

СИНТЕЗ ТРАССОВОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ В СОСТАВЕ АСУ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТА СЕТЕЙ ПЕТРИ

Л.Ч. Угоренко
(представил д.т.н., проф. Е.И. Бобыр)

Предлагается новый метод синтеза моделей на основе сетей Петри, использующий трассировочные данные, позволяющий обеспечить необходимую детализацию и точность модели, сочетая при этом достоинства известных способов моделирования вычислительных процессов.

Постановка проблемы. Для исследования эффективности функционирования вычислительных средств автоматизированных систем управления (АСУ), как сложных и дорогостоящих технических объектов, моделирование является наиболее целесообразным и практически единственным методом их анализа [1]. В процессе моделирования любой вычислительной системы наиболее сложными являются этапы концептуального и математического описания. При этом необходимо решить проблему выбора адекватного метода формализации или конструктивного математического аппарата, позволяющего учитывать особенности организации и функционирования исследуемых объектов.

Общим подходом к анализу вычислительной системы является оценка поведения ее модели под влиянием событий, генерируемых моделью внешних воздействий. Множество входных заданий (программ, данных, команд), т.е. заявок на обслуживание, обрабатываемых по определенным правилам, называется рабочей нагрузкой [2]. Для всех методов анализа вычислительных систем достаточно сложной проблемой является описание модели рабочей нагрузки, совместимой и соответствующей по степени детализации модели системы.

Анализ литературы. Достаточно часто на практике при описании функционирования вычислительных средств применяются хорошо изученные модели с очередями, основывающиеся на теории массового обслуживания. Основными компонентами в таких моделях являются источники, генерирующие заявки на обработку, очереди заявок и обслуживающие устройства. Источники образуют модель рабочей нагрузки, оче-

реди и обслуживающие устройства составляют модель системы. Аналитические выражения для основных показателей эффективности функционирования устройств – коэффициент загрузки, пропускная способность, время реакции и т.д., – могут быть получены с использованием разнообразных расширений аппарата марковских цепей.

Применение систем массового обслуживания предполагает ряд допущений, связанных с видом законов распределения времени между поступлениями заявок на обслуживание и времени их обработки. Как правило, используют гипотезы об экспоненциальном распределении этих времен, что является неприемлемым для описания функционирования вычислительных средств АСУ реального времени, обрабатывающих нестационарные, неоднородные потоки заявок по заранее определенным алгоритмам. Кроме того, даже при таких допущениях получаемые формулы для реальных систем настолько сложны, что требуют специальных методов аппроксимации [3 – 5]. Существуют и другие способы описания моделей рабочей нагрузки, определяющих поток заявок на обслуживание и их обработку, а именно [2, 6]: смеси команд (программных модулей); эталоны и тесты; стохастические модели; трассы.

Смеси применяются, как правило, при имитационном моделировании процесса исполнения программ, и представляют собой последовательности команд (или набор программных модулей), типичных для программы, реализуемой на исследуемых вычислительных средствах. Состав смеси определяется через функцию распределения частоты выполнения команд или модулей в определенном приложении. Эту функцию получают методами математической статистики, например, с помощью регрессионного анализа [7]. Данный метод моделирования используется, когда измерение реальной рабочей нагрузки невозможно. Помимо низкой точности, такой подход имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что он не учитывает внутренние связи между командами (или модулями) внутри приложения. Это не позволяет использовать такие модели для точного и адекватного представления рабочей нагрузки вычислительных средств АСУ.

Эталонные и тесты заменяют реальную рабочую нагрузку образцовыми прикладными процессами, в качестве которых выступают существующие отдельные программы или стандартизированные пакеты тестов (benchmarks), базирующиеся на реальных прикладных программах широкого круга пользователей. Этот метод в основном используют для сравнения существующих систем в плане использования различных ресурсов.

Однако даже несколькими эталонами охватить полностью алгоритм функционирования вычислительных средств АСУ в полном объеме практически невозможно. Имитация же выполнения всех программ в лучшем случае не отличается от натурального эксперимента, сопряжена с большими затратами,

а иногда и попросту невозможна. Применение же любого стандартного теста не может заменить выполнения прикладных задач в реальных условиях. Поэтому такой подход к описанию рабочей нагрузки не дает необходимую точность при моделировании вычислительных систем АСУ.

Стохастические модели описывают рабочую нагрузку с помощью набора случайных величин, которые определяют запросы на ресурсы. Распределения этих случайных величин подбираются на основе статистического анализа результатов измерений потока запросов на соответствующие ресурсы реально действующей вычислительной системы [2]. Стохастические модели представляют собой наиболее компактное, однако недостаточно точное описание рабочей нагрузки. При их построении используется гипотеза о независимости различных потоков запросов на ресурсы, а значит, не учитываются связи по управлению между процессами, реализуемыми в АСУ. Кроме того, статистические данные всегда несут на себе отпечаток конкретной системы, на которой они получены, и могут быть искажены измерительными мониторами, поскольку они сами используют ресурсы системы.

В трассировочных моделях рабочая нагрузка представляется в виде множества упорядоченных записей, содержащих данные о событиях, определяющих переходы между состояниями вычислительной системы. Эти данные, собранные с помощью измерительных средств, после специальной обработки используют как модель рабочей нагрузки [2]. Важными достоинствами этого подхода, в отличие от рассмотренных выше, является то, что, во-первых, он сохраняет все взаимозависимости между процессами при функционировании системы, во-вторых, позволяет достаточно просто проверить модель на адекватность путем сравнения результатов моделирования и результатов измерений при одинаковой рабочей нагрузке.

Однако, как и в предыдущем подходе, измерения имеют системно-зависимый характер и могут оказывать влияние на работу самой системы. Достаточно трудоемким является создание программы обработки трассы и подготовки ее к использованию моделью системы, причем такая программа узконаправлена на систему сбора трасс и модель анализируемой системы. Трассировочная модель достаточно объемна и обладает малой гибкостью.

Цель статьи. Рассмотренные способы описания процессов, происходящих в вычислительных средствах АСУ реального времени, не в полной мере удовлетворяют требованиям точности и совместимости создаваемых моделей. Для устранения перечисленных недостатков ниже предлагается метод обработки данных о функционировании вычислительных средств, применимый как для создания модели рабочей нагрузки, так и модели системы. Он основан на представлении трасс событий, происходящих в вычислительной системе, стохастическо-детерминированными временными

сетями Петри (СДВСП). Данное расширение сетей Петри характеризуется использованием случайных величин для определения задержки между активацией и срабатыванием перехода, и введением понятия групповых переходов, описывающих полную группу несовместных событий. Каждому переходу в составе группы приписана вероятность соответствующего события. Реализация такого группового перехода позволяет организовать недетерминированный выбор направления развития процесса.

Предлагаемый метод синтеза СДВСП с использованием трассировочных данных состоит из четырех этапов.

1. На основе концептуальной модели функционирования вычислительной системы осуществляется выделение N типов анализируемых событий T , существенных с точки зрения целей моделирования:

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}.$$

Для построения модели рабочей нагрузки в качестве событий могут рассматриваться поступления разнородных заявок на обработку, для модели системы – этапы (процессы) обработки заявок конкретных типов по заданным программам.

2. С помощью системы измерения организуется сбор информации о последовательности, частоте и времени выполнения выделенных событий. При этом основными требованиями к измерительным средствам являются максимальная независимость от вычислительной системы и минимальное использование ее ресурсов.

3. Полученная трасса представляется направленным взвешенным событийным графом, вершинами T которого являются анализируемые события, а дуги из каждой вершины отражают последовательности переходов от одного события к другому. Вес каждой дуги графа определяется как статистическая вероятность соответствующего перехода.

4. На основе событийного графа строится СДВСП вида

$$NP = \{P, T, F, H, GV, GS, M_0\},$$

где $P = \{p_1, p_2, \dots, p_l\}$ – множество позиций условий выполнения событий, определяемое наличием входных дуг событийного графа; T – множество переходов, соответствующее множеству событий; $F : P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ – функция предшествования множества позиций P и переходов T , определяемая условиями выполнения событий, т.е. входными дугами событийного графа; $H : T \times P \rightarrow \{0, 1\}$ – функция следования множества позиций P и переходов T , определяемая выходными дугами событийного графа; $GV : T \times R_V = f(Z_V)$ – функция соответствия между множеством переходов T и множеством стохастических величин времени выполнения событий R_V , распределенных по случайному закону Z_V (вид распределения и его параметры определяются на основе данных трассы с использованием методов математической статисти-

ки); $GS : T \times P_S \rightarrow [0, 1]$ – функция соответствия между множеством групповых переходов T , образующих полную группу несовместных событий, и множеством вероятностей их срабатывания P_S , равных весам событийного графа; $M_0 : P \rightarrow \{0, 1, \dots\}$ – начальная маркировка; $P \cap T = \emptyset$ и $P \cup T \neq \emptyset$.

Вес каждой дуги равен 1, т.е. полученная сеть является ординарной.

Рассмотрим простейший пример формализованного построения СДВСП, предназначенной для моделирования функционирования вычислительных средств, реализующих комплексный алгоритм определенной АСУ.

Пусть для оценки производительности вычислительной системы выделено 5 групп частных алгоритмов, обрабатывающих однотипные заявки. Анализируется выполнение каждой группы алгоритмов, которое связывается с событиями $\{t_1, t_2, \dots, t_5\}$. С помощью измерительных мониторов, например, программного типа, производится оценка времени, частоты и последовательности выполнения частных алгоритмов, причем измеренная трасса событий имеет следующий вид: $t_2, t_3, t_1, t_2, t_3, t_4, t_2, t_1, t_5, t_2, t_3, t_4$. На основе анализа трассы строится событийный граф (рис. 1).

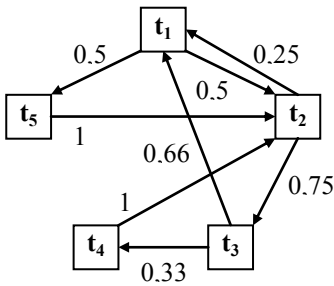


Рис. 1. Вид событийного графа для анализируемой трассы

Дуги графа с вероятностью, равной единице, исходящие из вершин t_4 и t_5 , означают, что соответствующие события реализуются обычными временными переходами, а остальные – групповыми переходами. Количество переходов в группе определяется количеством исходящих дуг, а вероятности их срабатывания – весом соответствующих дуг, причем сумма вероятностей событий группового перехода по построению графа равна единице.

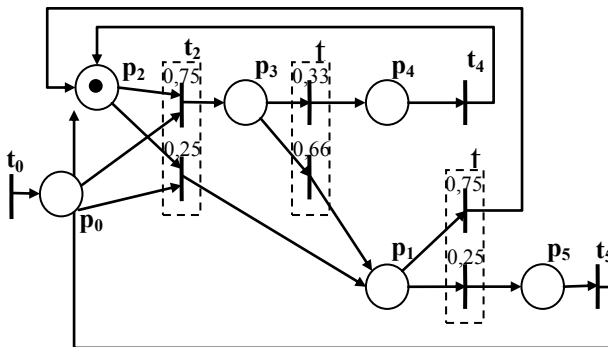


Рис. 2. Стохастическо-детерминированная временная сеть Петри, моделирующая функционирование вычислительных средств по комплексному алгоритму

да по построению графа равна единице.

В соответствии с правилами преобразования событийного графа в СДВСП, учитывая априорную информацию, что событие t_2 означает начало обработки поступающей на обслуживание заявки, строится сеть Петри с началь-

ной маркировкой в вершине P_2 (рис. 2). Дополнительно введенные позиция p_0 , соответствующая условию «заявка поступила», и переход t_0 , генерирующий заявки, в данном случае выполняют роль простейшей модели рабочей нагрузки и позволяют проанализировать поведение системы при различных характеристиках потока поступающих на обработку заявок. Без дополнительной позиции и перехода СДВСП представляет собой ординарную активную безопасную сеть Петри, позволяющую исследовать замкнутые системы, к которым могут быть приведены, например, системы с устоявшимся режимом загрузки. Следует отметить, что для точного определения параметров случайных величин, характеризующих длительность событий, необходимо обеспечить соответствующий объем трассировочных данных и определенные условия их сбора, рассмотренные в [2].

Выводы. Таким образом, предлагаемый метод позволяет автоматизировать процессы обработки измеренных данных и обеспечить единый подход к формальному описанию моделей рабочей нагрузки и системы. Он сочетает достоинства трассировочного подхода, стохастических моделей и возможности одного из самых мощных аппаратов моделирования – расширения сетей Петри, и может быть применен при моделировании разнообразных вычислительных систем, в том числе входящих в состав АСУ реального времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альянах И.Н. *Моделирование вычислительных систем*. – Л.: Машиностроение, 1988. – 223 с.
2. Феррари Д. *Оценка производительности вычислительных систем*. – М.: Мир, 1981. – 576 с.
3. Богуславский Л.Б., Ляхов А.И. *Оценка производительности распределенных информационно-вычислительных систем архитектуры «клиент-сервер»* // *Автоматика и телемеханика*. – 1995. – № 9. – С. 32 – 37.
4. Ляхов А.И. *Асимптотический анализ замкнутых сетей очередей, включающих устройства с переменной интенсивностью обслуживания* // *Автоматика и телемеханика*. – 1997. – № 3. – С. 17 – 20.
5. Ляхов А.И. *Асимптотический анализ моделей иерархических локальных сетей с многопроцессорными серверами* // *Автоматика и телемеханика*. – 1998. – № 12. – С. 43 – 48.
6. Смелянский Р.Л. *Анализ производительности распределенных микропроцессорных вычислительных систем на основе инварианта поведения программ: Дисс. на соискание ученой степени доктора физико-математических наук*. – М.: МГУ, 1990.
7. Липав В.В. *Качество программного обеспечения*. – М.: Финансы и статистика, – 1983. – 262 с.

Поступила 30.04.2003

УГОРЕНКО Леонид Чеславович, адъюнкт ХВУ. В 1990 году окончил Пушкинское ВВУРЭ.
Область научных интересов – процессы функционирования вычислительных систем и сетей.
