УДК 681.306:681.142.2

# МЕТОД СТАТИСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ХАРАКТЕРИСТИК ОСУЩЕСТВИМОСТИ

В.А.Воробьев, В.В.Корнеев

Изложен подход, позволяющий использовать априорные сведения о системе для экономичной организации статистического моделирования. Дан набор Л-операторов второго уровня Р-ЛЯПАСа, в совокупности образующих наращиваемый язык описания эксперимента на программной модели системы.

## I. Замечания о моделировании систем

I.I. При исследовании и разработке сложных систем аналитические методы оказываются либо трудно применимыми, либо вообще не применимыми из-за размерностей возникающих при этом задач. В таких случаях обычно применяется метод статистического моделирования систем [I] на электронных вычислительных машинах (ЭВМ). Недостатком метода моделирования является его большая трудоемкость. Это следует, во-первых, из необходимости описания и отладки программных моделей для различных вариантов систем, во-вторых, из необозримости результатов моделирования, полученных для различных частных случаев, в-третьих, из необходимости больших затрат машинного времени.

Кроме того, аналитические методы исследования имеют ряд дополнительных важных свойств, которые чаще всего отсутствуют у программных моделей:

а) в пределах единой аналитической модели рассматривается широкий класс систем;

б) аналитическая модель дает качественное описание поведения системы;



в) при необходимости аналитическая модель позволяет получить количественные результаты с любой точностью.

Существует возможность так организовать статистическое моделирование, что его применение дает результаты, аналогичные аналитическим. Для этого необходимо:

а) моделировать системы на достаточно абстрактном уровне, что обеспечит изучение широкого класса систем;

б) проводить статистические испытания при разнообразных наборах параметров, описывающих условия функционирования системы;

в) специально организовывать как набор статистических данных, так и выходные результаты;

г) обеспечивать управляемость программной модели, то есть возможность особенно точного исследования конкретных случаев.

Программные модели, удовлетворяющие перечисленным выше требованиям, могут дать хорошие ориентиры для последующих разработок (выделить факторы, влияющие на качество системы, критические значения этих факторов, упорядочить системы по заданному критерию и т.д.). Более того, такие модели можно использовать для эмпирической проверки некоторых гипотез о поведении систем (например, гипотезы Решетняка [2]). Они могут дать соотношения, которые войдут в аналитическую теорию [3].

I.2. Ниже рассматриваются вопросы экономичной организации моделирования однородных вычислительных систем (ОВС). Имеются следующие предпосылки для такой разработки.

I.2.I. <u>Абстрактная модель ОВС.</u> Как показано в [4], функционирование ОВС можно описать в терминах теории осуществимости и теории массового обслуживания. Отличительной особенностью используемых при этом характеристик является их монотонная зависимость от параметров системы, причем характер этой зависимости обычно известен заранее. Эта априорная информация используется ниже для экономичной организации эксперимента.

I.2.2. <u>Растущая моделирующая система Р-ЛЯПАС [5].</u> В настоящей статье предлагается расширение системы, образующее в совокупности с Р-ЛЯПАСом язык описания эксперимента. Сюда входят Л-операторы планирования экспериментов, сбора статистики и генераторы псевдослучайных построений. Большинство результатов моделирования, представленных в [6-8], получено на ЭВМ "Минск-22" с помощью разработанной здесь методики.

## 2. Метод организации статистического эксперимента

2.I. **Условные координаты.** Пусть $X$ – вектор параметров ОВС, а $M$ – множество значений $X$. В большинстве случаев $M$ ограничено конструктивными возможностями. Для оценки проектируемого объекта в процессе моделирования вычисляется некоторая функция качества $F(X)$, которая и служит критерием сравнения и отбора решений. В инженерной практике такие функции обычно выбираются так, что они являются непрерывными, ограниченными на множестве $M$ значений $X$ и монотонными по некоторым аргументам. В дальнейшем будут рассматриваться только такие функции качества, которые монотонны хотя бы по двум переменным.

В процессе табулирования $F(X)$ каждая компонента $x_i \in X$ принимает в интересующей нас области дискретный ряд значений: $x_i^0, x_i^1, \ldots, x_i^{N-1}$, в котором $x_i^{j+1} - x_i^j = \Delta x_i$ – постоянная величина (шаг), где $i \in \{0,1,\ldots, n-1\}$. Таким образом, множество значений $X$, для которых вычисляется $F(X)$, представляет собой $n$ – мерную евклидову решетку.

Значения $x_i^{j_i}$ компонент вектора $X$ в каждой точке решетки назовем **истинными** координатами; а значения $j_i$ (образующие соответственно вектор $J$) – **условными** координатами. Условные координаты элемента решетки во многих отношениях удобнее истинных. Во-первых, они представляют собой целые числа, и, во-вторых, величина шага $\Delta j_i$ принимает значение из множества $\{0, I\}$. Это позволит в дальнейшем употреблять такие величины как в арифметических, так и в логических выражениях. Все дальнейшие построения будут делаться в условных координатах.

2.2. **Планирование эксперимента.** Обычно проектировщик знает, какие значения $F(X)$ являются допустимыми, а при каких проект необходимо забраковать. Как правило, можно найти такие две компоненты $x_i, x_j \in X$, по которым функция $F(X)$ монотонна и известны знаки частных производных. Переменные $x_i$, $x_j$ выделяются, кроме того, из соображений удобства интерпретации результатов моделирования.

Пусть проект при $F(X) \geq C_2$ удовлетворяет исследователя, а при $F(X) < C_1$ бракуется. Поверхность $F(X) = C$, где $C_1 \leq C \leq C_2$,



дает нам полную информацию о допустимом наборе значений $X$. Константы $C_1$ и $C_2$ назовем **нижней** и **верхней** границами, соответственно, а $C_2 - C_1 = \Delta C$ – точностью вычисления $F(X)$ при исследовании. Положим, что выделенные компоненты вектора $X$ есть $x_0$ и $x_1$.

Очевидно, что для проектировщика в первую очередь необходимо знать вид критической поверхности $F(X) = C$. Следовательно, основная экспериментальная работа с моделью системы должна проводиться в окрестности этой поверхности (или их семейства), а не на всем множестве $M$ значений вектора $X$. Таким образом, алгоритм управления экспериментом должен осуществить поиск критической поверхности и перебор вершин решетки $M$, расположенных в её окрестности.

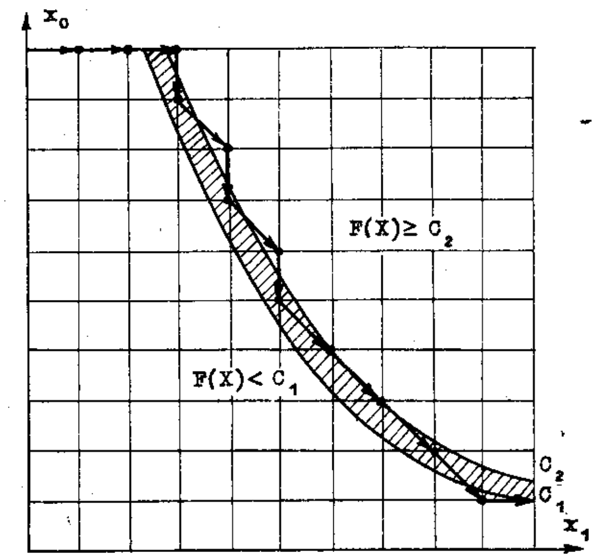


Рис. I

Идея алгоритма управления экспериментом ясна из рис. I, где изображена трасса перебора узлов решетки на некотором сечении искомой критической поверхности.

Априорные сведения о частных производных $F(X)$ зададим **вектором знаков производных**:

$$\delta = \{\delta_i\},\ i = \overline{1,n}; \quad \delta_i = \begin{cases} 0, & \text{если } \dfrac{\partial F}{\partial x_i} \geq 0, \\ 1, & \text{если } \dfrac{\partial F}{\partial x_i} < 0. \end{cases}$$

Введем **вектор оценки** $\zeta = \{\zeta_0, \zeta_1\}$, задаваемый следующей таблицей:

| $F(X)$ | $F(X) < C_1$ | $C_1 \leq F(X) \leq C_2$ | $F(X) > C_2$ |
|---|---|---|---|
| $\zeta_0$ | 0 | 1 | 0 |
| $\zeta_1$ | 0 | 0 | 1 |

Вектор оценки $\zeta$ фиксирует существенную для управления экспериментом информацию о результатах испытаний модели в очередной точке решетки $M$.

Из монотонности $F(X)$ по $x_0$ и $x_1$ следует, что при соответствующем выборе начальной точки поиска приращения условных координат $\Delta j_0$ и $\Delta j_1$ могут иметь постоянные знаки на протяжении всего перебора у поверхности $F(X) = C$. Пусть

$$\delta_{ij} = sgn\, \frac{\partial x_i}{\partial x_j} = \overline{\delta_i \oplus \delta_j}.$$

Будем полагать, что направление перебора по оси $i = 1$ всегда положительно: $\varphi_1 = sgn\,(\Delta j_1) = 0$. Тогда $\varphi_0 = sgn\,(\Delta j_0) = \varphi_1 \oplus \delta_{01}$, а координаты начальной точки поиска есть вектор

$$Y_0 = \{(N_0 - 1)\varphi_0,\ 0, 0, \ldots, 0\}.$$

Задача выбора очередного узла решетки в сечении по результату предыдущего эксперимента (вектор $\zeta$) сводится к логической, так как модули $|\Delta j_0|$ и $|\Delta j_1|$ принимают значения из множества $\{0, 1\}$:

$$|\Delta j_0| = \zeta_0 \vee (\zeta_1 \oplus \delta_1),$$

$$|\Delta j_1| = \zeta_0 \vee (\zeta_0 \oplus \bar{\delta}_1).$$

Этот результат легко получить, составляя таблицу значений для $|\Delta j_0|$ и $|\Delta j_1|$, как функций от $\zeta_0, \zeta_1, \delta_0, \delta_1$. Эти



функции, очевидно, булевские, а предлагаемые формулы есть их минимальные формы.

2.3. **Возможные функции качества.** Пусть $F(X)$ – вероятность некоторого события в исследуемой системе. Среди компонент вектора $X$ в этом случае должны присутствовать параметры распределений некоторых случайных величин. В этом случае $F(X)$ может быть интерпретирована как **локальная осуществимость** ожидаемого события в системе с параметрами $X$.

Введем следующую модификацию этого понятия. Поверхность $F(X) = C$ разбивает множество $M$ значений вектора $X$ на две части $M^+$ и $M^-$, такие, что в одной из них локальная осуществимость $F(X) \geq C$, а в другой $F(X) < C$.

Обозначим через $\sigma(M), \sigma(M^+), \sigma(M^-)$ объемы соответствующих областей евклидовой решетки. Величину

$$\Sigma = \frac{\sigma(M^+)}{\sigma(M)}$$

назовем **интегральной осуществимостью** ожидаемого события. Интегральная осуществимость может быть иначе интерпретирована как частота появления события $F(X) \geq C$ при случайном и равновероятном выборе узлов решетки $M$. При этом $F(X)$ может уже и не быть вероятностью. Величина $\Sigma$ характеризует потенциальные возможности исследуемого объекта в **целом** и в ряде случаев полезна для сравнения вариантов.

В частности, введенные в [6] понятия реальной $m$-коммутируемости ОВС и живучести подсистемы ранга $r$ являются локальными, а потенциальная коммутируемость и добротность структуры – интегральными осуществимостями.

2.4. **Управление точностью моделирования.**

2.4.1. Моделирование предъявляет особые требования к управлению точностью статистического эксперимента. При качественном исследовании объекта можно (и даже необходимо) поступиться точностью в пользу широкого охвата области значений вектора параметров $X$. В случае необходимости та же программа должна быть использована для точной оценки системы в конкретной ситуации. Таким образом, точность должна задаваться как входной параметр программы.

2.4.2. Предложенный выше метод планирования эксперимента позволяет исключительно просто обеспечить необходимую представительность статистики, если $F(X)$ есть локальная осуществимость. В этом случае функция качества может быть определена в процессе статистических испытаний по схеме Бернулли.

При организации эксперимента в окрестности поверхности $F(X)=C$ вероятность $F(X)$ близка к $C$, а точность задается величиной $\Delta C = C_2 - C_1$. Этого достаточно для вычисления длины серии $\gamma$, которая в данном случае фиксирована для всего эксперимента. Согласно интегральной предельной теореме Муавра-Лапласа:

$$C = 2\Phi\left(\Delta C\sqrt{\frac{\gamma}{C(1-C)}}\right),$$

где $\Phi(x)$ – табулированная функция.

2.4.3. В общем случае мера качества может иметь любую природу. В частности, $F(X)$ может быть вектор-функцией. Однако и в этом случае можно выделить некоторые компоненты $F(X)$, обладающие свойствами, полезными для управления экспериментом. Это особенно характерно для моделирования системы параллельных процессов [9], когда в качестве $F(X)$ берется множество величин типа: процент времени простоя аппаратуры, средняя длина очереди и т.п. В процессе накопления статистики эти величины стремятся к некоторым стационарным значениям. Таким образом, эксперимент можно прекратить, если дополнительные испытания не выводят координаты $F(X)$ за пределы заданных окрестностей искомых стационарных величин.

Выделим в системе параллельных процессов с л е д я щ и й п р о ц е с с (обычно нулевой процесс, порождаемый оператором м о д е л ь ). Функция этого процесса – развертывание всех остальных процессов и слежение за накоплением статистики в одном из них через определенный интервал текущего времени модели $\Delta t$. Следящий процесс заканчивает эксперимент, если результат предыдущего вычисления некоторого множества величин совпадает с последующим с заданной точностью.

Очевидно, что в процессе стабилизации исследуемой координаты вектор-функции $F(X)$ получается некоторая реализация переходного режима. Если по достижении стационарных значений модель всякий раз возвращать в исходное состояние, то можно накопить статистику и для переходных режимов системы. Окончание эксперимента организуется аналогично с помощью следящего процесса более высокого уровня. Интервал слежения $\Delta t$ подбирается экспериментально.



### 3. Язык описания эксперимента

Изложенные выше идеи реализованы в наборе Л-операторов 2-го уровня Р-ЛЯПАСа, хранящихся в архиве ПС-Р-ЛЯПАС и образующих постоянно растущий язык описания эксперимента. Ниже дается описание этого языка.

3.1. Прежде всего требуется иметь оператор, организующий полный перебор всех узлов евклидовой решетки $M$. Тривиальный способ организации такого перебора с помощью вложений циклов в циклы не обеспечивает независимости алгоритма от числа координат.

Используя понятие евклидовой нумерации [10], можно получить вектор $\mathcal{Z}$ как представление евклидова номера $\alpha$ узла $n$-мерной решетки в системе счисления с переменным основанием. Если $N_i$ – число шагов по $i$-й координате и основание системы счисления по $i$-му разряду, а $z_i$ – остаток от деления на $N_i$, то $\alpha = N_{n-1}\cdot N_{n-2}\cdot\ldots\cdot N_0 z_{n-1} + \ldots + N_1 N_0 z_1 + N_0 z_1 + z_0$ и $\mathcal{Z} = \{z_i / i \in \mathcal{Z}\}$.

Перебор всех узлов решетки в порядке, заданном евклидовой нумерацией, осуществляет Л-оператор р е ш е т к а $\alpha\beta\gamma\delta\varepsilon\|$. Здесь $\alpha$ – евклидов номер очередного узла; $\beta$ – комплекс чисел $N_i$; $\gamma$ – комплекс условных координат (вектор $\mathcal{Z}$); $\delta$ – общее число вариантов ($\delta = \prod_{i\in\mathcal{Z}} N_i$); $\varepsilon$ – дополнительный выход (метка), реализующийся по окончании перебора.

При обращении в основной вход восстанавливается исходное состояние перебора ($\mathcal{Z} = \{0,\ldots,0\}$) и вычисляется $\delta$. Очередное значение $\mathcal{Z}$ получается по основному выходу из оператора. после обращения в дополнительный входной полюс р е ш е т к а I.

Текст Л-оператора р е ш е т к а:

$$\# \ \underline{101}\ \underline{056}\ \underline{000}\ \underline{004}$$

$$\S\,0\quad \bar{o}\,\alpha\ \bar{o}\,\alpha'\ 1 \Rightarrow \delta \rightarrow 3$$

$$\S\,\mathrm{I}\quad \Delta\alpha \Rightarrow \text{я} \oplus \delta \multimap \varepsilon\ \bar{o}\,\alpha'$$

$$\S\,2\quad \Delta\alpha' \oplus B_\beta \multimap 4\ \text{я} : \beta_{\alpha'} \Rightarrow \gamma_{\alpha'} \rightarrow 2$$

$\S\,3\ \ \Delta\alpha'\oplus B_\beta \multimap 1\ \ \delta\times\beta_{\alpha'} \Rightarrow \delta \to 3$

$\S\,4.$

3.2. Алгоритм (п.2.2.) производит поиск и отслеживание некоторого сечения поверхности $F(X)=C$. Перебор сечений может быть сделан по алгоритму р е ш е т к а. Отслеживание всей поверхности осуществляется Л-оператором п о в е р х н о с т ь $\alpha\beta\gamma\delta\varepsilon\zeta\eta\vartheta\varkappa \|$, который использует р е ш е т к у, как подпрограмму. Здесь $\alpha$ – номер очередного сечения поверхности; $\beta$ – комплекс $\{N_i \mid i\in\mathcal{J}\}$; $\gamma$ – комплекс условных координат $\mathcal{J}$; $\delta$ – вектор знаков производных; $\varepsilon$ – общее число сечений поверхности; $\zeta$ – вектор оценки; $\eta$ – выход после вычисления очередного шага; $\vartheta$, $\varkappa$ – имена рабочих комплексов.

Начальные точки перебора и число сечений вычисляются при обращении в основной вход п о в е р х н о с т и. Основной выход реализуется после окончания перебора. Условные координаты очередного узла получаются на дополнительном выходе $\eta$ после обращения в дополнительный вход п о в е р х н о с т ь I.

Текст Л-оператора п о в е р х н о с т ь :

# IOI 051 000 007

$\S\,0\ \ A_\beta+2\Rightarrow A_\vartheta\ A_\gamma+2\Rightarrow A_\varkappa\ B_\beta-2\Rightarrow B_\vartheta\Rightarrow B_\varkappa$
р е ш е т к а $\alpha\vartheta\varkappa\varepsilon\eta\|\ \bar{o}\ \zeta\Rightarrow\gamma_0\Rightarrow\gamma_1$
$\Vdash\!\to 2 \mapsto 1\ \ \beta_0\Rightarrow\gamma_0$

$\S\,\mathrm{I}\ \ \zeta\wedge C_0\multimap 3 \Vdash\!\to 5\mapsto 4\to$ р е ш е т к а I

$\S\,2\ \ \delta<1\oplus\delta\wedge C_0!$

$\S\,3\ \ \zeta\oplus\delta\wedge C_1\multimap 4\Vdash\!\to 5\mapsto\eta\to$ р е ш е т к а I

$\S\,4\ \ \Delta\gamma_1\oplus\beta_1\mapsto\eta\to$ р е ш е т к а I

$\S\,5\ \ \Vdash\!\to 2\mapsto 8\ \Delta\gamma_0\oplus F_{10}!$

$\S\,6\ \ \Delta\gamma_0\oplus\beta_0!$

$\S\,7.$

Векторы $\delta$ – знаков производных и $\zeta$ – оценки размещаются в левом конце соответствующего ляпасного операнда, причем $\delta$ задается программистом.

3.3. Вектор оценки вычисляется после получения $F(X)$ в очередном узле решетки $M$ с помощью Л-оператора о ц е н к а $\alpha\beta\gamma\delta\|$. Внешние операнды о ц е н к и имеют следующий смысл: $\alpha$ – значение $F(X)$, $\beta$ – нижняя граница $C_1$, $\gamma$ –верхняя граница $C_2$; $\delta$ – вектор оценки ($\zeta$).



Текст Л-оператора о ц е н к а:

# IOI 055 000 002

$\S\,0\ \ O\delta\alpha-\beta\multimap 2\ \gamma-\alpha\multimap 1\ C_0\Rightarrow\delta\to 2$

$\S\,\mathrm{I}\ \ C_1\Rightarrow\delta$

$\S\,2.$

3.4. Возврат к истинным координатам выбранного узла решетки $M$ достигается с помощью Л-оператора в а р и а н т $\alpha\beta\gamma\delta\|$, где $\alpha$ – комплекс истинных координат начальной точки решетки $\{x_i^0 \mid i\in\mathcal{J}\}$ (условные координаты начальной точки $\mathcal{J}=\{0,\dots,0\}$); $\beta$ – комплекс величин шагов $\Delta x_i$ по соответствующим координатам; $\gamma$ – комплекс условных координат; $\delta$ –комплекс истинных координат.

Текст Л-оператора в а р и а н т :

# IOI 052 000 002

$\S\,0\ \ \bar{o}\,\alpha'\ B_\alpha\Rightarrow B_\delta$

$\S\,\mathrm{I}\ \ \Delta\alpha'\oplus B_\alpha\multimap 2\ \beta_{\alpha'}\times\gamma_{\alpha'}+\alpha_{\alpha'}\Rightarrow\delta_{\alpha'}\to 1$

$\S\,2.$

В этом виде Л-оператор вычисляет целые положительные компоненты вектора $X$, единственно возможные в существующей ПС-Р-ЛЯПАС.

Л-операторы р е ш е т к а, п о в е р х н о с т ь, о ц е н к а и в а р и а н т обеспечивают планирование эксперимента в целом. Следующие два Л-оператора реализуют управление накоплением статистики в каждом выбранном узле решетки $M$.

3.5. Организация статистических испытаний по схеме Бернулли возложена на Л-оператор – б е р н у с $\alpha\beta\gamma\delta\|$, где $\alpha$ – счетчик текущего числа появлений ожидаемого события; $\beta$ – счетчик текущего числа испытаний; $\gamma$ – требуемое число испытаний в серии; $\delta$ – дополнительный выход после окончания серии испытаний. Перед началом серии испытаний счетчики $\alpha$ и $\beta$ должны иметь нулевое значение. При положительном исходе испытания следует обращаться в основной вход б е р н у с а, при отрицательном – в дополнительный (б е р н у с I). После реализации основного выхода из оператора следует продолжать испытания. После дополнительного выхода $\delta$ серия окончена, и $\alpha/\beta=F(X)\pm\Delta C$.

Текст Л-оператора б е р н у с:

# IOI 054 000 00I

$\S\,0\ \ \Delta\alpha$

$\S\,\mathrm{I}\ \ \Delta\beta-\gamma\mapsto\delta.$

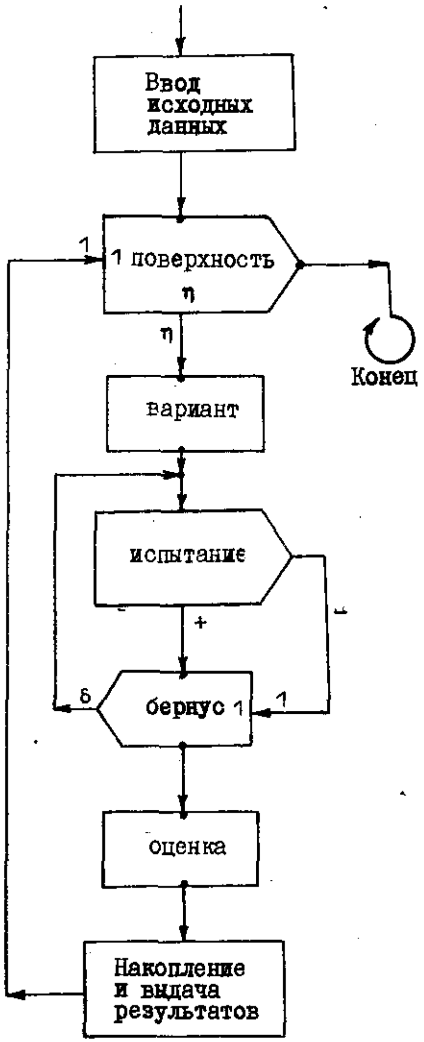


Рис. 2

Блок-схема испытаний по схеме Бернулли в окрестности критической поверхности $F(X) = C$ показана на рис.2. Собственно модель системы находится в блоке и с п ы т а н и е, один из выходов (+) которого соответствует положительному исходу, а другой (–) – отрицательному исходу очередного испытания.

3.6. При моделировании системы параллельных процессов роль индикатора стабилизации выходных параметров модели играет следящий процесс, снабженный Л-оператором с л е ж е н и е $\alpha\beta\gamma\delta\varepsilon\zeta\eta$ //, где $\alpha$ –интервал $\Delta t$ ; $\beta$ –номер процесса, за которым происходит слежение: $\gamma$ – адрес процедуры вычисления величин, характеризующих качество системы (эта процедура обязательно кончается символом "!"); $\delta$ – список величин стабилизируемых по мере накопления статистики; $\varepsilon$ – рабочий комплекс, в котором хранятся предыдущие и последующие значения величин из $\delta$ ; $\zeta$ – число правых разрядов, которыми можно пренебречь при сравнении



предыдущих и последующих величин из $\delta$ ; $\eta$ – признак отладочной выдачи (при $\eta \neq 0$ на печать выдаются промежуточные значения величин из $\delta$). При реализации основного выхода Л-оператора следящий процесс заканчивает эксперимент.

Текст Л-оператора с л е ж е н и е:

\# IOI 057 000 004

§ 0 $1 \Rightarrow B_\varepsilon(\delta) \Rightarrow \varepsilon\ B_\varepsilon \Rightarrow \varepsilon_0$

§ I з а д е р ж к а $\alpha$ // в е д у щ и й // в ы з о в $\beta 3$ //
з а д е р ж к а $1 // (\delta) \Rightarrow \varepsilon\, O\, c'\, 1 \Rightarrow \alpha'\, \varepsilon_0 \Rightarrow b'$

§ 2 $\varepsilon_{\alpha'} \oplus \varepsilon_{b'} > \zeta \vee c' \Rightarrow c'\, \Delta\, b'\, \Delta\, \alpha' \oplus \varepsilon_0 \mapsto 2$
$c' \circ\!\!\rightarrow 4\ \ 1 \rightarrow B_\varepsilon(\delta) \Rightarrow \varepsilon\ \eta \circ\!\!\rightarrow 1\ \ \varepsilon * \rightarrow 1$

§ 3 $\mapsto \gamma$ возврат //

§ 4.

Л-операторы, упомянутые в тексте, описаны в [8,9].

3.7. Нам остается коротко коснуться вопроса чисто статистического обеспечения экспериментов, то есть генераторов псевдослучайных построений. Что касается генераторов псевдослучайных чисел, методика их построения широко известна и отражена, например, в [I,II]. Ниже будут использованы результаты работ [I2,I3], посвященных построению псевдослучайных булевских векторов и матриц.

Упомянутые работы исходят из наличия датчика случайных чисел, равномерно распределенных на отрезке [0,I]. В общем случае необходим генератор булевских векторов с вероятностью появления единицы в каждом разряде, равной P = 0,5. В Р-ЛЯПАСе такой вектор получается как значение переменной я. В ПС-Р-ЛЯПАС для "Минск-22" каждое очередное значение я задается мультипликативным генератором псевдослучайных чисел, описанным в [I4]. Цикл этого датчика, по данным [I4], превышает $10^7$. Дополнительные исследования, проведенные Л.А.Седухиной по просьбе авторов, показали, что он является также удовлетворительным датчиком требуемых булевских векторов.

В частности, подтвердилась оценка цикла датчика. Показано, что вероятность появления единицы в каждом разряде действительно равна 0,5 с хорошей точностью (значение $\chi^2$ = 3,89 по выборке 32768 реализаций не превосходит $\chi^2_{0,01}$ = 6,6). Статистически значимая (с вероятностью не менее 0,99), но небольшая корреляция существует только между 3-м и 2I-м, а также 2I-м и 25-м разрядами псевдослучайного вектора я.

3.8. На основе датчика я легко построить Л-операторы в е к т о р $\alpha \beta \gamma \delta \,\|$ и м а т р и ц а $\alpha \beta \gamma \,\|$, генерирующие соответственно булевский вектор или матрицу с произвольной вероятностью $P$ появления единицы в каждом разряде. Здесь $\alpha = P \times 2^{32}$ – вероятность единичного разряда; $\beta$ – булевский вектор, содержащий единственную единицу; все разряды $\alpha$, расположенные правее этой единицы, не учитываются, то есть $\beta$ фиксирует точность задания вероятности $\alpha$; $\gamma$ – требуемые булевский вектор или матрица; $\delta$ – размерность (число разрядов) случайного булевского вектора.

Текст Л-оператора в е к т о р

$$\# \ \underline{101}\ \underline{002}\ \underline{000}\ \underline{004}$$

$$\S\ 0$$

$$\S\ 1 \quad O\,\gamma\,\beta \rightarrow \alpha'$$

$$\S\ 2 \quad \wedge\alpha \circ\!\!\leftarrow 3\ \underline{я} \vee \gamma \Rightarrow \gamma \rightarrow 4$$

$$\S\ 3 \quad \underline{я} \wedge \gamma \Rightarrow \gamma$$

$$\S\ 4 \quad \alpha' < 1 \rightarrow \alpha' \leftarrow 2\ \delta \Rightarrow \alpha'\, L\, \alpha' \wedge \gamma \Rightarrow \gamma\ .$$

Текст м а т р и ц ы аналогичен. Идея этих операторов изложена в [II]. Л-оператор м а т р и ц а построен в [I3] (под именем м а п л о т ). В последней работе содержится широкий набор генераторов различных псевдослучайных построений на языке ЛЯПАС.

В архиве ПС-Р-ЛЯПАС имеется также генератор э к с п о н е н т а $\|$, преобразующий текущую переменную $\tau$ в случайное число, распределенное по экспоненциальному закону с параметром $\tau^{-1}$. Вообще, набор подобных средств моделирования принципиально неограничен.

Итак, результаты данной работы позволяют эффективно моделировать многомашинные вычислительные системы даже на ЭВМ "Минск-22". Здесь преследовалась цель продемонстрировать только основные идеи, лежащие в основе применяемого в [6–8] метода моделирования. Более подробное представление о Р-ЛЯПАСе читатель может получить из [5,9] и, в особенности, из [8], где представлена конкретная модель с подробными комментариями. Если этого окажется недостаточно, то следует обратиться к первоисточнику [I2].



Л и т е р а т у р а

I. БУСЛЕНКО Н.П. Моделирование сложных систем. М., "Наука", I968.

2. РЕШЕТНЯК Ю.Г. О задаче соединения элементов вычислительной системы. –В кн.: Вычислительные системы. Вып.3. Новосибирск, I962, стр. I7–30.

3. КЛЕЙНРОК Л. Коммуникационные сети. М., "Наука", I970.

4. ХОРОШЕВСКИЙ В.Г. Исследование функционирования однородных вычислительных систем. Дисс. на соискание ученой степени доктора технических наук, Л., I973, (ЛЭТИ).

5. ВОРОБЬЕВ В.А. Р-ЛЯПАС – базовый язык моделирования цифровых устройств. –В кн.: Вычислительные системы. Вып.39. Новосибирск, I970, стр. 67–80.

6. ВОРОБЬЕВ В.А., КОРНЕЕВ В.В. Некоторые вопросы теории структур однородных вычислительных систем. –Настоящий сборник, стр. 3–I6.

7. КОРНЕЕВ В.В. О макроструктуре однородных вычислительных систем. –Настоящий сборник, стр. I7–34.

8. ВОРОБЬЕВ В.А. Коммутируемость и внутренняя эффективность однородных вычислительных систем в одном частном случае. –Настоящий сборник, стр. 50–69.

9. ВОРОБЬЕВ В.А. Моделирование системы параллельных процессов на Р-ЛЯПАСе. –В кн.: Вычислительные системы. Вып.5I. Новосибирск, I972, стр. 82–96.

I0. ВОРОБЬЕВ В.А. Простейшие структуры однородных вычислительных систем. –Настоящий сборник, стр. 35–49.

II. БУСЛЕНКО Н.П., ШРЕЙДЕР Ю.А. Методы статистических испытаний. М., Физматгиз, I96I.

I2. ЗАКРЕВСКИЙ А.Д. Алгоритмический язык ЛЯПАС и автоматизация синтеза конечных автоматов. Томск, Изд-во ТГУ, I966.

I3. ОСТРОВСКИЙ В.И. Исследование алгоритмов синтеза дискретных устройств методом статистических испытаний. Дисс. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук, Севастополь, I970, (СПИ).

I4. АНТИПОВ М.В. Анализ производящих множителей мультипликативного датчика псевдослучайных чисел. Препринт, ИЯФ, 42–7I, Новосибирск, I97I.

Поступила в ред.-изд.отд.
26 ноября I973 года