

УДК 004.94

Н.А. СКАТКОВА, Д.Ю. ВОРОНИН, К.С. ТКАЧЕНКО

Севастопольский национальный технический университет, Украина

ДИСКРИМИНАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕРСИОННО-МОДЕЛЬНОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ

Рассмотрена задача дискриминационного анализа систем имитационного моделирования с использованием версионно-модельной избыточности. Основное внимание уделено процессу организации имитационных экспериментов в различных средах. Предложен подход, позволяющий при помощи введения версионно-модельной избыточности парировать дефекты проектирования и взаимодействия алгоритмических и вычислительных составляющих имитационных моделей, а также принимать Парето-оптимальные решения об организации имитационных экспериментов.

Ключевые слова: имитационное моделирование, версионная избыточность, объекты критического применения, AnyLogic, GPSS, дефекты проектирования и взаимодействия, Парето подход.

Введение

В настоящее время имитационное моделирование [1] по праву считается одним из самых популярных и актуальных методов анализа гарантоспособности систем критического применения [2] в условиях параметрически нестационарных потоков заданий, что характерно для современных приложений. Это связано с тем, что для таких систем аналитические модели в большинстве случаев довольно сложны и статичны в том смысле, что они не ориентированы на корректировку решений в условиях изменения оперативной обстановки и выполнены без учета технологий, основанных на понятии диверсности, то есть во многих случаях принимаемые на их основе решения имеют не достаточную вычислительную устойчивость и не отражают в полной мере уровень гарантоспособности рассматриваемых объектов [2,3].

За последние десятилетия развитие имитационного моделирования проходило в рамках технической реализации известных ранее идей и подходов. Таким образом, в последние годы появилось множество пакетов имитационного моделирования, как общего назначения (реализующих методы системной динамики, "процессного" дискретно-событийного, агентного моделирования, др.), так и специализированные пакеты, направленные на узкую область знаний, например, NS2, ориентированный на исследования протоколов маршрутизации в компьютерных сетях.

В табл. 1 приведены результаты дискриминационного анализа основных имитационных сред, имеющих дискретно-событийную парадигму: GPSS World [4], AnyLogic [5], сопряженная система DG [6, 7].

Таблица 1
Сравнительная характеристика сред имитационного моделирования

| среда ИМ № критерия | GPSS World | Сопряженная система DG | AnyLogic |
|------------------------|------------|------------------------|----------|
| 1. | + | - | + |
| 2. | + | + | + |
| 3. | - | - | + |
| 4. | - | + | + |
| 5. | - | - | + |
| 6. | - | + | + |
| 7. | - | + | - |
| 8. | - | + | + |
| 9. | + | + | - |
| 10. | - | - | + |
| 11. | - | - | + |

В качестве критериев оценки были выбраны следующие:

- к1) лаконичность получаемых моделей;
- к2) расширенные возможности по организации и проведению экспериментов с моделью;
- к3) наличие встроенного аппарата многопараметрической оптимизации;
- к4) наличие объектно-ориентированного подхода к созданию моделей;
- к5) кросс-платформенность получаемых моделей;

к6) удобный экспорт и импорт данных из различных приложений;

к7) использование готовых библиотек алгоритмов на Паскале и Си;

к8) наличие средств по созданию интерфейса и анимации процесса моделирования;

к9) возможность использования библиотек моделей написанных на GPSS;

к10) возможность одновременного использования всех парадигм имитационного моделирования в рамках одной модели;

к11) наличие постоянной технической поддержки среды разработчиками.

Рассмотрим подробнее результаты дискриминационного анализа основных имитационных сред с точки зрения критерия №2, учитывающего возможности по организации и проведению экспериментов с реализованной моделью. Согласно [1], в большинстве имитационных экспериментов в качестве основных характеристик модели используются случайные величины. Модель содержит обычно цепочки случайных событий, сложным образом взаимодействующих друг с другом. В [1] утверждается, что при достаточно большом числе повторений (большой величине выборки) можно сделать результаты моделирования сколь угодно точными. Проблема состоит в том, что для этого необходимо при каждом прогоне генерировать абсолютно идентичные процессы, что ввиду стохастичности основных характеристик модели реализовать крайне сложно. Таким образом, результатам моделирования присуща неточность, которую нельзя устранить увеличением числа повторений или применением различных методов статистического анализа. Отмеченные обстоятельства имеют принципиальное значение в случае, когда необходимо обеспечить гарантоспособные вычислительные сервисы для объектов критического применения: в энергетике, здравоохранении, транспорте и т.д. Качество модели определяется уровнем уверенности в том, что выводы, сделанные с ее помощью, применимы к реальной системе. Точность модели можно представить в виде числа на шкале от 0 до 1, где 0 означает абсолютно неточную модель, а 1 – абсолютно точную.

Многочисленные публикации последних лет, [8,9] свидетельствуют о том, что введение версионно-модельной избыточности (ВМИ) позволит парировать дефекты проектирования и взаимодействия алгоритмических и вычислительных составляющих имитационных моделей, а также принимать Парето-оптимальные решения, связанные с организацией имитационных экспериментов.

Проведенный анализ позволил сделать вывод о том, что, необходимо существенно повысить роль системного анализа в формализации процедур орга-

низации имитационных экспериментов, обеспечив тщательное и систематическое использование основных принципов системного анализа при многокритериальной минимизации числа экспериментов по достижению целевых установок моделирования при строго заданном пороге точности модели.

1. Оптимизация длины прогонов имитационной модели при параметрическом оценивании

В любой стохастической имитационной модели сложной системы применяются генераторы случайных чисел. Как правило, в большинстве современных сред имитационного моделирования исследователю предоставляются широкие возможности по их настройке. Базовый генератор (числа с выхода которого затем преобразуются для получения случайных величин с заданными законами распределения) является основным источником погрешности имитации. Чтобы ее оценить достаточно определить оценки математического ожидания и дисперсий отклонений компонент вектора откликов Y . В серединной точке области изменения выходных переменных модели X организуется несколько (рекомендуется $N=10$) прогонов модели с одними и теми же значениями X , но с разными начальными значениями для базовых генераторов случайных чисел ξ_{0k} . Для каждого k -ого прогона модели вычисляются значения n -й компоненты вектора отклика Y_{nk} . В результате получают выборки значений отклика $\{Y_{nk}\}$, $k = 1, \dots, 10$. По выборкам определяют оценки математического ожидания и дисперсии. Такими оценками являются соответственно \bar{Y}_n и D_n , вычисляемые по формулам

$$\bar{Y}_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N Y_{nk}; \quad (1)$$

$$D_n = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (Y_{nk} - \bar{Y}_n)^2. \quad (2)$$

Определяется доверительный интервал нахождения истинного значения математического ожидания n -й компоненты отклика Y_{ni} . Можно допустить нормальность распределения отклонения Y_{nk} от истинного значения Y_{ni} . Поскольку объемы выборок малы ($k < 30$), то для нахождения доверительных интервалов используется t -статистика

$$t = (\bar{Y}_n - Y_{ni}) \sqrt{\frac{N-1}{D_n}},$$

имеющая распределение Стьюдента. Задавшись уровнем значимости $\alpha = 0,05$, можно с вероятностью 0,95 утверждать, что истинное значение Y_n и лежит в пределах

$$\bar{Y}_n - t_{0,05} \sqrt{\frac{D_n}{N-1}} \leq Y_{ни} \leq \bar{Y}_n + t_{0,05} \sqrt{\frac{D_n}{N-1}},$$

где $t_{0,05}$ – значение t-статистики, определяемое при (N-1) степенях свободы и уровне значимости $\alpha=0,05$.

Доверительный интервал для среднего значения n-й компоненты вектора отклика (при N=10 и $\alpha=0,05$) можно записать в виде

$$\bar{Y}_n \pm d_n = \bar{Y}_n \pm 0,753 \sqrt{\frac{D_n}{N-1}}.$$

Значение D_n определяет погрешность n-й компоненты отклика модели. Затем из всех D_n находят максимальное значение, которое в данном случае и будет верхней границей погрешности, связанной с использованием в имитационной модели генераторов случайных величин.

Практический интерес представляет непосредственно нахождение таких значений компонент вектора входных переменных, при которых имеет место максимальная вероятность правильного функционирования модели в зависимости от номера цикла испытания, и, соответственно, от входного параметра модели – загрузки ρ .

Пусть под ε будем считать отношение абсолютного значения разности максимального отклонения правильного значения компоненты выходного вектора при заданном номере прогона имитационной модели и математического ожидания отклонения правильного значения данной компоненты выходного вектора к математическому ожиданию отклонения правильного значения данной компоненты

$$\varepsilon = \frac{|\delta_X(N) - m_X|}{m_X}.$$

Тогда считая интенсивность обслуживания μ постоянной и изменяя интенсивность потока λ , можно разбить решение этой задачи на две оптимизационные: нахождение максимального значения вероятности правильного функционирования модели при минимальном значении ε и номере прогона

$$\text{меньше заранее заданного } \begin{cases} P \rightarrow \max \\ \varepsilon \rightarrow \min \\ N < N_0 \end{cases}; \text{ нахождение}$$

максимального значения вероятности правильного функционирования модели при ограниченном сверху значении ε и номере прогона меньше заранее за-

$$\text{данного } \begin{cases} P \rightarrow \max \\ \varepsilon < \varepsilon_0 \\ N < N_0 \end{cases}.$$

В соответствии с [3], в этом случае целесообразно применить модель роста вероятности правильного функционирования модели, которая стро-

ится на двух предположениях: 1) установившееся значение вероятности при длительном процессе выявления ошибок будет близко к единице; 2) по истечении некоторого времени достигается точка практического «прекращения роста» кривой вероятности.

Тогда, $P_k = P_\infty - \alpha/k$, где P_k – вероятность правильного функционирования модели во время k-го цикла испытаний (от номера цикла испытаний линейно зависит параметр модели ρ), P_∞ – установившееся значение вероятности правильного функционирования модели, достижимое при $k \rightarrow \infty$, α – коэффициент, характеризующий скорость роста, k – номер итерации испытания модели.

Согласно [3] имеются следующие выражения для искомым оценок:

$$\alpha = \frac{\left\{ \sum_{k=1}^N ks_k - [(N+1)/2] \sum_{k=1}^N s_k \right\} / n}{[(N+1)/2] c_1 - N};$$

$$P_\infty = \frac{\left[(c_1/N) \sum_{k=1}^N ks_k - \sum_{k=1}^N s_k \right] / n}{[(N+1)/2] c_1 - N};$$

$$n = (1/N) \sum_{k=1}^N n_k;$$

$$c_1 = \sum_{k=1}^N 1/k \approx \log(N+0,5) + E,$$

где E – постоянная Эйлера, равная 0,577215..., n_k – суммарное количество реализаций, s_k – количество положительных реализаций.

Следует отметить, что у данного подхода имеются и слабые стороны. В частности, выдвигаются высокие требования к точности эталонной модели, но не для всех ситуаций, тем более нестационарных процессов их можно удовлетворить.

В качестве иллюстрирующего примера применения описанного подхода были рассмотрены сравнительно простые имитационные модели СМО, реализованные в GPSS World и AnyLogic. Рассматривается одноканальная система массового обслуживания, в которой находится один обслуживающий прибор.

Заявки поступают в систему группами случайного объема через единичные интервалы времени, нумеруются и обслуживаются в порядке поступления. Как только обслуживающий прибор заканчивает обслуживание некоторой заявки, он немедленно начинает обслуживать следующую, а обработанная заявка покидает систему.

Процедуры валидации и верификации были проведены на основе эталонной аналитической модели. Полученные кривые роста приведены на рис. 1.

На основании полученного графика можно сделать вывод, что модель, построенная в GPSS World, является менее точной, чем реализованная в AnyLogic. Кроме того, в среде AnyLogic реализован более широкий спектр возможностей по проведению экспериментов с моделью:

- простой;
- оптимизационный (с OptQuest);
- варьирование параметров;
- сравнение "прогнозов";
- Монте-Карло;
- анализ чувствительности;
- калибровка;
- нестандартный.

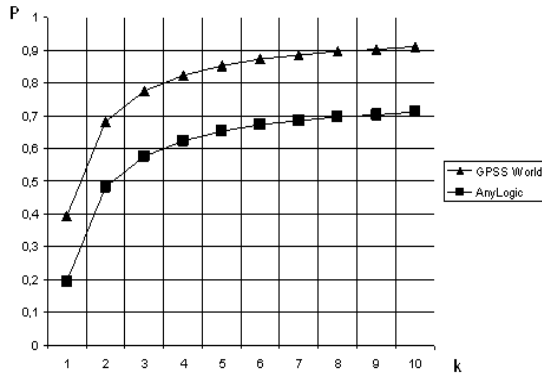


Рис. 1. Кривая роста для имитационных моделей, реализованных в разных средах имитационного моделирования

Таким образом, среду AnyLogic можно рекомендовать для проведения комплекса расширенных экспериментальных исследований с имитационными моделями, выполненными на основании различных парадигм имитационного моделирования [10, 11].

2. Парето-оптимальные решения о введении версионно-модельной избыточности

Рассмотрим организацию имитационных экспериментов для следующей задачи: даны G, N, f, K, Φ, M ; необходимо найти P^0 :

$$T_{Pr}^0 = \min_B \{ \max_i \{ T^s(l_i) \} \}, \quad \text{при ограничении}$$

$$\sum_{P^s} N_m^s \leq M, \quad \forall P^s \in B, \quad \text{где } G \text{ — сеть производственных}$$

задач Φ_m , причем $\Phi = \{ \Phi_m : m = 1, \dots, K \}$, где K — число классов производственных задач. $G = (V, A)$, где V — множество узлов (событий); A — множество дуг, которым соответствуют производственные задачи; R — число узлов сети, $R = |V|$; (i, j) — дуга, исходящая из i -го

узла в j -й узел сети; $n_{i,j,r}$ — объем ресурса вида r , выделяемого на дугу (i, j) ; $n_{i,j}$ — множество возможных значений ресурса, выделяемого на дугу (i, j) ;

$$n_{i,j,r} = \{ n_{i,j,r} = 1, \dots, |n_{i,j}| \}; \quad n_{i,j}^{\min} = n_{i,j,1};$$

$$n_{i,j}^{\max} = n_{i,j,|n_{i,j}|}; \quad n_{i,j}^{\Delta} = \{ n_{i,j,r}, r = 1, \dots, |n_{i,j}| \};$$

$$N = \{ n_{i,j} : (i, j) \in A \};$$

$t_{i,j,r}$ — длина дуги (i, j) , т.е. длительность решения соответствующей производственной задачи, при количестве $n_{i,j,r}$ ресурса, выделенного на соответствующую ей задачу; $f_{i,j}$ — функция, устанавливающая соответствие между $n_{i,j,r}$ и $t_{i,j,r}$, $r = 1, \dots, |n_{i,j}|$;

$f = \{ f_{i,j} : (i, j) \in A \}$ — множество функций $f_{i,j}$; s — вариант распределения ресурса; $n_{i,j}^s$ — количество ресурса, выделенного для (i, j) -задачи при s -ом распределении; N_m^s — суммарное количество ресурса, распределяемого в m -ую группу при s -ом распределении:

$$N_m^s = \{ n_{i,j}^s : (i, j) \in \Phi_m \};$$

$$n_m^{\min \Delta} = \min \{ n_{i,j}^{\min} : (i, j) \in \Phi_m \};$$

$$n_m^{\max \Delta} = \max \{ n_{i,j}^{\max} : (i, j) \in \Phi_m \};$$

$n_m^{\Delta} = \{ n_m^{\min}, \dots, n_m^{\max} \}$; B — множество вариантов распределения: $B = \times_{m=1}^K n_m^{\Delta}$; P^s — s -е распределение ре-

сурса: $P^s = \{ N_m^s : m = 1, \dots, K \}$; P^0 — оптимальное распределение ($P^s, P^0 \in B$); U_i — множество номеров узлов сети, исходящие из которых дуги инцидентны i -му узлу; $l_{z,i}$ — путь из z -го узла сети в i -й

узел; $l_i = l_{1,i}$; L_i — множество всех путей l_i ; $T^s(l_i)$ — длина пути l_i , соответствующего распределению P^s ; $T_{P_i}^s$ — наиболее ранний возможный срок

(НРВС) достижения i -го узла (i -й узел считается достигнутым, если завершилось движение по самому длинному из путей L_i); $T_{P_i}^s = \max \{ T^s(l_i) : l_i \in L_i \}$;

$T_{P_i}^0$ — НРВС достижения i -го узла сети, соответствующее распределению P^0 ; M — распределяемое количество ресурса.

Обобщенная схема параметрического моделирования поставленной задачи представлена на рис. 2.

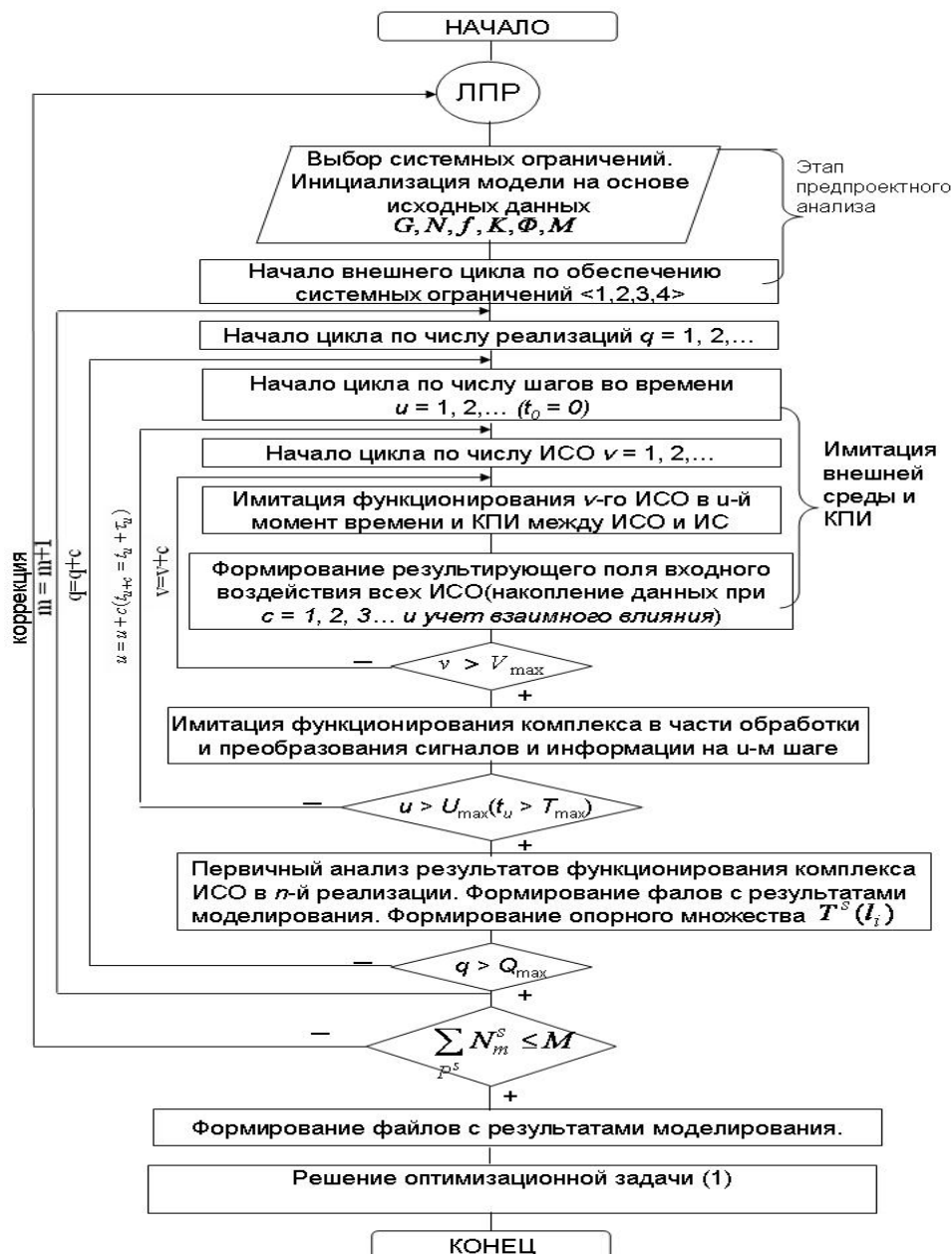


Рис. 2. Обобщенная схема первичной настройки имитационной модели

Элементы множества ML представляется в виде иерархически разветвленной структуры, изображенной на рисунке 3. Многоверсионная система организации имитационных экспериментов включает в себя множество моделей сетей производственных задач, таких что $ML = ML_1 \cup ML_2$. $ML_1 = \{ML_{11}, ML_{12}, ML_{13}, ML_{14}\}$ – подмножество имитационных моделей, реализованных в среде AnyLogic, $ML_2 = \{ML_{21}, ML_{22}, ML_{23}, ML_{24}\}$ – подмножество имитационных моделей, реализованных в сопряженной среде DG (Delphi+GPSS), причем $ML_1 \cap ML_2 = \emptyset$.

Элементы подмножеств ML_1 и ML_2 отображают соответственно версии моделей, отличающие-

ся парадигмой моделирования и степенью адекватности структурным классам сетей транспортных задач.

Версиям моделей соответствуют элементы $ML_{\alpha\beta\mu}$, где индекс $\alpha = 1..2$ определяет среду реализации модели, $\beta = 1..4$ соответствует используемой парадигме ИМ, $\mu = 1..7$ определяет опорный класс сети транспортных задач. $A_\alpha = \{\text{AnyLogic, сопряженная система DG (Delphi+GPSS)}\}$; $B_\beta = \{\text{динамическая система, системная динамика, дискретно-событийное моделирование, мультиагентная система}\}$; $M_\mu = \{q_1 \times q_2 \times q_3 \times q_4 \times q_5\}$, где $Q = \{q_1, q_2, q_3, q_4, q_5\}$ – множество классификационных признаков. Выбор конкретной используемой

модели в текущей ситуации осуществляет ЛПР, исходя из условий задачи, определяется требуемым

количеством имитационных экспериментов и уровнем точности получаемых результатов (табл. 2).

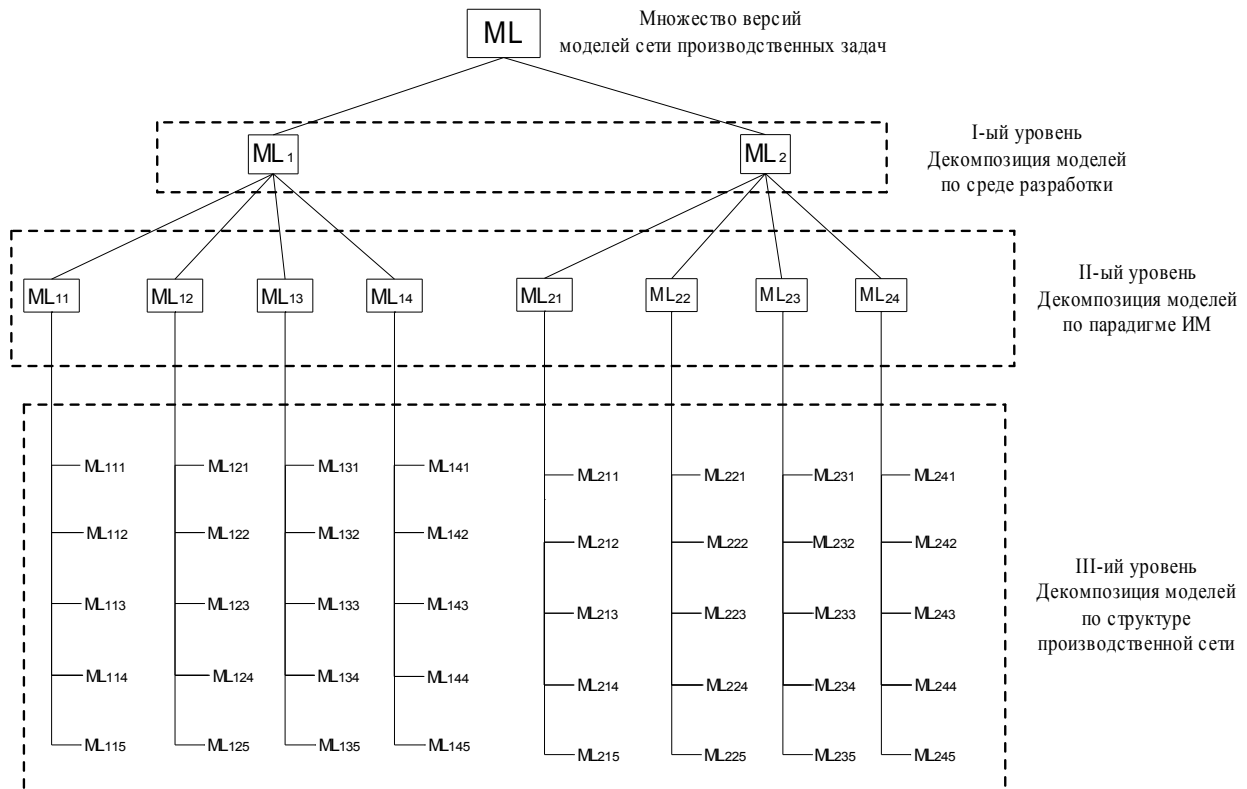


Рис. 3. Иерархическая структура множества ML

Таблица 2

Матрица принятия решений ЛПР по выбору моделей сети производственных задач

| Требуемый ур-нь точности результатов | Требуемое количество имитационных экспериментов | | |
|--------------------------------------|---|---|---|
| | Малое | Среднее | Высокое |
| Высокий | ML ₂₃₅ , ML ₁₃₅ | ML ₂₃₂ , ML ₂₃₃ , ML ₂₃₄ , ML ₁₃₂ , ML ₁₃₃ , ML ₁₃₄ | — |
| Средний | ML ₂₄₅ , ML ₁₄₅ | ML ₂₄₁ , ML ₂₄₂ , ML ₂₄₃ , ML ₂₄₄ , ML ₁₄₁ , ML ₁₄₂ , ML ₁₄₃ , ML ₁₄₄ | ML ₂₃₁ , ML ₁₃₁ |
| Низкий | — | ML ₁₂₁ , ML ₁₂₂ , ML ₁₂₃ , ML ₁₂₄ , ML ₁₂₅ , ML ₂₂₁ , ML ₂₂₂ , ML ₂₂₃ , ML ₂₂₄ , ML ₂₂₅ | ML ₁₁₁ , ML ₁₁₂ , ML ₁₁₃ , ML ₁₁₄ , ML ₁₁₅ , ML ₂₁₁ , ML ₂₁₂ , ML ₂₁₃ , ML ₂₁₄ , ML ₂₁₅ |

Заключение

Рассмотрена задача дискриминационного анализа систем имитационного моделирования с использованием версионно-модельной избыточности. Основное внимание уделено процессу организации имитационных экспериментов в различных средах. Предложен подход, позволяющий оптимизировать длину прогнозов имитационной модели при параметрическом оценивании, а также при помощи введения версионно-модельной избыточности парировать дефекты проектирования и взаимодействия алгоритмических и вычислительных составляющих имитационных моделей

и принимать Парето-оптимальные решения об организации имитационных экспериментов.

Литература

1. Шеннон Р. *Имитационное моделирование систем – искусство и наука* / Р.Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 418 с.
2. Харченко В.С. *Гарантоспособность и гарантоспособные системы: элементы методологии* / В.С. Харченко // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2006. – №5 (17). – С. 7–19.
3. Шаракианэ А.С. *Сложные системы: Учеб. пособие для вузов* / А.С.Шаракианэ, И.Г.Железнов, В.А.Ивницкий. – М.: Высш. шк., 1977. – 247 с.

4. Шрайбер Т. Дж. Моделирование на GPSS / Т. Дж. Шрайбер. — М.: Машиностроение, 1980. — 592 с.
5. Карпов Ю. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 / Ю. Карпов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 400 с.
6. Архангельский А.Я. Программирование в Delphi 7 / А.Я. Архангельский. — М.: Изд-во ООО «Бином-Пресс», 2003. — 1152 с.
7. Скатков А.В. Обеспечение гарантоспособности программного обеспечения на основе автоматизации сопряжения разнородных программных сред / А.В. Скатков, Д.Ю. Воронин // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. — 2008. — №5 (32). — С. 37-42.
8. Волковой А.В. Многоверсионные системы и технологии для критических приложений: Лекционный материал / А.В. Волковой, И.В. Лысенко, В.С. Харченко, О.В. Шурыгин; под ред. Харченко В.С. — Министерство образования и науки Украины, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2008. — 224 с.
9. Харченко В.С. Многоверсионные системы, технологии, проекты / В.С. Харченко, В.Я. Жихарев, В.М. Илюшко, Н.В. Нечипорук; под ред. д-ра техн. наук, проф. В.С. Харченко. — Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2003. — 486 с.
10. Скатков А.В. Обеспечение гарантоспособности распределенной вычислительной системы с использованием диверсной диспетчеризации / А.В. Скатков, Д.Ю. Воронин // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. — 2008. — № 7 (34). — С. 19-24.
11. Воронин Д.Ю. Системотехнический анализ процессов диспетчеризации в распределенных вычислительных системах / Д.Ю. Воронин // Вестник СевГТУ. Вып. 93: Информатика, электроника, связь: Сб. науч. тр. — Севастополь: Изд-во Сев-НТУ, 2008. — С.38-42
12. Скаткова Н.А. Оптимизация управлений транспортной системой участка механообработки при неоднородных потоках деталей операций / Н.А. Скаткова // Оптимизация производственных процессов: сб. науч. тр. — Севастополь, 2007. — Вып. 10. — С. 11-15.

Поступила в редакцию 24.01.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры автоматизации и компьютерных технологий В.А. Краснобаев, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. Петра Василенко, Украина.

ДИСКРИМІНАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ВЕРСІЙНО-МОДЕЛЬНОЇ НАДМІРНОСТІ

Н.О. Скаткова, Д.Ю. Воронін, К.С. Ткаченко

Розглянуто задачу дискримінаційного аналізу систем імітаційного моделювання з використанням версійно-модельної надмірності. Основну увагу приділено процесу організації імітаційних експериментів у різних середовищах. Запропоновано підхід, що дозволяє за допомогою введення версійно-модельної надмірності парировати дефекти проектування та взаємодії алгоритмічних і обчислювальних складових імітаційних моделей, а також приймати Парето-оптимальні рішення про організацію імітаційних експериментів.

Ключові слова: імітаційне моделювання, версійна надмірність, об'єкти критичного застосування, AnyLogic, GPSS, дефекти проектування і взаємодії, Парето підхід.

DISCRIMINATORY ANALYSIS OF SIMULATION SOFTWARE USING VERSION-MODEL REDUNDANCY

N.O. Skatkova, D.Y. Voronin, K.S. Tkachenko

The problem of simulation software discriminatory analysis using version-model redundancy is considered. The paper focuses on the process of organizing simulation experiments in various environments. The proposed approach allows parrying design and interaction faults of simulation models, as well as to organize simulation experiments on the base of Pareto approach.

Keywords: simulation, version redundancy, objects of critical applications, AnyLogic, GPSS, the design and interaction faults, Pareto approach.

Скаткова Наталья Александровна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри кібернетики і вичислительной техники, Севастопольский национальный технический университет, Севастополь, Украина, e-mail: kvvt@sevgtu.sebastopol.ua.

Воронин Дмитрий Юрьевич — аспирант кафедри кібернетики і вичислительной техники, Севастопольский национальный технический университет, Севастополь, Украина, e-mail: dima@voronins.com.

Ткаченко Кирилл Станиславович — ассистент кафедри кібернетики і вичислительной техники, Севастопольский национальный технический университет, Севастополь, Украина, e-mail: kvvt@sevgtu.sebastopol.ua.