

СТРУКТУРНЫЕ ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ

Н.И.Дубовская, Д.И.Свириденко

1. В решении I Всесоюзного симпозиума по машинным методам обнаружения закономерностей (МОЗ-I) [1] была подчеркнута важность методологических исследований по проблеме МОЗ. Обращалось внимание на необходимость разработки новых способов формального описания объектов исследования и оперирования с этими описаниями.

2. Любой объект определяется своей структурой и процессом функционирования. Как правило, сложной структуре объекта соответствует сложная схема его функционирования.

Широкое применение в исследовании сложных систем и процессов, начиная от экономических задач до задач автоматки, находят конечные графы и сетевые модели [2,3 и др.], позволяющие построить логико-математическое описание процесса функционирования системы и алгоритмизировать расчет параметров этого процесса.

Вместе с тем масштабность и сложность реальных объектов, состоящих, как правило, из множества параллельно функционирующих и взаимодействующих между собой подсистем, характеризующихся динамически изменяемой в процессе функционирования структурой и содержащих большое количество различных случайных характеристик, обуславливают во многих случаях невозможность адекватного описания рассматриваемого процесса с помощью аналитических методов либо нецелесообразность их применения с вычислительной точки зрения. В связи с этим все большее распространение получает метод имитационного моделирования, позволяющий изучать адекватные модели реальных явлений и представляющий собой аппарат анализа систем многофакторных, динамических и стохастических [4-6].

Как известно, широко распространенным методом "борьбы со сложностью" является расчленение изучаемого объекта на конечное

число составляющих и моделирование последних с учетом их взаимодействия. В то же время необходимо отметить, что использование метода моделирования для исследования сложных или больших систем вызывает до сих пор значительные трудности как на этапе построения имитационных моделей, так и на этапе составления и реализации их программы на ЭВМ. Вследствие этого развитие средств имитации преследует цель сокращения сроков и затрат труда на построение машинной модели исследуемого объекта и проведение экспериментов с ней.

В настоящее время развивается направление по созданию автоматизированных имитационных моделей (АИМ) [5,7]. Основой этих моделей является агрегат - некоторая унифицированная абстрактная схема для описания объектов, отдельные элементы которых могут быть представлены в виде заранее определенных математических моделей, таких как системы массового обслуживания, автоматы, дифференциальные уравнения и некоторые другие. Использование АИМ является перспективным средством автоматизации решения задач моделирования таких систем, для которых формальное описание их элементов может быть преобразовано в принятую форму агрегата. Это требование существенно ограничивает число объектов, адекватно описываемых в терминах АИМ.

Другим направлением автоматизации создания и экспериментирования с имитационными моделями является применение специализированных алгоритмических языков моделирования, в каждом из которых отражен определенный набор понятий, служащих для описания поведения достаточно широкого класса реальных объектов, и используется хорошо известная пользователю терминология, отражающая специфику области исследования.

Специализированные языки моделирования приобретают в последнее время все большую популярность. Отличительной особенностью их применения является то, что отпадает необходимость расчленять этапы собственно построения формализованной схемы процесса функционирования системы и ее программирования. С использованием языка моделирования формализация функционирования системы производится в терминах, разработанных на базе основных понятий имитации рассматриваемого класса систем. Вследствие этого построение и программирование имитационной модели осуществляются совместно с помощью единых языковых средств, концептуальная направленность которых обуславливает адекватность описания динамики функциони-

рования системы, т.е. описания состояний системы как функции времени. При этом каждый из языков моделирования обладает развитым аппаратом имитации случайных факторов и воздействий, обработки результатов экспериментов, а также средствами работы со сложными структурами данных.

При построении имитационных моделей исследуемых объектов, реализуемых на цифровых вычислительных машинах, как правило, применяется дискретный подход, при котором непрерывные явления реальной физической системы представляются последовательностью дискретных изменений - событий. Хорошо известными языками дискретного моделирования являются GRAS [8], СИМУЛА [9], СИМСКРИПТ [10], SOL [11], CSL [12], СЛЭНГ [13], НЕДИС [14]. В языке НЕДИС имеются также средства моделирования непрерывных систем. Характеристики основных языков моделирования рассмотрены в работах [15-19].

Как в нашей стране, так и за рубежом большую популярность получил язык СИМУЛА [20]. Введенные в нем понятия позволяют осуществить описание разнообразных по своей природе систем, функционирование которых характеризуется общей особенностью - наличием параллельно протекающих и взаимодействующих между собой процессов.

В языке имеются различные средства для моделирования параллельного функционирования объектов и управления последовательностью действий. Однако по своему типу эти средства относятся к операторам императивного управления, соотносящим выполнение того или иного события с определенным моментом времени. Расширение указанных средств операторами императивного управления, позволяющими планирование событий осуществлять в зависимости от выполнения в системе определенных условий, представляет собой возможность дать специалисту по системному анализу более мощный аппарат для описания динамики системы.

Вместе с тем описание процессов, происходящих в сложных структурах, в котором используются только указанные средства, может оказаться весьма затруднительным, а для систем с большим числом разнообразных связей между процессами подчас практически невозможным. Необходимы дополнительные специальные средства, которые позволили бы относительно просто в явном виде задать структуру исследуемой системы, а также формализовать функционирование отдельных ее под-

систем, являющихся составляющими заданной структуры. При этом средства языка должны обеспечить возможность описания разнообразных типов взаимодействия между составляющими системы.

В [21] отмечается, что структурные соображения должны играть первостепенную роль как при анализе, так и при синтезе систем самого разного рода. Наиболее важный этап процесса разработки модели состоит в выборе структуры модели исследуемой системы. Для систем, состоящих из большого числа взаимосвязанных объектов, необходимо вначале наметить основные подсистемы и установить главные взаимосвязи между ними, а затем уже переходить к детальному моделированию механизмов функционирования.

Ниже предлагается один из подходов к построению имитационных моделей сложных систем, процесс функционирования которых формализуется на основе их представления в виде некоторой сетевой структуры с определенными над ней различными типами отношений между составляющими системы. С использованием предлагаемого подхода может быть формализовано функционирование таких сложных комплексов, как многоуровневые иерархические системы: народнохозяйственного планирования и управления, различные организационные структуры, системы принятия решений, системы, предназначенные для планирования и управления реализацией проектов, расчета использования ресурсов, различные технические системы, ряд систем искусственного интеллекта и многие другие.

Соответствующие языковые средства рассматриваются в [22].

3. Основными понятиями предлагаемого подхода являются понятия A -процесса и модельной дискретной сети.

A - процесс определяется как пара $A = \langle D; F \rangle$, где D - дескрипторная часть процесса, определяющая некоторую структуру данных; F - операционная часть процесса - алгоритмы, задающий динамику его развития.

Процесс может быть задан как с параметрами, так и без них.

Модельная дискретная сеть (МДС) является особым видом A -процесса (обозначим его через A_n), дескрипторная часть которого определяет структуру системы и задается как $D_n = \langle P; L \rangle$, где $P = \{A_1, \dots, A_n\}$ - множество A -процессов, являющихся вершинами сети; L - множество пар процессов, находящихся в отношении "следовать за", каждой из которых ставится в соответствие некоторая направленная дуга сети, $L = \{ (A_i, A_j) | A_i, A_j \in P \}$.

Операционная часть F_s представляет собой специальный стандартный модуль – систему управления МДС, с помощью которой моделируется процессе функционирования системы во времени. При этом вершины МДС имитируют процессы, протекающие в отдельных составляющих системы, а есть в целом имитирует структуру и функционирование всей системы.

Исполнение программ процессов может происходить одновременно в модельном времени и независимо друг от друга, либо процессы могут синхронизировать свои действия.

Модельное время есть представление реального времени в виде последовательности дискретных значений – моментов, в которые происходят события в модели. Каждое событие, являясь активной фазой одного из процессов, заключается в выполнении им некоторых действий и соответствует участкам программы процесса, ограниченным операторами синхронизации типа ЗАДЕРЖКА, ЖДАТЬ (операторы императивного управления), ЖДАТЬ ПОКА (оператор интеррогативного управления) или специальными операторами директивного управления процессами различных уровней. Исполнение события не изменяет модельного времени, т.е. все действия активной фазы рассматриваются как мгновенные.

Функционирование процесса, определяемое операционным алгоритмом F_s , состоит из последовательности его активных фаз. При завершении активной фазы определяется точка реактивации (точка возврата), указывающая место в программе процесса, с которого должно быть продолжено его функционирование (через некоторый интервал времени или при выполнении определенных условий).

Функционирование МДС в целом осуществляется с помощью системы управления F_s , определяющей переход сети из одного состояния в другое. Под состоянием МДС понимается совокупность процессов, активных (выполняющихся) в некоторый момент модельного времени. Функционирование модели выглядит внешне как смена состояний на сети.

Необходимо отметить, что имитация одновременно (параллельно) протекающих процессов осуществляется путем последовательного их исполнения. В каждый конкретный момент времени в состоянии выполнения находится только один процесс. Другие процессы, выполнению

которых ничего не мешает, находятся в состоянии готовности. Такая схема исполнения называется квазипараллельной.

Выбор системой управления МДС из готовых к исполнению процессов активизируемого процесса осуществляется в порядке поступивших о них уведомлений.

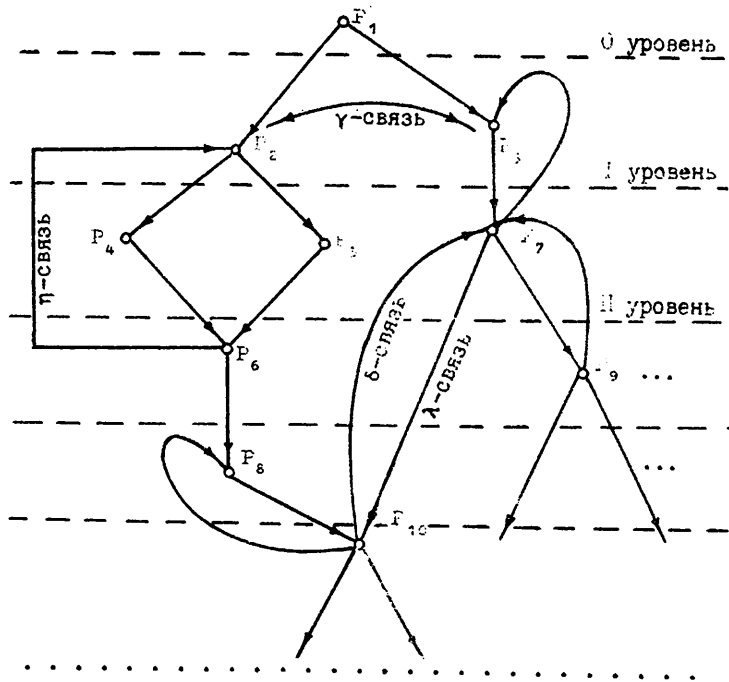


Рис. I

На рис. I. приведен пример модельной дискретной сети.

Процессы, соответствующие вершинам МДС, назовем сетевыми процессами. Каждый из них имеет определенный ранг или в дальнейшем будем говорить "принадлежит определенному уровню структуры модели".

Дуги, связывающие процессы вышерасположенных уровней с процессами любого более низкого уровня, назовем λ -связями.

Дуги, указывающие обратные связи процессов (реакции нижележащих уровней), назовем δ -связями. Два процесса различных уровней с определенными для них λ - и δ -связями образуют некоторый контур обратной связи.

В структуре МДС для каждого сетевого процесса определена некоторая конъюнктивная группа λ -входов, соответствующая подмножеству процессов, при завершении которых может быть иницирован данный процесс. Аналогично для каждого сетевого процесса определена некоторая конъюнктивная группа λ -выходов, соответствующая подмножеству процессов, с каждым из которых связан выход из программы данного процесса.

Предполагается, что МДС имеет один исходный сетевой процесс, не имеющий входящих λ -связей, и один конечный сетевой процесс, не имеющий исходящих λ -связей. Эти процессы определяют начало и конец функционирования сети.

Множество I отражает множество λ -связей МДС. Последние иницируются (возбуждаются) автоматически по мере завершения программ сетевых процессов с помощью системы управления МДС. При этом активизация (готовность к выполнению) очередных сетевых процессов соответствует моменту модельного времени, при котором оказались "возбужденными" все связи, составляющие конъюнктивные группы λ -входов данных процессов.

Обратные связи (δ -связи), если возникает в этом необходимость, иницируются из программ самих процессов с помощью специальных операторов. Иницирование δ -связи означает активизацию сетевого процесса, принадлежащего некоторому контуру обратной связи.

Сетевой процесс может иницировать одну или более δ -связей. Вновь функционирование этого процесса будет продолжено после завершения программ всех процессов, которые были им активизированы.

Рассмотрим пример. Пусть процесс P_{10} (рис. I), активизированный системой управления после завершения процессов P_7 и P_8 , иницирует две δ -связи, т.е. активизирует вновь исполнение программ этих процессов. Процесс P_7 , в свою очередь, может активизировать P_8 . Окончание программы P_8 вызовет запуск процесса P_7 . При завершении процессов P_7 и P_8 будет вновь активизирован процесс P_{10} .

Если выполнение одного и того же процесса требуется одновременно нескольким процессам других нижележащих уровней, те последние могут обслуживаться в соответствии с указанным порядком. При этом до тех пор, пока исполнение требуемого процесса не заканчивается, новое обращение к нему не осуществляется.

Помимо контуров обратных связей в структуре МДС могут быть определены также некоторые ее подсети, требующие своего многократного функционирования. Подсетью МДС назовем некоторую замкнутую часть сети, для каждой из вершин которой конъюнктивные группы λ -входов (за исключением ее начальной вершины) и конъюнктивные группы λ -выходов (за исключением ее конечной вершины) не содержат связей с процессами, не принадлежащими данной подсети.

Аналогично МДС начало и конец функционирования каждой подсети соответствуют ее исходному и конечному сетевому процессу. Повторное инициирование некоторой подсети назовем η -связью. Такая связь осуществляется с помощью специального оператора, используемого в теле конечного процесса подсети.

Совокупность λ -, δ - и η -связей определяет так называемые "вертикальные отношения" - взаимодействия между последовательно протекающими процессами, принадлежащими различным уровням. Операторы инициирования δ - и η -связей являются операторами директивного управления. Операторы синхронизации, вызывающие задержку исполнения программ процессов, определяют "горизонтальные отношения" (назовем их γ -связями) - взаимодействия между собой процессов, параллельно протекающих во времени.

В процессе моделирования может возникнуть необходимость в изменении структуры МДС. Для этого вводятся специальные операторы трансформации сети, позволяющие включать новые λ -связи в структуру модели, или, напротив, исключать имеющиеся. При этом соответственно могут либо появляться новые сетевые процессы, либо исключаться старые.

Сетевые процессы в ходе своего развития могут активизировать некоторое число процессов, не принадлежащих к P -множеству процессов, являющихся вершинами сети. Такие процессы назовем свободными. При этом каждый сетевой процесс функционирует параллельно в модельном времени наряду со свободными процессами, или активизированными, если присутствуют операторы синхронизации, определяющие совместное выполнение их программ. В свою очередь, свободные процессы, если возникает в этом необходимость, могут ак-

тивизировать требуемое число других процессов. Таким образом, в общем случае совокупность процессов, функционирующих в модели, представляет собой объединение двух множеств P и R , где R - множество свободных процессов.

Обмен сообщениями между процессами моделируется путем введения разделяемых переменных, доступных из программ различных процессов, а также с использованием механизма передачи параметров процессам. Как правило, с параметрами задаются процессы, имеющие более одной входящей δ -связи.

Дадим теперь формальное определение введенной модели.

Итак, P - некоторое множество процессов. Рассмотрим следующие бинарные отношения.

1. $\lambda_P \subset P^2$, удовлетворяющее условиям:
 - а) $\forall x \in P (\neg \lambda_P x)$ - иррефлексивность;
 - б) $\forall x, y \in P (x \neq y \& x \lambda_P y \Rightarrow \neg y \lambda_P x)$ - антисимметричность;
 - в) $\forall x, y, z \in P (x \lambda_P y \& y \lambda_P z \Rightarrow \neg x \lambda_P z)$ - интранзитивность;
 - г) $\exists! x_0, y_0 \in P \forall z \in P (x_0 \neq y_0 \& z \neq x_0 \& z \neq y_0 \Rightarrow \neg z \lambda_P x_0 \& \neg z \lambda_P y_0)$ - существование единственных исходной и конечной вершин.

Определим транзитивное замыкание λ_P^* отношения λ_P истинное на паре $\langle x, y \rangle$ тогда и только тогда, когда существует последовательность x_0, \dots, x_n ; $x_0 = x, x_n = y, x_i \lambda_P x_{i+1}, i = 0, \dots, n-1$. Отношение λ_P должно удовлетворять также следующему условию:

- д) $\forall x, y \in P (x \lambda_P^* y \Rightarrow \neg x \lambda_P y \& \neg y \lambda_P x)$ - первая часть условия является обобщением свойства интранзитивности; выполнение второй части условия необходимо для исключения дэдлоков (конфигураций, при которых вычисление оказывается невыполнимым).

Пользуясь отношением λ_P , для каждого $x \in P$ можно определить его ранг $\rho(x)$; $\rho(x_0) = 0$; $\rho(x) = \max_{y \in I} \rho(y) + 1, I = \{y | y \lambda_P x\}$.

$$2. \delta_P \subseteq \lambda_P', \lambda_P' = \{(x, y) | (y, x) \in \lambda_P\}.$$

3. $\eta_P \subseteq (\lambda_P^*)'$, удовлетворяющее следующему условию: $\forall x, y, z (z \in I_{xy}, I_{xy} \in F_{xy}, z \neq x, y) \Rightarrow \forall \omega (\omega \in P \setminus F_{xy} \Rightarrow \neg z \lambda_P \omega \& \neg \omega \lambda_P z)$, $F_{xy} = \{\langle y = z_0, \dots, z_n = x \rangle | x \eta_P y, z_i \lambda_P z_{i+1}, i = 0, \dots, n-1\}$. Для $z = x, \neg \omega \lambda_P z$; для $z = y, \neg z \lambda_P \omega$.

4. Поставим в соответствие каждому $x \in P$ некоторое счетное линейное упорядоченное множество $T_x = \{T_i\}, i \in I_x$, элементы кото-

рого интерпретируются как дискретные значения времени. Горизонтальные связи процессов из P соответствуют отношению γ_P такому, что $\gamma_P \subseteq \{(x, y) | (x, y) \in P \times P \& T_x \cap T_y \neq \emptyset\}$. При этом γ_P удовлетворяет свойству иррефлексивности: $\forall x \in P (\neg x \gamma_P x)$.

Помимо множества P пусть также задано некоторое множество R (возможно $R = \emptyset$).

Поставим в соответствие каждому $r \in R$ множество $T_r = \{T_i\}$, $i \in I_r$. Взаимодействие между собой процессов из P и R соответствует отношению γ_{PR} такому, что $\gamma_{PR} \subseteq \{(x, r) | (x, r) \in P \times R \& T_x \cap T_r \neq \emptyset\}$. Взаимодействие между собой процессов из R соответствует отношению γ_R такому, что $\gamma_R \subseteq \{(r, q) | (r, q) \in R \times R \& T_r \cap T_q \neq \emptyset\}$. При этом γ_R удовлетворяет свойству иррефлексивности: $\forall r \in R (\neg r \gamma_R r)$.

Итак, структурную имитационную модель определим как восьмерку:

$$S = \langle P, R, \lambda_P, \delta_P, \eta_P, \gamma_P, \gamma_{PR}, \gamma_R \rangle.$$

Управление функционированием такой модели в целом, т.е. последовательностью выполнения отдельных событий, происходящих в системе, не требует дополнительной организации со стороны пользователя и осуществляется автоматически на основе описания структуры системы и процессов функционирования отдельных ее составляющих с помощью специальных средств системы управления F_s .

Л и т е р а т у р а

1. Машинные методы обнаружения закономерностей. (Материалы Всесоюзного симпозиума, 5-7 апреля 1976 г.) Новосибирск, 1976, -167 с. (ИМ СО АН СССР).
2. БАКАНЕР Р., СААТИ Т. Конечные графы и сети. -М.: Наука, 1974. -366 с.
3. ФОРД Л., ФАЛКЕРСОН Д. Потоки в сетях. -М.: Мир, 1966, -276 с.
4. ШЕННОН Р.Д. Имитационное моделирование систем. Искусство и наука. /Пер. с англ.- М.: Мир, 1978, -418 с.
5. БУСЛЕНКО Н.П. Моделирование сложных систем. -М.: Наука, 1978, -399 с.
6. НЕЙЛОР Т. Машинные имитационные эксперименты с моделями экономических систем. -М.: Мир, 1975, -500 с.
7. БУСЛЕНКО В.Н. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем. -М.: Наука, 1977. -239 с.
8. Общезадаточная система моделирования GPSS /360. /Пер. с англ под ред. О.В. Голованова. -М.: НИИТЭХИМ, 1974. -183 с.

9. ДАД У.И., НИГАРД К. СИМУЛА - язык для программирования и описания систем с дискретными событиями. - В кн.: Алгоритмы и алгоритмические языки. Вып. 2., М., 1967. -72 с. (ВУ АН СССР).
10. МАРКОВИЦ Г., ХАУСНЕР В., КАРР Г. СИМСКРИПТ. Алгоритмический язык для моделирования. -М.: Сов.радио, 1966,-152 с.
11. КНОТН Р.Е., McNELELV J.L. SOL - a symbolic language for general purpose systems simulation. - IEEE Trans.Elect.Comput. , 1964,v.ЕС-13, N 4,p.401-408.
12. ВУХТОН J.N., LASKI J.G. Control and Simulation Language.- Computer J.,1962,v.5, N 3,p.194-199.
13. СЛЭНГ - система программирования для моделирования дискретных систем. /Глушков В.М., Калининченко Л.А., Москаленко В.М., Марьянович Т.П., Сахнюк М.А. -Киев. 1969. -413 с. (ИК АН УССР).
14. Система программирования НЕДИС. -Киев. 1975. ч.1. -206с., ч.2, -190 с. (ИК АН УССР).
15. КИЕМА Ф.Дж. Языки моделирования. -В кн.: Машинные имитационные эксперименты с моделями экономических систем.М.,1975.с.397-489.
16. ДАД У.И. Языки для моделирования систем с дискретными событиями. -В кн.: Языки программирования. М.,1972, с.344-403.
17. ГУСЕВ В.В., МАРЬЯНОВИЧ Т.П., САХНЮК М.А. Сравнительный анализ средств программного моделирования сложных систем. -Управляющие системы и машины, 1973, №1, с.1-7.
18. ДУБОВСКАЯ Н.И. Сравнительный анализ основных языков дискретного моделирования. -В кн.: Автоматизация проектирования в микроэлектронике. Теория. Методы. Алгоритмы. (Вычислительные системы, вып. 77.) Новосибирск, 1978, с. 94-104.
19. SHANNON R.E. Simulation; a Survey with Research Suggestions.-AIEE Transac.,1975,v.7, N 7,p.289-301.
20. ЯКОВЛЕВ Е.И. Машинная имитация. -М.: Наука, 1975, -158 с.
21. МЕСАРОВИЧ М., ТАКАХАРА Я. Общая теория систем: математические основы. -М.: Мир, 1978. -311 с.
22. ДУБОВСКАЯ Н.И., СВИРИДЕНКО Д.И. СТИМОЛ - язык представления структурных имитационных моделей. -Настоящий сборник,с.83-99.

Поступила в ред.-изд.отд.
6 июля 1979 года