -ой БС в момент времени t^* во включенном состоянии. Для этого с использованием циклограммы работы БС проводится проверка выполнения условия попадания текущего времени t^* на i -е включение j -ой БС: $t^{*ji} \leq t^* \leq t^{*ji}$, где t^{*ji} , t^{*ji} - соответственно, времена i -го включения и отключения j -й БС. Для проведения такой проверки может быть использована отдельная сетевая модель.

Пример сетевой модели проверки технического состояния бортовой системы с учетом возможности восстановления работоспособности элементов приведен на рис. 1.

Поступление команды на проверку технического состояния ассоциируется с наличием метки в позиции p_1 . Переходы $T_1^Y, T_2^X, T_3^X, T_4^Y, T_5^X$ образуют цикл для про-

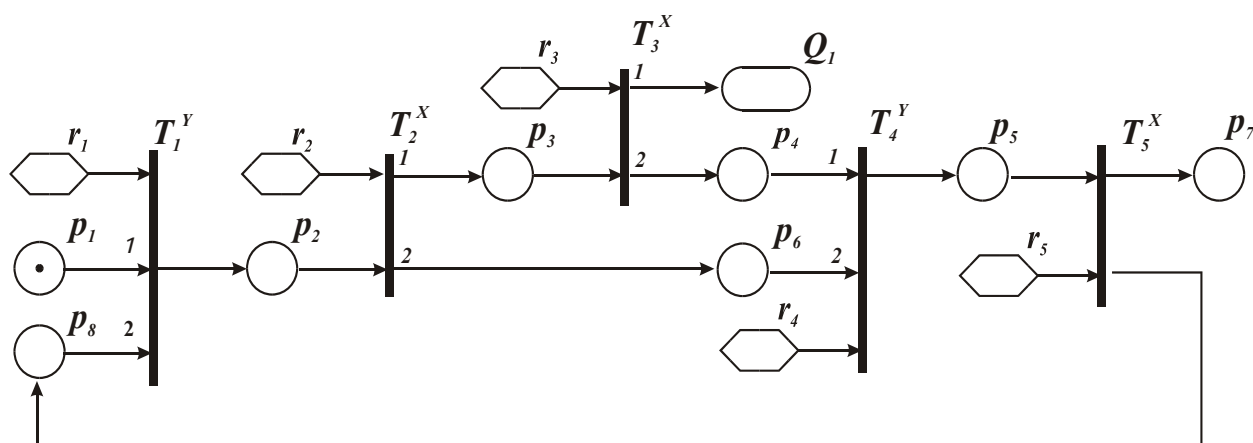


Рис. 1. Модель проверки технического состояния БС с учетом возможности восстановления работоспособности элементов

верки поочередно технического состояния всех элементов БС.

Переход T_1^Y активизируется при первом срабатывании при условии наличия метки в позиции p_1 и при последующих срабатываниях – в позиции p_8 . Эту функцию выбора обеспечивает решающая позиция r_1 .

После срабатывания перехода T_2^X метка перемещается в позицию p_6 , если элемент не поврежден, и в позицию p_3 , если имеет место его повреждение.

На переходе T_2^X разыгрывается состояние текущего элемента по заданной или вычисляемой (как функции времени) вероятности безотказной работы.

На переходе T_3^X с помощью решающей процедуры позиции r_3 проводится анализ возможности восстановления свойств поврежденного элемента и определения для этого случая времени его восстановления. Если работоспособность элемента может быть восстановлена, то метка передается в позицию p_4 , в противном случае - в макропозицию Q_1 .

Переход T_4^Y срабатывает при наличии метки в позиции p_6 или p_4 .

На переходе T_5^X проводится проверка окончания перебора всех элементов. Если все элементы проверены, то решающая позиция r_5 передает метку в позицию p_5 , в противном случае передает метку в позицию p_2 , т. е. цикл повторяется, и проверке подвергается следующий элемент.

Попадание метки в позицию p_7 завершает цикл проверки технического состояния всех элементов и характеризует работоспособное техническое состояние БС.

Атрибуту метки позиции p_7 присваивается значение, равное максимальному времени восстановления работоспособности элементов системы (если такие отказы были у нескольких элементов).

Моделирование схем с резервированием элементов. Для КА характерно резервирование (дублирование) наиболее ответственных систем и элементов, позволяющее повысить общую надежность системы. Будем различать структурное резервирование, когда параллельно с основными системами на борт устанавливаются резервные системы, включаемые в работу в случае выхода из строя основной системы, и функциональное резервирование, когда в случае отказа какой-либо системы ее функции частично или полностью выполняются другими системами.

Рассмотрим учет резервирования в макро-Е-сетевых моделях. Вариант макро-Е-сетевой схемы модели структурного резервирования с отличающимися контурами основной и резервных систем приведен на рис. 2.

В этой схеме рассматривается случай основной системы (процесс функционирования ассоциируется с переходом T_4^T) и резервной системы (процесс функционирования которой ассоциируется с переходом T_5^T).

Управляющая процедура позиции r_1 определяет, по которому контуру будет проводиться моделирование рассматриваемого

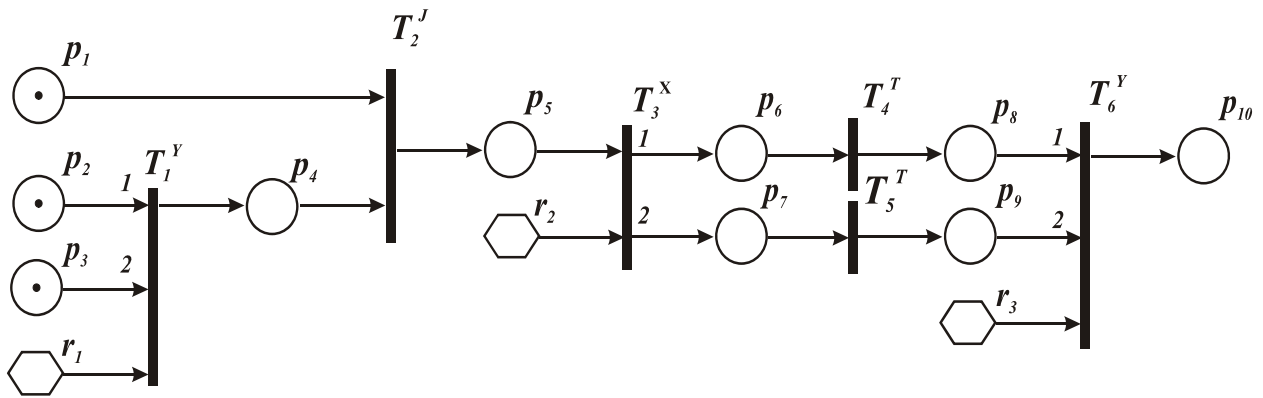


Рис. 2. Макро-Е-сетевая схема модели структурного резервирования с отличающимися контурами основной и резервных систем

процесса. В случае работоспособности всех систем (наличие меток в позициях p_2, p_3) приоритет отдается основной системе.

Переход T_3^X обеспечивает разветвление вариантов моделирования в зависимости от атрибута метки позиции p_5 .

Переход T_6^Y срабатывает при условии появлении метки в позиции, соответствующей выбранному контуру моделирования. После срабатывания перехода в позицию p_{10} передается метка, одним из атрибутов которой является номер системы, обеспечивающей процесс функционирования.

Макро-Е-сетевая схема модели, описывающей функциональное резервирование, будет выглядеть аналогично модели структурного резервирования с отличающимися контурами основной и резервных систем.

Моделирование временной последовательности отказов элементов. Как отмечается во многих работах по теории надежности и оценке эффективности функционирования технических систем, учет временной последовательности отказов элементов — одна из наиболее актуальных и трудно реализуемых задач. Динамика наступления отказов элементов играет существенную роль в исследовании процессов функционирования технических систем.

Рассмотрим наиболее простой случай структурного резервирования систем (рис. 3). Имеется система, в которой элемент A_1 имеет резервный элемент A_2 . В случае отказа элемента A_1 с помощью переключателя U в рассматриваемой системе в работу включа-

ется элемент A_2 . Здесь важным является условие, в какой последовательности могут произойти отказы элементов A_1 и U . Если первым откажет элемент A_1 , то система переключится на работу с резервным элементом A_2 . Последующий отказ элемента U не окажет влияния на работоспособность всей системы. Если же первым откажет элемент U , то система не сможет переключиться на работу с резервным элементом A_2 и окажется в неработоспособном состоянии.

Для рассматриваемого примера можно воспользоваться макро-Е-сетевой схемой, приведенной на рис. 4. В этой схеме наличие метки в позиции p_1 ассоциируется с началом моделирования работы системы. На переходе T_1^X происходит розыгрыш технического состояния элемента A_1 . Метка передается в позицию p_2 , если элемент A_1 находится в работоспособном состоянии и в позицию p_3 — в противном случае. Переход T_2^T ассоциируется с работой элемента A_1 системы. Если элемент A_1 находится в неработоспособном состоянии (наличие метки в позиции p_3), то происходит анализ работоспособного состояния элемента U (переход T_3^X). Если элемент U в работоспособном состоянии, то схема переключается на работу с элементом A_2 (мет-

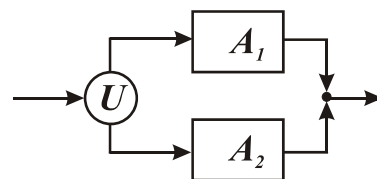


Рис. 3. Случай структурного резервирования систем

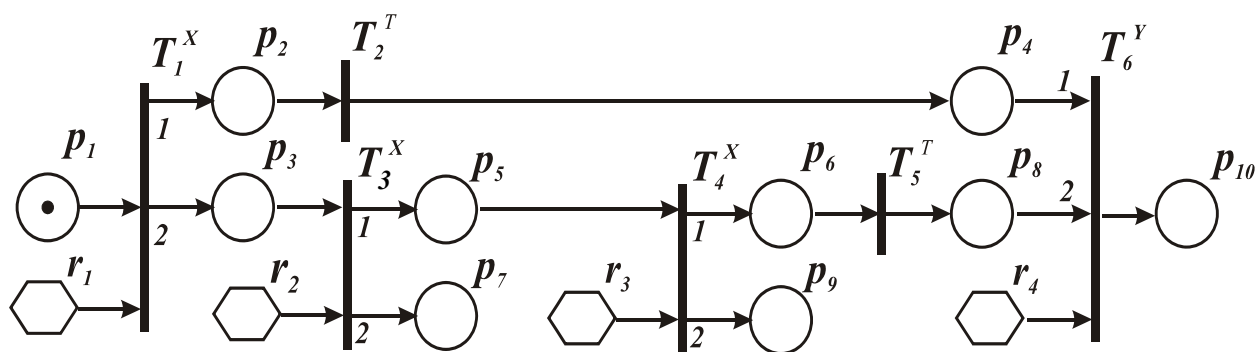


Рис. 4. Модель временной последовательности отказов элементов

ка в позиции p_5), в противном случае метка поступает в позицию p_7 , и дальнейшая работа процесса блокируется. На переходе происходит анализ технического состояния элемента A_2 . Если этот элемент в работоспособном состоянии, то метка передается в позицию p_6 , если нет – в позицию p_9 . Переход T_5^T ассоциируется с работой элемента A_2 системы. Попадание метки в позицию p_{10} означает завершение процесса моделирования работы схемы.

Моделирование процесса накопления информации о состоянии системы. При использовании макро-Е-сетевых моделей накопление информации о состоянии системы может быть организовано с применением некоторого универсального типового сегмента сетевой модели, принцип работы которого заключается в следующем (рис. 5.)

Текущее состояние $z(t_i)$ БС описывается с помощью атрибута метки p_4 . Позиция p_1 является входной для сегмента. Поступление в нее метки ассоциируется с новой информацией о вероятности отказа элемента. Переходы T_1^I и T_2^F образуют цикловой механизм изменения технического состояния БС.

При поступлении метки в позицию p_1 срабатывает переход T_1^I . Во время фазы активности этого перехода происходит изменение исходного технического состояния БС с учетом информации о вероятности отказа элемента, которая поступила с приходом метки в позицию p_1 , а также информации о текущем техническом состоянии БС, которое описывается атрибутом метки в позиции p_4 .

После срабатывания перехода T_1^I в позицию p_2 поступает метка, атрибуты которой будут содержать информацию об изменении

технического состояния БС, связанного с наступившим отказом одного из элементов БС.

При срабатывании перехода T_2^F происходит восстановление активности позиции p_4 посредством помещения в нее метки, которая несет в себе информацию о новом текущем состоянии БС и одновременно снимает блокировку с перехода T_1^I .

Переход T_1^I опять готов к срабатыванию при условии поступления в позицию p_1 новой метки, которая будет ассоциироваться с появлением нового отказа одного из элементов БС.

Рассмотренная последовательность срабатывания переходов T_1^I и T_2^F по изменению технического состояния БС продолжается до момента окончания поступления меток в позицию p_1 .

3. Заключение

С помощью предложенного подхода был решен ряд практических задач моделирования процессов функционирования космических аппаратов зондирования Земли с учетом накапливающихся отказов элементов бортовых систем. При этом временные характеристики отказов элементов генерировались с помощью заданных законов распределения.

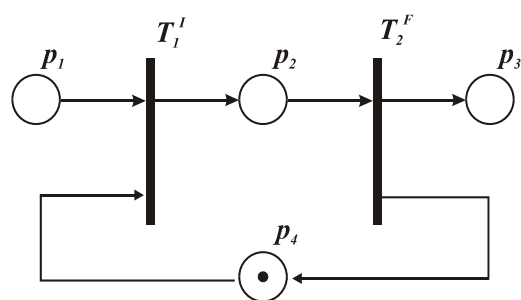


Рис. 5. Сегмент сетевой модели, обеспечивающий накопление информации

Рассмотренные варианты реализации сетевых моделей показывают, что использование аппарата теории сетей Петри позволяет значительно расширить возможности моделирования процессов функционирования при решении задач оценки эффективности КА с учетом накапливающихся отказов элементов БС.

Список литературы

1. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. - М.: Наука, 1978. - 399 с.
2. Yelenev V., Shostak N. Petry Nets Using Simulation of SpaceCraft Functioning//The 1st Sino-Soviet Symposium on Astronautical

Science and Technology, Harbin, China, 1991. pp. 63.

3. Yelenev V., Shostak N. The Method For Spacecraft Work-ability Simulation//The Second Russian-Sino Symposium on Astronautical Science and Technology. Samara, Russia, 1992. pp. 101.

4. Сети Петри, параллельные алгоритмы и модели мультипроцессорных систем./ Васильев В. В., Кузьмук В. В./ Под ред. Хорошевского В. Г., АН УССР, Ин-т проблем моделирования в энергетике. - Киев: Наук. думка, 1990. – 216 с.

SIMULATION OF SPACECRAFT FUNCTIONING PROCESSES WITH REGARD TO ACCUMULATED FAILURES OF OBOARD SYSTEM ELEMENTS

© 2004 V. D. Elenyev

Samara State Aerospace University

We consider an approach that allows simulating processes of spacecraft (SC) functioning with regard to the possibility of accumulated failures of onboard system (SC) elements. For describing and analyzing mathematical models we suggest using the formal apparatus of macro-E-nets (updated Petri nets) theory. It is characterized by the possibility of hierarchical description of systems with regard to the dynamics of changing technical state of the spacecraft, the simplicity of presenting events and great descriptive power. The possibility of taking into account accumulated element failures separated in time is shown.