

Альхалайбех Айман, О.Ф. Михаль

МОДЕЛИРОВАНИЕ НА СЕТЯХ ПЕТРИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА МЕЖДУ СИСТЕМАМИ С ОГРАНИЧЕННЫМ РЕСУРСОМ ГОТОВНОСТИ

Введение

В бионике предметом исследований являются объекты живой природы, рассматриваемые в аспекте поиска аналогов для разработки искусственных *технических систем* (ТС) с характеристиками, приближающимися к характеристикам живых систем [1]. Объектами живой природы являются отдельные организмы (особи) и их сообщества. При этом системные различия между особями и сообществами в ряде случаев бывают не слишком значительными (простейшие, грибы, коллективные насекомые). Аналогично, в ТС часто условной является разбивка на системы и подсистемы, блоки и субблоки. Вследствие этого аналогия между системами в живой природе и технике простирается на область *информационного обмена* (ИО), производимого с целью согласования действий совокупностей систем (подсистем) — *сообществ* в живой природе, *распределенных* ТС в технике. Согласованность действий является ключевым моментом, определяющим целевую функцию поведения (выживания, функционирования) систем. Но качество ИО (число прямых и обратных информационных связей [2] между двумя ТС или ТС и объектом живой природы — человеком-оператором) лимитировано возможностями каналов ИО между системами и *ограниченными ресурсами готовности* (ОРГ) систем по обработке информации.

Для проектирования ТС представляют интерес оценки роста сложности при увеличении числа связей ИО с учетом ОРГ. Целью настоящей работы является получение подобных оценок на моделях. В качестве инструмента моделирования выбран аппарат *сетей Петри* (СП) [3]. При этом решаются задачи апробации методов моделирования, разработки соответствующих классов моделей, сопоставления и интерпретации результатов.

1. Сетевая парадигма

В распределенных ТС отдельные объекты, связи и взаимодействия удобно представлять в рамках сетевой парадигмы. Система предстает в виде графа. Вершины графа интерпретируются как функционально завершённые блоки системы либо детерминированные состояния блоков (события); ребра графа — как связи между блоками либо переходы между состояниями (связи между событиями).

Аппарат СП интересен тем, что интегрирует в себе блочно-функциональное и событийное описание системы. Основным элементом СП является

двудольный ориентированный граф G , содержащий два множества вершин $P: \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ (вектор мест) и $T: \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ (вектор переходов) и два множества (матрицы) ориентированных ребер, являющихся связями места-переходы M_{PT} и переходы-места M_{TP} .

Двудольный граф $G(P, T, M_{PT}, M_{TP})$ дополнен *начальной разметкой* вектора вершин P и *правилами смены разметки*, включающими определенную *дисциплину* рассмотрения мест и переходов и изменение состояния некоторых из них в соответствии с фиксированными *логическими правилами*. Варьированием дисциплины и (или) логических правил порождаются разные варианты правил смены разметки. Варьированием правил смены разметки и наложением дополнительных ограничительных условий на параметры P, T, M_{PT} и M_{TP} порождаются разные подвиды СП. Далее для моделирования ИО между системами используется подвид СП с *приоритетами* [4], предполагающий рассмотрение переходов (их зарядку и разрядку) в фиксированное порядке.

2. Моделирование распределенных систем

Распределенные системы обработки информации получили широкое распространение в различных технических областях. ИО в системах предполагает совместное использование ограниченных ресурсов ИО и многоуровневую адаптивную организацию протоколов обмена, что требует затраты ресурсов.

Целесообразно выделить два вида ресурсов ИО: *ресурс каналов обмена* (РКО) и *ресурс готовности систем* (РГС) к обмену. РКО определяется количеством и качеством каналов, по которым системы могут обмениваться информацией. РГС обусловлен производительностью системы, способностью перерабатывать поступающую информацию и генерировать её для передачи. В технической реализации оба этих ресурса являются ограниченными в соответствии с номинальными условиями функционирования системы. При низкой активности ИО ресурсы простаивают, при повышенной (сверхпороговой) — их не хватает. В связи с этим разработка распределенных ТС с избыточными ресурсами ИО бывает экономически нецелесообразна, а при недостатке ресурсов система может не обеспечить надлежащего функционирования. В подобной ситуации целесообразен принцип адаптивности, предполагающий (в рассматриваемом варианте) единообразность (внутрисистемную стандартизованность) РГС и РКО и возможность маневра РГС

и РКО в соответствии с текущим состоянием загрузки системы.

При рассмотрении подобных вопросов целесообразно моделирование. Его назначение — демонстрация (апробация) структурных (схемных) особенностей реализации и исследование роста сложности системы по мере увеличения уровня адаптивности (интеллектуальности) обеспечиваемого информационного обмена. На уровне концепции модель рассмотрена ранее [2]. В данной работе представлена реализация модели средствами СП. Рассмотрен *симплексный* вариант обмена: система B является источником информации, система A — приемником: $(B \rightarrow A)$. В *дуплексном* варианте при симметричном прозрачном использовании каналов связи в двух направлениях (упрощенный случай) модель зеркально симметрично удваивается: $(B \leftrightarrow A) \equiv (B \rightarrow A) \text{ И } (A \rightarrow B)$

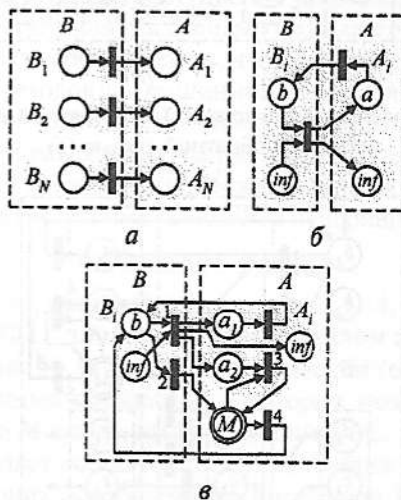


Рис. 1. Модели ИО без обратных связей (а) (показано N каналов), с одной (б) и с двумя (в) (показан один канал) обратными связями

На рис. 1 и 2 представлено четыре последовательно усложняющихся варианта моделей взаимодействия систем A и B . В варианте, показанном на рис. 1 а, учитывается только РКО: информация из B поступает в A без проверки готовности к приему. Варианты, показанные на рис. 1 б, в и рис. 2, включают проверку наличия РГС. Рассмотрим модели более подробно.

В 1-м варианте (рис. 1 а) при наличии метки в месте B_i связанный с ним переход срабатывает (зарядается и разряжается), и метка переходит в место A_i . Если ранее в месте A_i уже находилась метка, что соответствует ситуации отсутствия РГС, модель будет реагировать в соответствии с принятой дисциплиной работы СП. В частности, если используется дисциплина с поглощением избыточных меток [4], в месте A_i будет находиться снова одна метка, что интерпретируется как утрата (пропуск) информации.

Во 2-м варианте (рис. 1 б) дополнительно введены места b и a . Назначение обратной связи $a \rightarrow b$ —

сигнализация о наличии РГС. Если в b имеется метка, то при появлении метки в inf переход в B_i срабатывает, и метки поступают в места a и inf в A_i . Далее срабатывает переход в A_i и метка поступает в b . Одновременно метка из места inf в A_i поступает на обработку в последующую часть системы (не показана). При этом высвобождается РГС.

В 1-м и 2-м вариантах активной является передающая сторона B_i ; РГС на приемной стороне A_i не централизован. В 3-м варианте (рис. 1 в) РГС централизован и активность по получению информации проявляет приемная сторона A_i . Централизация РГС осуществляется местом M , общим для N информационных каналов (условно показан только один), по которым система B выставляет информацию для передачи. Система A обладает МРГС для приема информации (метки в месте M). Представляет интерес случай $N > M$. При этом A выделяет ресурс ($M \rightarrow b$) каналу по запросу ($b \rightarrow M$). Для моделирования применена СП с приоритетами. Переходы 1 и 3 имеют более высокий приоритет, чем переходы 2 и 4. При наличии информации inf на передающей стороне срабатывает переход 1, и информация передается ($inf \rightarrow inf$). При этом метки передаются также в места a_1 и a_2 . Далее готовность канала восстанавливается: высылается квитанция ($a_1 \rightarrow b$), а метка в a_2 используется для блокировки повторного выделения РГС. Таким образом, данной схемой реализуется два механизма регулирования передачи информации: выделение РГС и захват канала продолжительным потоком информации. Если принимающая система имеет свободный РГС, она выделяет его i -й передающей системе B_i . Если информация для передачи отсутствует, ресурс возвращается ($b \rightarrow M$). При наличии информации передающая система захватывает канал и удерживает его посредством механизма квитирования до тех пор, пока вся информация будет передана. После этого РГС возвращается системе A .

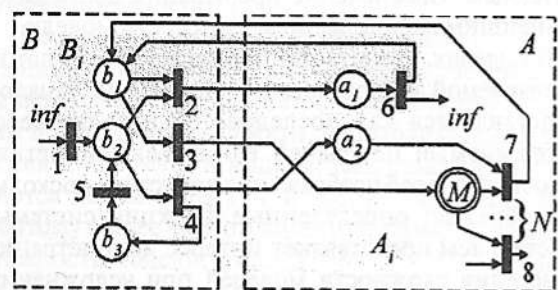


Рис. 2. Модель ИО с выделением РГС по запросу

Схема ИО, представленная на рис. 2 (4-й вариант), напоминает вариант на рис. 1 в. Различие состоит в распределении активности при реализации процедуры ИО. Согласно схеме (рис. 2) РГС выделяется по запросам передающей стороны. При этом, как и в 3-м варианте (рис. 1 в), канал удерживается до завершения передачи всей информации.

Переходы 2, 3 и 4 приоритетно упорядочены. Если канал ранее не был выделен (метка в b_1 отсутствует), то при появлении информации в передающей системе (место b_2 заряжается через переход 1) срабатывает переход 4 и метка поступает в a_2 . Это интерпретируется как запрос на выделение канала. Кроме того, через 2 цикла работы СП состояние b_2 восстанавливается ($4 \rightarrow b_3 \rightarrow 5 \rightarrow b_2$), и запрос повторяется. Состояние a_2 (наличие запроса) не изменяется до тех пор, пока в M появится метка (свободный РГС). В исходном состоянии работы системы (при запуске системы) в M имеется M меток. Если $N > M$, через некоторое время возможна ситуация занятости M каналов из N (отсутствие свободного РГС). При появлении метки в M (высвобождении РГС), срабатывает переход 7 и в b_1 поступает метка, обозначающая выделение канала. При этом запрос реализован и порция информации проходит по каналу ($b_2 \rightarrow 2 \rightarrow a_1 \rightarrow 6$). Переданная информация квитируется ($6 \rightarrow b_1$), что подтверждает готовность канала (выделенность РГС). Передается следующая порция информации. Если информация передана вся (метка в b_2 отсутствует), РГС возвращается ($b_1 \rightarrow 3 \rightarrow M$). Таким образом, представленной схемой также реализуется централизация РГС (на рис. 2 переходами 7 и 8, показано подключение места M к N информационным каналам) и захват канала до полной передачи информации по нему.

Для 3-го и 4-го вариантов (рис. 1 в и 2) конкуренция между каналами при $N > M$ регулируется приоритетностью, устанавливаемой порядком опроса каналов. Соответствующие механизмы на рисунках не показаны. Метки в модели не различаются, хотя и несут разную смысловую нагрузку в зависимости от контекста. Таким образом, при данном уровне детализации отображается только аспект функционирования системы, что является ограничением модели. Ограничением представленных схем является также отсутствие процедуры прерывания менее приоритетного канала более приоритетным. Обеспечение прерываний достижимо дальнейшим наращиванием сложности модели.

В моделях, представленных на рис. 1 и 2, поток передаваемой информации в каждом из каналов представляется как последовательный процесс, изображаемый передачей единственной метки. Подобный способ изображения допустим, поскольку отображает определенные функции системы. Вместе с тем представляет интерес демонстрация нарастания сложности моделей при усложнении процесса передачи информации, то есть при увеличении числа обратных связей. На рис. 3 и 4 представлена линия более сложных моделей: с m -шинным каналом передачи информации. Модели на рис. 3 а, б и рис. 4 а, б являются аналогами моделей на рис. 1 а, б, в и рис. 2 соответственно. Проведем детальное сопоставление.

Модель ИО без обратных связей в m -шинном варианте (рис. 3 а) структурно полностью анало-

гична одноштинному варианту (рис. 1 а). В остальных моделях имеется следующее структурное отличие: введены три линейки мест (c_1-c_m, d_1-d_m и e_1-e_m) и две линейки переходов (i_1, i_2) для управления процессом передачи информации. В остальных преимущественно моделей второй линии сохранена, в том числе и в системе обозначений. Работа моделей второй линии аналогична работе моделей первой линии. Детально рассмотрим работу на примере самой сложной из моделей (рис. 4б).

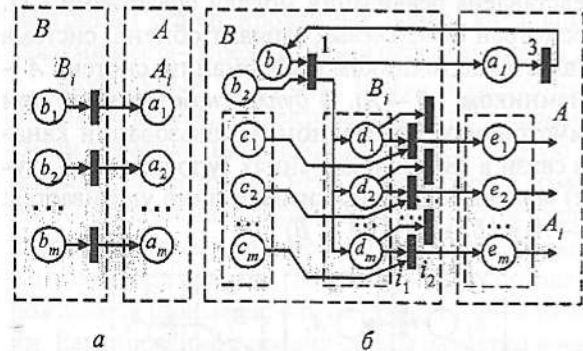


Рис. 3. Модели m -шинного ИО без обратной связи (а) и с одной обратной связью (б)

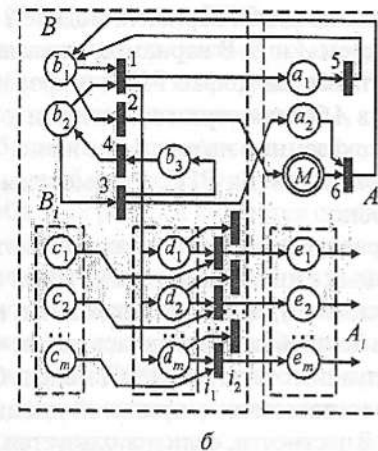
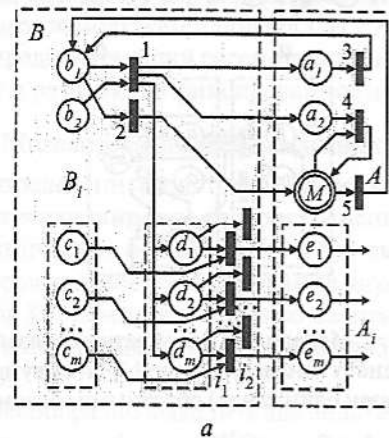


Рис. 4. Модели m -шинного ИО с двумя обратными связями и с инициацией обмена приемной (а) и передающей (б) сторонами

На вход канала ИО подается передаваемая информация (линейка мест c_1-c_m) и управляющий

(сигнальный) бит b_2 . Наличие метки в месте b_2 является признаком наличия информации в регистре c_1-c_m . Комбинация меток в c_1-c_m является передаваемой информацией, которая может интерпретироваться, в частности, как число в двоичной системе счисления. Работа подсети СП, включающей места b_1, b_2, b_3, a_1, a_2 и переходы 1-6, аналогична показанной на рис. 2. При наличии метки в b_1 (РГС выделен) срабатывает переход 1. При этом выдается метка на a_1 (для выдачи квитанции) и на линейку мест d_1-d_m . Линейка переходов i_1 имеет более высокий приоритет, чем i_2 , поэтому сначала срабатывают те из переходов в i_1 , которым соответствуют метки в c_1-c_m , а затем оставшиеся в d_1-d_m метки сбрасываются в переходы i_2 . В итоге содержимое c_1-c_m поступит в e_1-e_m , а линейка d_1-d_m будет подготовлена (очищена) для последующей работы. Дальнейшее прохождение информации из e_1-e_m , как и предшествующее поступление информации в c_1-c_m , рассматриваемыми схемами не иллюстрируется.

Следует особо отметить, что с введением линеек мест и переходов для m -шинного параллельного перемещения информации число тактов функционирования управляющих частей моделей не изменилась. Этим косвенно подтверждается функциональная репрезентативность моделей первой линии.

3. Стековая структура

Модели, представленные на рис. 1-4, реализованы на СП с приоритетами и правилом поглощения меток [4], за исключением мест M (обозначены двойными кружками), в которых может находиться до M меток, изображающих РГС. Место M представляет собой пул для накопления и хранения текущих освободившихся ресурсов РГС. Для простоты в нашей системе обозначений число меток, изображающих РГС, совпадает с обозначением пула для их хранения.

Для сравнения оценок сложности моделей было бы удобно, чтобы вся модель была построена из *одинаковых* элементов СП. Включение элементов, реализующих иные принципы, осложняет оценку сложности и сравнение оценок. В связи с этим представляет интерес реализация пула M также средствами СП с приоритетами и правилом поглощения меток. На рис. 5 показан один из возможных вариантов. Пул M представлен в виде стека при значениях параметров $N=3, M=2$. Места q_1, q_2, q_3 и переходы 1, 2, 3 являются входами стека, места $l_1, l_2, l_3, k_1, k_2, k_3$ и переходы 5, 6, 7 — его выходами. Элементы, реализующие входы и выходы стека, тождественны соответствующим элементам модели, предназначенным для подачи либо изъятия меток из пула M . Например для модели, показанной на рис. 4 а, справедливо следующее: $q_1 \equiv b_1$; переход 1 (рис. 5) тождественен переходу 2 (рис. 4 а); $l_1 \equiv a_2$; переход 5 (рис. 5) тождественен переходу 4 (рис. 4 а); k_1 отсутствует, его функции выполняет непосредственно пул M . Собственно стеком является звено, выделенное на

рис. 5 пунктирной рамкой (места g_1, g_2, h_1, h_2 и переход 4). Число входов и выходов стека наращивается параллельным подключением мест q, l, k и соответствующих переходов. Длина стека наращивается парами g, h с подключением каждой пары через один переход, аналогично выделенному звену (рис. 5).

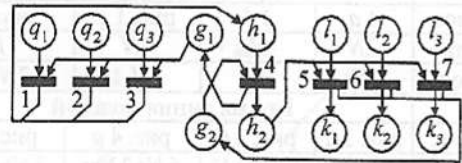


Рис. 5. Стековая структура взамен места M в моделях ИО

Работа стека. Метки поступают в вершину стека h_1 через входы и выдаются из основания стека h_2 через выходы. Стек, в силу своей структуры, стремится к *нормализованному состоянию*. Это значит, что, находясь внутри стека, метки перемещаются, стремясь занять положения, ближайšie к основанию. Для этого места стека q и h имеют самый высокий приоритет в модели. Вследствие приоритета стека всякий раз при поступлении метки в вершину либо удалении её из основания, сначала происходит его нормализация. В стеке места упорядочены попарно (q, h) для отображения состояния наличия-отсутствия РГС в i -м слое стека, согласно схеме:

Комбинации ($q_i=1, h_i=1$) и ($q_i=0, h_i=0$) являются недопустимыми и при корректной начальной разметке модели исключены логикой работы стека.

$$\begin{aligned} q_i=1; \quad h_i=0; & \text{— ресурса нет;} \\ q_i=0; \quad h_i=1; & \text{— ресурса есть.} \end{aligned}$$

4. Оценка сложности систем

Все рассмотренные модели ИО систем (рис. 1-4) с пулом РГО, реализованным в варианте стека, показанном на рис. 5, и верифицированы с использованием программного обеспечения, аналогичного описанному в [4].

На основе представленных моделей сделаем оценки роста сложности реализации систем с повышением уровня их организации. Оценку проводим по числу ячеек памяти, необходимых для хранения информации модели. Как отмечалось, требуются два вектора P, T и две матрицы M_{PT}, M_{TP} . Поэтому общее число элементов, характеризующее сложность модели, будет $S = P + T + 2PT$. Модели на рис. 4 а и б имеют максимальную ресурсоемкость реализации при максимальном объеме стека, то есть при $M=N$. Этот случай является наиболее целесообразным для проведения оценок. С его учетом исходные данные для оценивания представлены в табл. 1.

Ресурсоемкость моделей S (объемы памяти, требуемые для реализации) растет по *каждому* из параметров N и m по квадратичному закону. Как результат, для моделей первого ряда имеет место квад-

ратичный рост сложности, а для моделей второго ряда при совместном росте двух параметров — рост в соответствии с полиномом 4-й степени.

Таблица 1
Ресурсоемкость реализации моделей ИО.
Исходные данные

Первая линия моделей				
Рисунок	1 а	1 б	рис. 1 в	рис. 2
Места	$2N$	$4N$	$7N$	$7N$
Переходы	N	$2N$	$6N-1$	$7N-1$
Вторая линия моделей				
Рисунок	рис. 3 а	рис. 3 б	рис. 4 а	рис. 4 б
Места	$2Nm$	$3N(m+1)$	$6N+3Nm$	$7N+3Nm$
Переходы	Nm	$2N(m+1)$	$6N+3Nm-1$	$7N+3Nm-1$

Иначе выглядит рост S с повышением сложности структурной организации. На основе построенных моделей эту зависимость можно проследить только по четырем точкам. Дальнейшее исследование требует построения новых моделей для структурно более сложных случаев. На графиках (рис. 6) представлены некоторые результаты. По оси абсцисс в условных (нечетко обусловленных) единицах представлена структурная сложность K модели, аналогично рассмотренному в [2]: 1 — отсутствие обратных связей; 2 — одна обратная связь: подтверждение готовности; 3 — две обратные связи: наличие информации и выделение РГС; 4 — прямая и обратная связь: запрос РГС и выдача РГС. Ось ординат отображает ресурсоемкость S реализации модели. Из четырёх семейств графиков первое (рис. 6 а) относится к моделям первой линии, остальные — к моделям второй линии. В каждом из семейств графики построены для множества значений N : {2, 4, 6, 8, 10}. Упорядоченность графиков совпадает с возрастанием параметра N ; график при $N=10$ максимально удален от оси абсцисс. Графики на рис. 6 б, в и г построены для множества значений m : {8, 16, 32} соответственно.

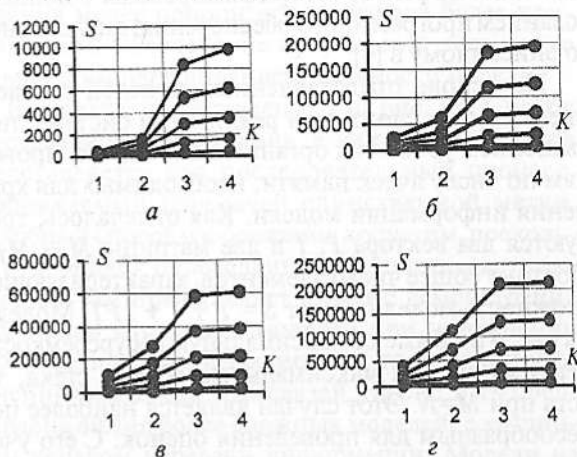


Рис. 6. Рост ресурсоемкости модели с повышением структурной сложности системы

Основываясь на полученных результатах, можно сделать ряд выводов качественного характера. Для обеих линий моделей наблюдается качествен-

ное соответствие зависимостей. Вместе с тем, с ростом N в случае, показанном на рис. 6 а, график просто масштабируется; в остальных случаях — изменяется более сложным образом: «полка» (3, 4) масштабируется «замедленно» в сравнении с участком (1, 2, 3). Данный эффект закономерен. В моделях второй линии с ростом m «полка» (3, 4) «линеаризуется» за счет преобладающего расходования ресурсов модели на создание шин.

С ростом m темп нарастания, вызванный N , «сглаживается». Графики на рис. 6 г расположены с «более равномерным шагом», чем на рис. 6 а. Последнее закономерно, поскольку в пределах одного канала рост ресурсов модели с увеличением числа шин m — линейный. При соизмеримых значениях N и m (рис. 6 а и б, верхние графики) общие тенденции поведения графиков (в пределах пучка) — «сближаются».

Наконец, наиболее общий вывод. Участки (1, 2) и (2, 3) соответствуют увеличению количества структурных связей; участок (3, 4) — изменению характера и функций связей без изменения их количества. Таким образом, ресурсоемкость модели, а следовательно, и сложность моделируемой системы, радикально нарастает с ростом числа структурных связей. Функциональная реструктуризация при сохранении прежнего числа структурных связей существенно менее сказывается на ресурсоемкости системы. Последний тезис возможно требует более широкого осмысления. Материал может представить интерес не только в связи с разработкой ТС, но и в контексте реструктуризации экономических и административно-управленческих систем.

Заключение

Исследован рост сложности систем, реализующих информационный обмен при ограниченном ресурсе готовности. Исследование проведено на моделях с использованием аппарата сетей Петри. Разработанные принципы моделирования и иерархические линии моделей отличаются простотой и прозрачностью в сравнении с моделированием на языках высокого уровня. Практическая ценность полученных результатов предположительно выходит за рамки чисто технических приложений. Результаты могут быть переосмыслены в контексте реструктуризации экономических и административных управленческих систем.

Список литературы: 1. Литинецкий И.Б. Бионика. В кн. Энциклопедия кибернетики. Т. 1. К.: УРЭ, 1973. С. 166-168. 2. Альхалайбех Айман, Михаль О.Ф., Руденко О.Г. Звено «техническая система — человек оператор», как модель информационного взаимодействия интеллектуальных подсистем с разной производительностью // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. № 6 (6). 2003. С. 18-21. 3. Котов В.Е. Сети Петри. М.: Наука, 1984. 158 с. 4. Михаль О.Ф., Руденко О.Г. Моделирование на сетях Петри виртуального вычислительного устройства для исследования эффективности локально-параллельных алгоритмов // Управляющие системы и машины. 2003. №3. С. 18-28.

Поступила в редколлегию 28.10.2004