

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА Е-СЕТЕЙ К МОДЕЛЯМ СОД

Постановка задачи

При исследовании процесса функционирования СОД средствами имитационного моделирования оценка правильности составления модели производится после проведения эксперимента путем анализа полученных данных и проверки их адекватности различными способами. При таком подходе может возникнуть ситуация, когда после проведения длительного и дорогостоящего эксперимента окажется, что полученные результаты не отвечают действительности, а причиной является неверное составление модели. Таким образом, необходимо разработать методы анализа и проверки моделей, которые позволили бы исключить подобные ситуации.

Использование Е-сети в качестве аппарата формального описания модели дает возможность проверки правильности составления и коррекции модели еще на этапе построения. Для этого необходимо проверить модель на наличие следующих алгоритмических свойств: безопасность, ограниченность, живость, достижимость, консервативность и т.п.

Анализ сетевой модели на наличие данных свойств позволит выявить «слабые» места в моделируемой системе до начала процесса имитационного моделирования, что позволит сэкономить время и средства, а также предъявить требования по заданным параметрам надежности и качества обслуживания.

В работах [1 – 3] описаны методы анализа моделей, построенных на базе аппарата сетей Петри, направленные на выявление основных алгоритмических свойств. Однако Е-сети, формально являясь расширением аппарата сетей Петри, имеют значительные отличия в описании и логике работы (временные задержки, расширение множества переходов, приоритетность переходов и т.п.). Следовательно, необходимо рассмотреть возможность использования данных подходов применительно к Е-сетям.

Сеть является безопасной, если в ней ни при каких условиях не может появиться более одной метки в любом месте. Согласно определению Е-сети, данному в [4], они относятся к классу безопасных сетей. При моделировании процесса функционирования СОД с целью повышения адекватности моделей в [5] были введены дополнения в описание аппарата Е-сетей. Специфика введенных элементов говорит об однозначной небезопасности такого расширения Е-сетей. Следовательно, анализ на наличие данного свойства проводить не следует.

Свойство ограниченности характеризует емкость условий, которые моделируются местами сети. При анализе на данное свойство моделей СОД могут быть предъявлены требования к производительности устройств, емкости накопителей входных и выходных буферов и т.п. Предложенное в [5] расширение аппарата Е-сетей относится к классу ограниченных сетей, поэтому, если в сетевой модели не выполняется данное свойство, такую модель нельзя считать правильно построенной.

В [1] описаны случаи, когда место сети может не обладать свойством ограниченности. Методика анализа сети на свойство ограниченности предполагает вначале определение мест, которые потенциально могут не обладать данным свойством. В предложенном расширении Е-сетей такими местами могут являться два типа макромест – очереди и периферийные места. Далее надо найти пути преобразования сети с целью устранения таких мест. При простом исключении источника меток (моделируемого периферийным макроместом-генератором) ни один переход не сможет сработать, сеть будет мертва, ее начальная разметка тупиковая и анализировать ее бессмысленно. Такая же ситуация произойдет, если просто убрать периферийные макроместа-поглотители. Следовательно, для анализа на ограниченность необходимо найти способ преобразовать исходную сеть к пригодному для анализа виду. В случае с периферийными местами это можно сделать следующим образом:

- выделить и заменить периферийные места-поглотители на места $p \in P$:

- выделить и заменить периферийные места-генераторы на места $p \in P$;
- ввести переход $t \in T$ и установить для него время срабатывания, равное 0;
- определить для этого перехода функции прямой и обратной инцидентности, связывающие его с вновь образованными местами;
- установить начальную разметку сети, соответствующую поступлению метки из внешней среды.

В случае с местами-очередями необходимо определить возможность установления максимальной емкости очереди на основании анализа моделируемого алгоритма. Если это невозможно, будем считать данное место и, следовательно, всю сеть не обладающими свойством ограниченности. В противном случае будем называть такое макроместо R -ограниченным, где R – емкость очереди.

В сети, образовавшейся после предложенных преобразований, есть значительные отступления от исходной модели, но они позволяют устранить указанные трудности по анализу E -сети на свойство ограниченности. Такой прием позволяет абстрагироваться от случайного характера поступления меток из внешней среды и сосредоточиться на исследовании топологии E -сети моделирующей работу СОД.

Также необходимо выяснить влияние временных задержек на пригодность E -сетей для решения проблем ограниченности. Разрешимость данной проблемы доказана в [1] для обычных сетей Петри с фиксированной начальной разметкой. Основой такого доказательства является построение покрывающего дерева сети.

После построения покрывающего дерева происходит сопоставление разметок его вершин. Введение временных задержек и приоритетов переходов приводит к некоторому упорядочению их срабатывания, а значит к уменьшению общего количества вариантов последовательности разметок. Можно предположить, что такое ограничение вариантов последовательности срабатывания не может породить новые маршруты в E -сети и следовательно новые ветви покрывающего дерева сети. То есть одна и та же E -сеть не может порождать различные графы достижимых разметок, поэтому очевидно следующее утверждение.

Любая достижимая последовательность срабатываний переходов E -сети порождает единственную разметку. Следовательно, покрывающее дерево E -сети конечно.

Кроме конечности покрывающего дерева необходимо рассмотреть, будет ли его топология отличаться от покрывающего дерева сети Петри. Для этого предположим обратное, то есть, что существует 2 сети $E = \{P, H, L, D, A, M_0\}$ и $E_v = \{P, H, L, D, A, M_0, v\}$ (P – множество мест сети, H – множество переходов, L – прямая функция инцидентности, D – обратная функция инцидентности, A – вектор атрибутов переходов, M_0 – начальная разметка сети, v – временные задержки переходов) с одинаковой топологией $\{P, H, L, D, A, M_0\}$ и отличающиеся тем, что переходам сети E_v присвоены временные задержки τ , причем покрывающие деревья $TR(E_v)$ и $TR(E)$ содержат несовпадающие вершины: $TR(E_v) \not\subset TR(E)$. Это значит, что $TR(E_v)$ содержит хотя бы одну вершину M_m , для которой выполняется одно из двух условий:

- 1) В $TR(E)$ не существует вершины с разметкой M_m :

$$\forall_{i=1}^n M_i : M_m \neq M_i, \quad (1)$$

где n – число вершин в $TR(E)$.

- 2) Если для некоторых вершин M_k первое условие все же не выполняется ($M_m = M_k$), тогда последовательность вершин на пути из корня $TR(E_v)$ в M_m не совпадает ни с одной последовательностью вершин из корня $TR(E)$ в M_k :

$$\{M_0 \dots M_k\} \neq \{M_0 \dots M_m\}.$$

Выполнение условия 1 возможно лишь, если введение временных задержек приведет к возникновению новых последовательностей срабатывания переходов. В обычных СП логика срабатывания переходов такова, что в произвольном состоянии возможно срабатывание любых из возбужденных переходов или несрабатывание всех. Введение временной задержки

ставит дополнительные условия для срабатывания переходов, возбужденных по правилам обычных СП. что может лишь исключить срабатывание некоторых из них в рассматриваемый момент времени, но не может вызвать срабатывание невозбужденных переходов.

В соответствии с приведенными рассуждениями выполнение условия 1 возможно лишь при наличии таких переходов в E_1 , которых нет в E , что противоречит введенному предположению. Выполнение условия 2 требует того, чтобы при некоторой разметке введение временных соотношений приводило к возбуждению и срабатыванию новых по сравнению с обычной СП переходов, что также невозможно.

Таким образом, верно противоположное утверждение, т.е. покрывающее дерево E -сети вкладывается в покрывающее дерево сети Петри.

Следовательно, для того чтобы E -сеть была ограничена, достаточно, чтобы асинхронная СП, полученная из нее исключением временных задержек, была ограничена.

Итак, сформулировано достаточное условие ограниченности модифицированной E -сети. Поскольку при построении моделей СОД с использованием E -сетей определение состава вершин и установление отношений инцидентности (топология) не зависит от временных параметров моделируемой системы, естественно предположить, что неограниченная асинхронная СП, полученная путем преобразования исходной E -сети в соответствии с описанными выше предложениями, всегда будет соответствовать некорректной модели процесса функционирования СОД. Хотя это предположение строго не доказуемо, можно считать, что сформулированное условие обеспечивает выявление значительной части ошибок, так как противная ситуация, очевидно, может встретиться редко.

Таким образом, можно сделать вывод, что для разрешения проблемы ограниченности в предлагаемом расширении E -сетей достаточно рассматривать более широкую проблему для обычной сети Петри, к которой приводится топология исходной сети.

Свойство консервативности предполагает равенство величин начальной и всех допустимых разметок сети, из чего следует постоянство числа меток, циркулирующих в сети. Сеть считается консервативной, если существует вектор $k = \{k_1 \dots k_n\}$ такой, что для всех маркировок M_i , достижимых из начальной, справедливо равенство.

$$\sum_{i=1}^n k_i M(p_i) = \sum_{i=1}^n k_i M_0(p_i), \quad (2)$$

где M_0 – начальная разметка места p_i ; M – любая разметка места p_i , достижимая из начальной; K_i – количество меток в i -м месте.

Анализ на консервативность важен в том случае, когда метки интерпретируются как некоторый неизменяемый ресурс. При моделировании СОД наличие в сетевой модели периферийных мест, переходов, выполняющих функции объединения или разветвления потоков меток (переходы типа F, J), говорит об однозначной неконсервативности построенных E -сетей. Однако при моделировании отдельных режимов работы (тестовый режим) такое свойство имеет смысл анализировать.

Свойство непротиворечивости (детерминированности) определяется как равенство числа переходов возбуждаемых разметкой M_i числу переходов, которые срабатывают при этой разметке. Отсутствие у сетевой модели данного свойства говорит о стохастичности процессов, протекающих в системе. Модель функционирования СОД на базе E -сетей допускает вероятностное описание некоторых процессов (поступление пакетов или запросов отображаемых метками, вероятностная логика работы некоторых типов переходов (MX, MY), например моделирующих появление ошибок в канале). Несмотря на это, в целом реакция системы на такие события должна быть однозначной, что соответствует свойству непротиворечивости. При построении сетевых моделей это достигается путем установления такого правила, что любое место может быть входным только для одного перехода. Таким образом, невыполнение свойства непротиворечивости говорит об ошибках в процессе построения модели. Следовательно, исследовать модель, построенную с использованием аппарата E -сетей, на данное свойство необходимо на этапе проектирования и построения. Эти особенности необ-

ходимо учесть при создании автоматизированной системы построения моделей СОД, основанных на использовании E-сетей.

Свойство потенциальной живости предполагает достижимость возбуждающих разметок для всех переходов сети из начальной разметки, свойство живости – потенциальную живость всех переходов при любой достижимой разметке. Сеть называется живой только, если все переходы, входящие в нее, являются живыми. При составлении модели указанной, предметной области каждому переходу ставится в соответствие какая-либо функция, постоянно выполняемая на одном из этапов моделируемого процесса. Поэтому E-сети, представляющие модели систем такого класса, должны быть однозначно живыми. Возникновение тупиковых разметок (разметки, при которых не может сработать ни один из переходов) говорит о том, что существуют такие последовательности событий, при которых некоторая функция никогда не выполнится. Это вызывает вопрос либо о необходимости введения такой функции, либо о правильности функционирования системы в целом. Анализ на свойства живости и потенциальной живости позволит выявить такие моменты. В [4] доказано, что решение задачи по анализу на свойство живости сводится к решению проблемы достижимости. Решение данной проблемы состоит в нахождении алгоритма, с помощью которого для любой сети E и любой разметки M можно выяснить, принадлежит ли данная разметка языку сети: $M \in L(E)$. В настоящее время отсутствует решение данной проблемы в общем виде (состоящее в доказательстве живости данной сети). Однако в [1] показано, что данная проблема алгоритмически разрешима для класса ограниченных сетей, к которым принадлежат и E-сети. Так, ограниченная сеть является живой тогда и только тогда, когда в каждой сильно связанной компоненте графа достижимости для каждого перехода имеется ребро, помеченное этим переходом. Это утверждение непосредственно следует из определения живости перехода и графа достижимости.

Свойство терминальности предполагает, что для всех допустимых начальных разметок разомкнутой сети, метки, поступающие из внешней среды, в процессе функционирования покидают сеть или собираются в некоторых заранее определенных макроместах. Свойством терминальности обладают E-сети, моделирующие завершенные процессы. Такими процессами могут быть установление соединения, разрыв соединения, обработка одного или заданного количества пакетов и т.п. Данное свойство также можно интерпретировать, как способность разомкнутой сети восстанавливать свою начальную разметку. Нарушение терминальности может свидетельствовать о невозможности моделируемой системы переходить к фазе начала работы или возможности возникновения ситуации, когда поступивший пакет или запрос не будет обслужен. Проверка сетевой модели на свойство терминальности позволит обнаружить такие ситуации, тем самым выявив ошибки в построении алгоритмов работы моделируемой системы.

Свойство устойчивости предполагает, что для всех допустимых начальных разметок сеть после некоторого функционирования неизбежно принимает начальную разметку. Такое свойство говорит о цикличности процессов, протекающих в моделируемой системе, и этим свойством могут обладать только сети, не имеющие периферийных мест (замкнутые E-сети). Следовательно, при составлении моделей отдельных компонентов СОД, не взаимодействующих с внешней средой, данное свойство имеет смысл анализировать; при создании полной модели процесса функционирования СОД анализ модели на данное свойство не представляется возможным.

На основании приведенных рассуждений остановимся на целесообразности анализа рассматриваемого расширения E-сетей на следующие свойства: безопасность, ограниченность, непротиворечивость (детерминированность), живость, терминальность. Сети, обладающие такими свойствами, назовем корректными.

В результате проведенного анализа можно сделать вывод о том, что описанные выше методы позволяют проанализировать модель СОД, построенную с использованием аппарата E-сетей, на основные алгоритмические свойства. Определено, что наличие свойств ограниченности, непротиворечивости, живости (достижимости), терминальности есть необходимое условие правильности построения сетевой модели и выбора ее динамических характеристик.

Необходимо отметить, что для более эффективного использования предложенных методов желательна разработка программного комплекса, позволяющего автоматизировать процессы построения, проверки и анализа моделей, построенных с использованием аппарата E-сетей.

Список литературы: 1. *Котов В. Е.* Сети Петри. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1984. 160с. 2. *Журавель В. О.* Про графи досяжних розміток деяких розширень мереж Петрі // Зб. наук. праць/ Київ. ін-т заліз. трансп. К.: КІЗТ. 1999. №2. С. 173-176. 3. *Журавель В. О.* Про оцінку розв'язуваності алгоритмічних проблем для деяких розширень мереж Петрі // Мережі і системи телекомунікацій на заліз. трансп. / Міжвуз. зб. наук пр. 1999 Вип. 35. Харків: ХарДАЗТ 1999. С. 45-49. 4. *Применение микропроцессорных средств в системах передачи информации: Учеб. пособ. для вузов по сп-ти АСУ* Я. Советов, О. И. Кутузов и др. М.: Высш. шк. 1987 256с.: ил. 5. *Лосев Ю. И., Шматков С. И., Дуравкин Е. В.* Применение E-сетей для моделирования процесса функционирования СОД // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2001. Вып. 123. С. 99-103.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редакцию 04.11.2008