

## СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Головкин, В.А. Нейроинтеллект: теория и применение. Книга 1: Организация и обучение нейронных сетей с прямыми и обратными связями. - Брест: БПИ, 1999.

2. Оленев, Н.Н. Основы параллельного программирования в системе MPI. - М.: ВЦ РАН, 2005.

Материал поступил в редакцию 25.09.2008

## SAVITSKY Yu.V. The comparative analysis of power of neural network training algorithms parallel schemes

In this article the results of power of parallel neural network training algorithms are considered. The parallel schemes are made as program system based on the MPI (Message Passing Interface) protocol. The computational experiments of time dependence from number of neurons, number of training patterns are discussed. The analysis of parallel algorithms time complexity with MPI message passing and without MPI message passing is given.

УДК 519.876.5: 544.77.023.5

Дереченник А.С., Дереченник С.С.

## ОСОБЕННОСТИ ПЕРКОЛЯЦИИ В НЕРЕГУЛЯРНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СТРУКТУРАХ

**Введение.** Важные прикладные свойства композиционных материалов (композитов) – влаго- и газопроницаемость – обусловлены особенностями структуры их капиллярно-пористого пространства, которая является в существенной степени неупорядоченной. Общая ситуация, связанная со случайным распространением жидкости через среду, когда термины «жидкость» и «среда» интерпретируются в соответствии с физическим смыслом задачи, рассматривается теорией протекания, или перколяции [1, 2]. Применительно к исследованию влагопроницаемости композитов, жидкостью, очевидно, является вода, а под средой понимается дисперсная структура, т.е. система с порами в качестве частиц дисперсной фазы.

Важнейшим понятием теории протекания является порог перколяции – значение критической концентрации, например, пористой фазы, при которой система становится проницаемой для жидкости.

Наиболее известные задачи перколяции на регулярных (квадратных, треугольных, кубических и т.п.) решетках исследованы достаточно полно, для них доказан ряд строгих утверждений и соотношений, поэтому на сегодняшний день такие задачи представляют интерес лишь с теоретической точки зрения. Поскольку в реальном материале поры разновелики и случайно размещены в объеме, структура его порового пространства однозначно нерегулярна и не может быть адекватно представлена на регулярных решетках. Закономерности же протекания в нерегулярных (неупорядоченных, полидисперсных) структурах до настоящего времени остаются малоизученными.

В настоящей работе предложена методика идентификации перколяционных кластеров, а также исследованы некоторые особенности перколяции в нерегулярных дисперсных структурах, являющихся моделями порового пространства композиционных материалов.

**Методика идентификации перколяционных кластеров в нерегулярной структуре.** Для анализа используются неупорядоченные многочастичные моно- и полидисперсные системы, синтезированные по разработанному ранее алгоритму и представленные в виде стохастической матрицы связности элементов структуры [3]. Исходная структура, в двумерной модельной области (контейнере квадратной формы) представляет собой случайную упаковку  $n$  частиц в виде круглых дисков одинакового или различного размера. Кластером считается такая группа частиц, в которой для каждой частицы можно было бы найти хотя бы одну, контактирующую с ней и также принадлежащую группе. Определение частиц или стенок контейнера, контактирующих с любой заданной частицей, выполняется по матрице связности и сводится к поиску единичных элементов матрицы.

Коэффициент плотности упаковки исходной системы достаточно высок (на уровне  $\eta = 0.80$ ), поэтому все частицы принадлежат одному кластеру. Разработанная методика основывается на удалении из исходной структуры некоторого количества частиц, после чего оставшиеся частицы могут образовывать два и более кластеров меньшего размера, вплоть до одиночных (изолированных) частиц.

Процесс идентификации перколяционного кластера включает следующие действия:

- 1) Согласно задаваемой относительной доле  $p$ , определяется количество дисперсных частиц  $m = pn$ , которые будут помечены (окрашены), составляя, таким образом, поровое пространство модельного образца. Если система полидисперсная, заданная доля применяется к частицам каждого типа (размера) в наборе  $n = \sum n_i$ , т.е.  $m = \sum (m_i = pn_i)$ .

- 2) Определяются конкретные частицы, подлежащие окраске. Они могут выбираться случайно и независимо (равновероятно), либо задаваться в соответствии с определенными правилами. Первый вариант моделирует случайное протекание, или перколяцию Бернулли, второй – коррелированную перколяцию (в данной работе исследуется случайная перколяция). Строки и столбцы матрицы связности, соответствующие оставшимся  $(n - m)$  частицам, вычеркиваются из матрицы.

- 3) Выполняется поиск частиц, контактирующих с одной из стенок контейнера (например, левой либо верхней). Найденные частицы составляют множество точек возможной инъекции жидкости. Если множество окажется пустым, то инъекция неосуществима, значит, невозможно и протекание жидкости через образец в данном направлении (слева либо сверху). Следует вернуться к п. 2 для генерации нового варианта окраски частиц.

- 4) Одна из частиц найденного множества определяется как центр инъекции, после чего выполняется поиск частиц, с ним контактирующих, затем – новых частиц, контактирующих с каждой из найденных и т.д. Каждая найденная частица присоединяется к растущему таким образом кластеру (например, перекрашивается в новый цвет). Процесс продолжается до тех пор, пока возможно присоединение к кластеру еще хотя бы одной новой частицы. Если после этого хотя бы одна из перекрашенных частиц контактирует с правой (либо нижней) стенкой, кластер идентифицируется как перколяционный, т.к. возможно протекание жидкости через область моделирования слева направо (либо сверху вниз). Примеры таких кластеров представлены на рисунке 1. В противном случае найденный кластер считается кластером конечного размера, а п. 4 повторяется для другого центра инъекции. Если ни для одной из частиц – центров инъекции перколяционный кластер не получен, выполняется генерация нового варианта окраски согласно п. 2.

Предложенная методика применена и к менее плотным, в том числе разреженным структурам, в которых большинство частиц не находятся в непосредственном контакте друг с другом (например, сравнительно крупные поры некоторого материала могут соединяться небольшими капиллярными каналами). При формировании матрицы связности такой структуры задается максимальное расстояние, при котором частицы еще считаются связными.

Дереченник Станислав Станиславович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «ЭВМ и системы» Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Физика, математика, информатика

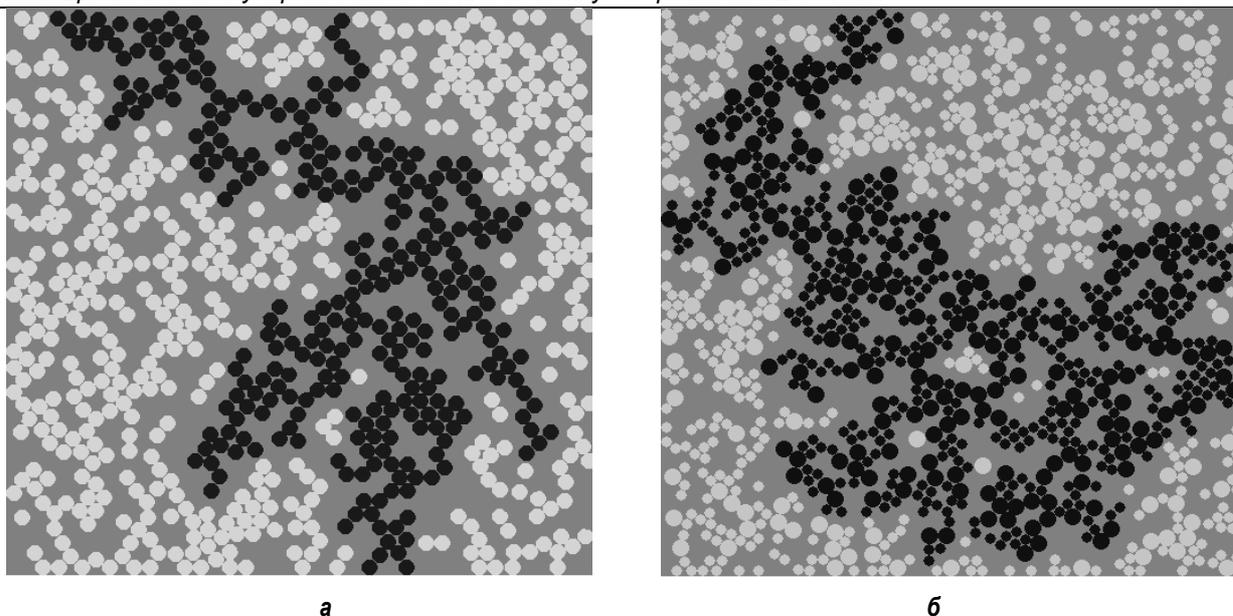


Рис. 1. Перколяционные кластеры (частицы черного цвета) в случайных структурах: монодисперсной из 774 частиц (а), бидисперсной из 1092 частиц (б)

**Перколяция в нерегулярных дисперсных структурах.** В известных исследованиях перколяции в регулярных структурах, в которых поры занимают долю  $p$  всех узлов решетки, вероятность протекания  $P_\infty(p)$  определяется как вероятность того, что жидкость, инжектированная в каком-то случайно выбранном узле, протекает в бесконечно большое число других пор. На практике рассматриваются конечные системы, состоящие из  $N$  узлов (для квадратных решеток  $L \times L$  в евклидовом пространстве  $N = L^2$ ). При численном моделировании определяется число пор  $M(L)$ , принадлежащих наибольшему кластеру, и оценивается вероятность протекания в конечной системе:  $P_N(p) = \langle M(L) \rangle / L^2$  (размер наибольшего кластера усредняется по результатам многих численных экспериментов). Вероятность протекания в бесконечной системе определяется выражением  $P_\infty(p) = \lim_{N \rightarrow \infty} P_N(p)$ , а критическая вероятность, или порог протекания  $p_c$  – как наибольшее значение доли  $p$ , при котором  $P_\infty = 0$ . Отмечается также, что вероятность иметь пору в случайно выбранном узле инъекции также равна  $p$ . Поэтому вероятность протекания, если инжектировать жидкость в пору, о которой известно, что она принадлежит кластеру, составит  $P_\infty(p)/p$  [2].

Приведенная выше методика не предусматривает определения размера кластеров, образующихся в случайной структуре, но позволяет непосредственно фиксировать факт протекания в конечной системе из  $n$  узлов нерегулярной системы (решетки),  $m = pn$  из которых являются порами. Поскольку жидкость инжектируется в одну из выбранных пор, возможна оценка вероятности протекания  $P_n(p)/p$  как наблюдаемой частоты наступления протекания, которая определяется статистически – отношением числа успешных идентификаций перколяционного кластера к общему количеству попыток.

Для исследования монодисперсных систем вычислительные эксперименты проводилась в серии из 50 исходных моделей, представляющих собой случайные структуры – упаковки из 1350...1400 частиц в контейнере квадратной формы. Доля порового пространства в каждой структуре варьировалась в диапазоне  $p = 0.5 \dots 0.8$  с шагом 0.01, каждый раз при этом генерирова-

лось 40 вариантов раскраски. Найденная зависимость для оценки вероятности протекания приведена на рисунке 2.

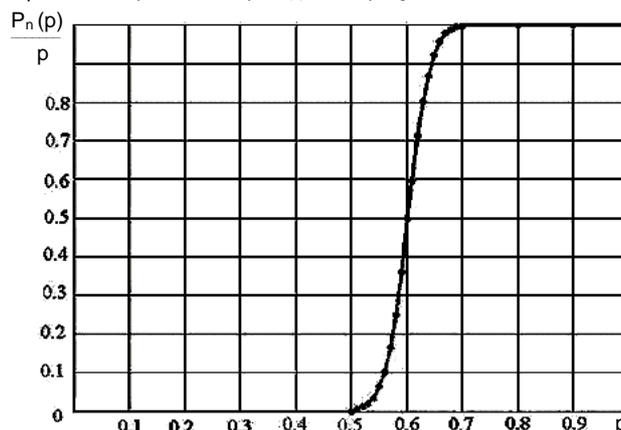


Рис. 2. Оценка вероятности наступления перколяции в монодисперсной системе как функция относительной доли порового пространства

Полидисперсные системы исследовались в варианте формирования исходных упаковок из бидисперсной фазы, включающей  $n_1$  частиц радиуса  $R_1$  и  $n_2 = n - n_1$  частиц радиуса  $R_2 \leq R_1$ . Серии вычислительные экспериментов организовывались аналогично. Дополнительно варьировались: соотношение  $k_1 = R_1/R_2$  размеров частиц и доля  $k_2 = n_1/n$  больших частиц. В зависимости от величин  $k_1, k_2$ , исходные системы содержали 1200...3100 частиц. Пример зависимостей для оценки вероятности протекания в случайной бидисперсной структуре при  $k_1 = 2$  и различных значениях  $k_2$  представлен на рисунке 3.

Установленные зависимости позволяют заключить, что вероятность протекания  $P_n(p)/p$  возрастает, в диапазоне значений доли порового пространства  $p = 0.55 \dots 0.65$ , достаточно плавно, т.е. перколяционный переход, в сравнении с протеканием на регулярных решетках, является значительно менее выраженным.

Понятие порога перколяции при этом необходимо обусловить фиксированным значением вероятности наступления протекания. Исходя из сущности в данном исследовании методики, логично зафиксировать 50%-ную вероятность протекания, тогда величина  $p^* = p_{0,5} = 0.605 \pm 0.005$  будет являться топологической характеристикой протекания в плоской неупорядоченной монодисперсной структуре. Для бидисперсных систем значение  $p^*$  зависит от состава дисперсной фазы, как представлено на рисунке 5, и в целом существенно выше.

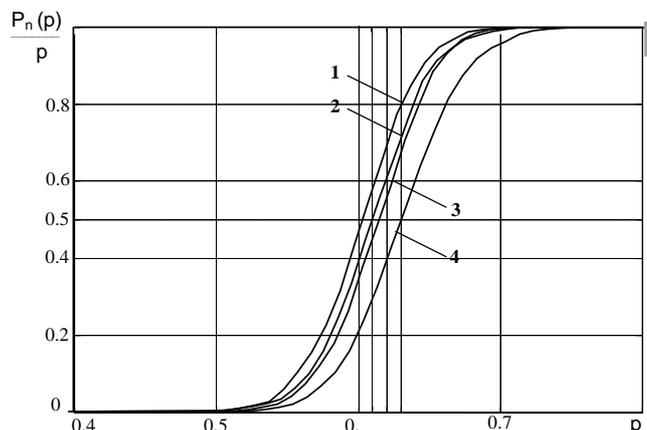


Рис. 3. Оценка вероятности наступления перколяции в бидисперсной системе как функция относительной доли порового пространства, при соотношении размера частиц 2:1 и доле больших частиц: 1 – 90%, 2 – 70%, 3 – 10%, 4 – 30%

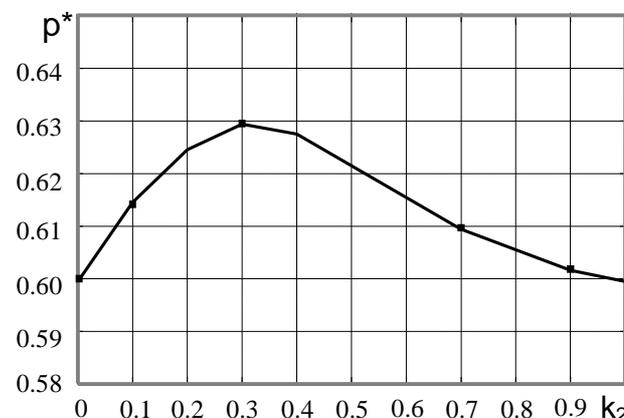
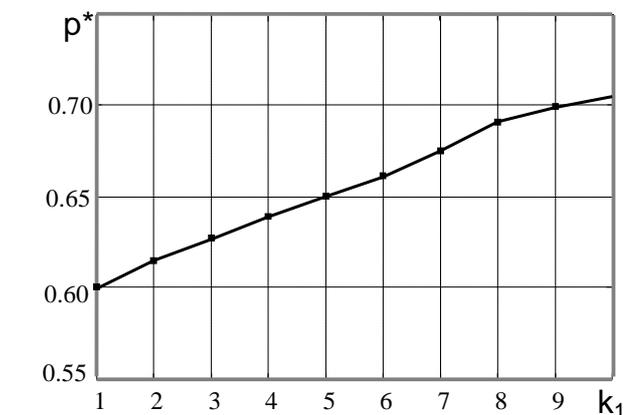


Рис. 4. Зависимости порога перколяции от соотношения размеров больших и малых частиц (а) и от относительного количества больших частиц в системе (б)

**Обсуждение результатов и выводы.** Нестрогое сравнение результатов оценки порога протекания  $p^*$ , полученных для нерегулярных структур, с известными порогами перколяции  $p_c$  плоских регулярных решеток (0.50 – треугольной, 0.5927 – квадратной), показывает заметное различие, в особенности для полидисперсных систем. Кроме того, как указано выше, перколяционный переход в нерегулярных структурах менее резкий.

Представляется, что обнаруженные особенности протекания обусловлены, в наиболее значительной степени, распределением координационного числа в случайных структурах. Полигоны распределения координационного числа  $f$  для исходных упаковок моно и бидисперсных систем представлены на рисунке 6.

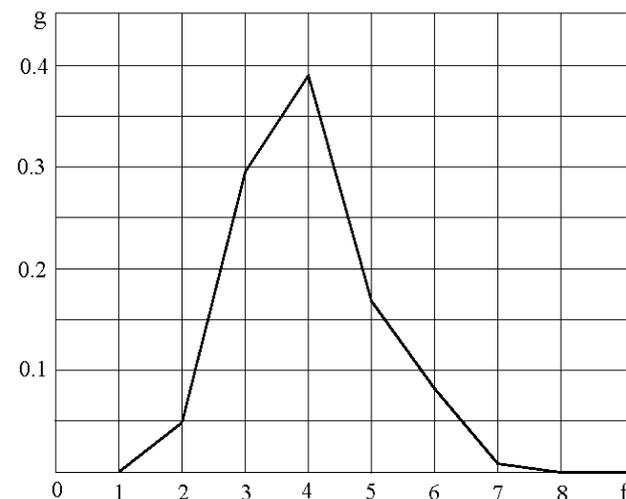
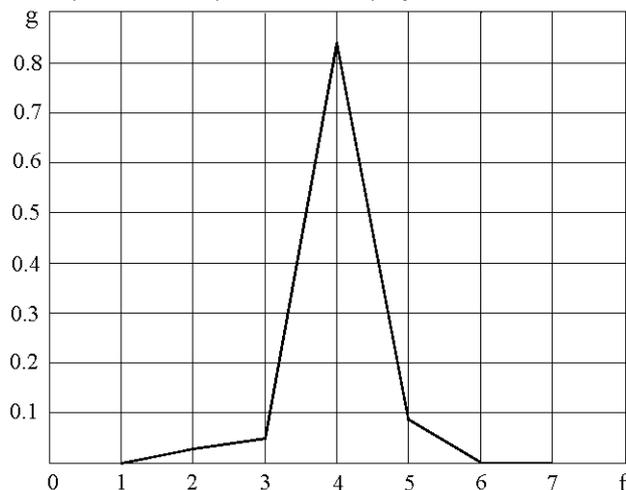


Рис. 5. Распределение координационного числа в плоских упаковках с коэффициентом плотности 0.80: монодисперсной (а); бидисперсной с соотношением размера частиц 2:1 и доле больших частиц 30% (б)

Уширение распределения координационного числа структуры может быть непосредственно связано с изменением характера наступления перколяции. Так, наличие заметной доли частиц с координационным числом выше среднего (уширение распределения вправо) вызовет более частые случаи наступления протекания при меньшей концентрации поровых частиц. Напротив, вхождение в перколяционный кластер частиц с малым координационным числом, даже при большой их концентрации, маловероятно. В первом случае перколяционный переход «размывается» влево, а во втором – вправо от значения  $p^*$ , что в целом делает его более пологим. При этом среднее значение координационного числа, по-видимому,

находится в обратной зависимости с оценочной величиной порога  $\rho^*$ .

Экстремальный характер зависимости оценки  $\rho^*$  порога перколяции от состава частиц бидисперсной фазы (см. рис. 5 б) свидетельствует о фрактальном характере явления протекания, который отмечается и в регулярных структурах, но в случайной нерегулярной структуре является более выраженным – возможно, вплоть до мультифрактального [2].

В ходе дальнейших, более детальных исследований возможно установление строгих закономерностей, развивающих обнаруженные и представленные в данной работе особенности перколяции в случайных нерегулярных структурах. Результаты могут иметь разнородное практическое применение в материаловедении пористых композитов. Так, важной прикладной задачей является исследование поглощения влаги цементным камнем [4]. Аналогично, распределение влаги в объеме силикагеля существенно влияет на эффек-

тивность специальных средств защиты от электромагнитных излучений [5].

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тарасевич, Ю.Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы / Ю.Ю. Тарасевич. – М.: Наука, 2002. – 112 с.
2. Федер, Е. Фракталы / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. – 262 с.
3. Дереченник, А.С. Стохастическая модель многочастичной неупорядоченной системы для исследования топологических свойств дисперсных структур / А.С. Дереченник // Вестник БрГТУ. Физика, математика, информатика, 2008.
4. Bentz, D.P. Protected paste volume in concrete: extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate / D.P. Bentz, K.A. Snyder // Cement and Concrete Research. – 1999. – Vol. 29, № 11. – P. 1863-1867.
5. Богуш, В.А. Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты / В.А. Богуш [и др.]; под ред. Л.М. Лынькова. – Минск: Бестпринт, 2003. – 406 с.

Материал поступил в редакцию 20.11.2008

#### DERECHENNIK A.S., DERECHENNIK S.S. The distinctive features of percolation in the non-regular dispersed structures

New characterization technique for percolation clusters in the non-regular structures is proposed, based on the stochastic connectivity matrixes definition. Using numerical simulation the distinctive features of percolation in the non-regular mono- and bi-dispersed plain structures are investigated. The percolation transition type in such structures and its correlation with system coordination number distribution are analyzed. An estimate is made for the threshold pore density value of the percolation starting point.

УДК 681.3

Мухов С.В., Муравьев Г.Л.

## ОРГАНИЗАЦИЯ БИБЛИОТЕКИ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ СИГНАЛОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЕКТОВ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ

**Введение.** При проектировании сложных технических систем с большим числом элементов, типов элементов, взаимным влиянием узлов и процессов, наличием управления, к числу которых относятся и цифровые устройства (ЦУ), обязательным этапом является моделирование, требующее эффективных средств. Моделирование проектов ЦУ с учетом временных задержек, разрабатываемых, например, с использованием специализированных языков спецификации верхнего уровня, таких как HDL, VERILOG-HDL, VHDL [1-5], сводится к имитации преобразования в соответствии с логикой функционирования проекта ЦУ входной информации, представленной сигналами, в выходные сигналы.

В работе рассматривается подход к организации информационного обеспечения моделирования применительно к языку VHDL (стандарты в области автоматизации проектирования VHDL'93 - ANSI/IEEE Std 1076-1993 и VHDL-AMS - Std 1076.1-1999). Исходными данными служат: входные воздействия, имитирующие реальное окружение ЦУ, выходные и эталонные реакции ЦУ, интерфейсы проектов и пакеты заказчика, описывающие пользовательские типы сигналов.

**Требования к описанию сигналов.** В VHDL сигналы наряду переменными относятся к категории объектов данных (object ::= constant | signal | ... variable), используются в структурном, потоковом, поведенческом стилях описания моделей. Это входные, выходные, входные-выходные сигналы, представленные значениями любых типов и соответствующим образом декларированные в заголовке проекта (путем объявления портов проекта - физических входов-выходов проекта, обеспечивающих каналы динамической связи с внешней средой) как `interface_signal_declaration ::= [signal] signal_identifier: [mode] type [bus] [= expression];` и внутренние сигналы, декларированные в теле архитектуры проекта как `signal_declaration ::= signal signal_identifier : type [signal_kind] [= expression];`

Здесь `mode ::= IN | OUT | INOUT`, `signal_kind ::= register | bus`.

С каждым сигналом связан формирователь (драйвер), отображающий характер изменения сигнала во времени и являющийся источником его значений. Это структура данных, хранящая упорядоченные во времени списки прошлых и будущих значений сигналов. Формирователи сигналов составляют информационную базу модели и являются основой организации и ведения списков событий при моделировании.

Это требует эффективного хранения и обработки значений формирователей до начала моделирования (для подготовки входных воздействий, включая тестовые входные и эталонные выходные), в его процессе (чтение, анализ, изменение, сохранение значений) и после завершения. При моделировании реальных проектов, отличающихся иерархичностью моделей, организация формирователей должна производиться с учетом их привязки к проектам, портам, версиям архитектурной реализации, требований атрибутивной арифметики и набором типов, допустимых синтаксисом и семантикой VHDL, а также с учетом поддержки статического и динамического способов представления входных воздействий [6-9].

**Логическая структура библиотеки.** Структурно библиотека включает следующие разделы: 1. Логическое оглавление верхнего уровня с ключевым полем - описание тестовых наборов данных проекта (ТНД). Представляет собой лексикографический перечень имен проектов, соответствующих им имен описаний структур тестовых наборов данных (СТНД) и списков имен самих тестовых наборов данных (в отношении "один к многим"). Для хранения списка наборов данных в библиотеке используются либо структуры операционной среды (каталоги) с их буферизацией в рабочей области, либо предварительно размеченные последовательные наборы данных, поддерживающие эту матричную структуру. Здесь идентификация наборов данных осуществляется с использованием префиксации и обеспечивается иерархическое упорядочивание объектов. 2. Библиотеку описаний СТНД (как в логическом так и в машинном форматах) для статического (СТНДС) и динамического способов представления зна-