

О. В. ЛИТВИНОВА, к. т. н. Ю. Г. МАЙБА,  
к. т. н. Ю. А. СЕМИШИН

Украина, Одесский госуниверситет им. И. И. Мечникова,  
Одесский гос. политехнический ун-т  
E-mail: maiba@a74.imem.odessa.ua

По материалам доклада на МНПК  
«Современные информационные  
и электронные технологии»  
(«СИЭТ-2000»). —  
23–26 мая 2000 г., Одесса

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА ДАСИМ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ РЭА

*Показаны особенности и технология использования комплекса ДАСИМ (диалоговой автоматизированной системы имитационного моделирования).*

В настоящее время специалисты в области проектирования и производства РЭА широко используют теорию сложных систем. Имитационное моделирование является наиболее часто применяемым методом исследования таких систем.

Имитационное моделирование может использоваться в следующих задачах:

- проектирование и модернизация предприятий по производству РЭА, их цехов и участков;
- создание отдельных АРМ на базе имитационной модели для быстрого поиска решения путем имитации производственных ситуаций;
- разработка автоматизированных информационно-поисковых систем;
- моделирование структур управления в условиях АСУ;
- решение оптимизационных функциональных задач в информационной системе, например задач календарного планирования, создания оптимальных запасов и т. п.;
- моделирование при проектировании и модернизации компьютерных систем обработки информации и сетей передачи данных;
- моделирование при проектировании и модернизации изделий РЭА с использованием компьютерных систем обработки информации и сетей передачи данных.

При имитационном моделировании изучаемая или проектируемая система заменяется ее имитатором, с которым проводятся машинные эксперименты. Цель таких экспериментов заключается в получении информации об исследуемом объекте и принятии на ее основе рациональных решений по выбору состава, структуры и характеристик отдельных функциональных элементов с учетом имеющихся ограничений. Использование моделирования позволяет оценить производительность системы, осуществить выбор рационального состава оборудования для выполнения требуемых функций и оценить пропускную способность выбранного оборудования.

К достоинствам имитационного моделирования можно отнести:

- Возможность получить ответы на множество вопросов, которые возникают на ранних стадиях проектирова-

ния систем, избежав использования метода проб и ошибок, который связан с большими затратами. В частности, на основе анализа имитационной модели можно заранее определить эффективность функционирования любой проектируемой системы и избежать необоснованных затрат человеческих и материальных ресурсов на построение нерациональных систем.

- Возможность исследования особенностей функционирования системы в любых условиях, в частности, и тех, которые не реализованы в натуральных экспериментах. При этом параметры системы и окружающей среды можно варьировать в широких пределах, создавая произвольную обстановку. Благодаря такому подходу резко снижаются затраты на лабораторное оборудование и на эксплуатационные испытания системы.

- Возможность прогнозировать поведение системы в ближайшем и отдаленном будущем, экстраполируя на модели результаты промышленных испытаний. В этом случае данные, полученные ранее, дополняются с помощью применения статистического подхода.

- С помощью моделирования можно искусственным путем быстро и в большом объеме получить необходимую информацию, отображающую ход реальных процессов, избежав дорогих (а зачастую и невозможных) натуральных испытаний этих процессов, результаты которых из-за ограниченного объема выборки к тому же не всегда достоверны.

- Имитационные модели являются чрезвычайно гибким исследовательским инструментом, позволяющим отображать как реальные, так и гипотетические ситуации, т. к. на них не распространяются никакие фактические ограничения.

- Так как исследование и оптимизацию некоторых сложных экономических и компьютерных систем невозможно выполнить ни с помощью лабораторных или натуральных экспериментов, ни с помощью аналитических методов, моделирование на ЭВМ зачастую является единственным реализуемым способом решения таких задач.

- Имитационные модели технических и технологических систем и устройств позволяют во много раз сократить время их испытаний: от дней и месяцев в реальных условиях до минут и часов на ЭВМ. Основным недостатком имитационного моделирования является потребность в большом количестве машинного времени для проведения исследования, однако с учетом огромной вычислительной мощности современных ПЭВМ этот недостаток можно не считать лимитирующим.

Для разработки имитационных моделей может использоваться диалоговая автоматизированная система имитационного моделирования (ДАСИМ) [1, 2]. В [2] описаны особенности построения и функционирования версии ДАСИМ, реализованной в операционной системе UNIX. Она обладает большими возможностями, ориентирована на работу с большими моделями (сотнями и тысячами устройств), но требует мощных ПЭВМ с большой оперативной памятью (не менее 64 Мбайт) с установленной ОС UNIX, которых у разработчиков РЭА может и не быть.

Для исследования более простых моделей разработана версия ДАСИМ для ОС MS DOS (в дальнейшем — просто ДАСИМ), которая обладает меньшими возможностями (число устройств до 250), но проще в эксплуатации, не требует мощных ПЭВМ и позволяет проводить исследования достаточно широкого класса систем.

Приведем основные характеристики и возможности этой версии ДАСИМ.

ДАСИМ может применяться для исследования:

- одно- и многопроцессорных универсальных и специализированных вычислительных систем и комплексов (кластерных, SMP и MPP);
- любых локальных и глобальных сетей ЭВМ и их комбинаций;
- сетей передачи данных (телефонных, пейджинговых, транкинговых, сотовых и радиосетей);
- производственных, экономических и банковских систем, описываемых с помощью сетей массового обслуживания.

ДАСИМ удобен в использовании, т. к. блок-схемы создаются из элементов сетей массового обслуживания, управляющих логических элементов и готовых моделей. Для учета особенностей функционирования вычислительных систем и сетей в языке ДАСИМ можно использовать механизмы:

- деления и сборки заявок (для выполнения транзакций);
- захвата и освобождения ресурса (памяти ЭВМ любого типа, денег, людей и т. п.);
- управления нагрузкой в сетевом транспортном соединении (ограничение количества передаваемых подряд пакетов, не дожидаясь получения квитанций);
- запроса и ответа, пакетирования и квитирования пакетов (для сетей с коммутацией пакетов);
- приоритетной, циклической обработки заявок с квантованием времени и с отказами (для различных режимов функционирования вычислительных систем);
- транспортной сети, правил выбора маршрута, узлов коммутации и каналов связи (для глобальных сетей).

Разработаны модели мультипроцессорных систем (MIMD, кластерных, SMP и MPP), локальных и глобальных сетей, протоколов множественного доступа, средств связи, производственно-экономических систем, автоматических линий, банковских систем и др. [1–5], которые могут использоваться как часть более сложных моделей.

При использовании ДАСИМ на основе блок-схем объекта с помощью специального языка моделирования (язык одинаков для версий MS DOS и UNIX) создается модель, позволяющая имитировать алго-

ритмы функционирования объекта для получения их численных и графических оценок. Такой анализ может проводиться до построения системы. Для использования языка моделирования не требуется обучение программированию. Имеется диалоговая система подсказок и обучающая система. Кроме этого, имеется детальная документация, состоящая из 4 документов общим объемом 600 страниц. Имеется возможность сопровождения пакета.

ДАСИМ состоит из следующих компонентов:

- двухоконного текстового редактора;
- транслятора входного языка системы моделирования;
- средств трассировки процессов функционирования модели;
- системы управления процессом эксперимента;
- системы замены параметров;
- системы реконфигурации модели;
- системы сбора, обработки и выдачи результатов эксперимента.

**Система управления процессом эксперимента** предназначена для диалогового взаимодействия пользователя с моделью на этапах ее построения, калибровки и выполнения имитационного эксперимента. На этапе построения пользователю предоставляется возможность автоматического поиска допущенных синтаксических и логических ошибок. В процессе моделирования пользователю предоставляется возможность корректировки параметров интенсивностей входящих потоков и времени обслуживания в узлах модели. Пользовательский интерфейс обеспечивает возможность непрерывного контроля переходных процессов и профиля использования памяти. Для оперативной оценки поведения модели во времени в состав комплекса включена система визуализации текущих результатов. Она обеспечивает цветную интерпретацию степени загрузки устройств, их состояний, а также длин очередей.

**Встроенная система замены параметров** позволяет проводить серию имитационных экспериментов по выбранному плану. Результаты каждого прогона модели записываются в базу данных. После завершения эксперимента производится вторичная обработка результатов серии экспериментов и формирование на их основе стандартного набора интегральных характеристик.

**Система реконфигурации** модели позволяет изменять структуру модели в процессе эксперимента с целью поиска оптимального варианта.

**Система автоматического сбора, обработки и выдачи результатов эксперимента** предоставляет возможность текущего накопления в базе данных стандартной статистики и (для больших систем) формирования на ее основе интегральных оценок.

Использование ДАСИМ позволяет оценить правильность функционирования и производительность системы, осуществить выбор рационального состава оборудования для выполнения требуемых функций и оценить пропускную способность выбранного оборудования.

ДАСИМ функционирует под управлением операционной системы MS DOS на ПЭВМ, совместимых с IBM PC AT, со стандартным набором внешних устройств. Число элементов модели ~250. Модель одного устройства требует ~1 Кб оперативной памяти.

Рассмотрим технологию применения ДАСИМ.

**Описание объекта моделирования.** При содержательном описании определяются назначение, состав, структура и алгоритм функционирования объекта моделирования. Чаще всего это описание является некоторым огрубленным представлением физических процессов, протекающих в исследуемом либо проектируемом объекте. Как правило, содержательное описание отражает уровень знаний пользователя об изучаемой системе. При этом степень детализации модели существенно зависит от целей, поставленных перед проектировщиком. Наиболее информативным в этом случае является графическое представление исследуемого объекта. В качестве такого примера на **рис. 1** изображена четырехузловая сеть пакетной коммутации, функционирующая согласно протоколу X.25.

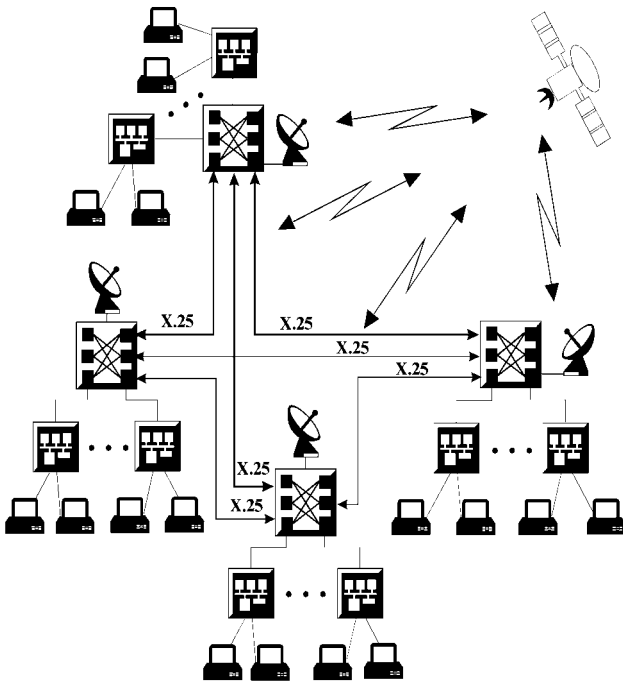


Рис. 1

**Определение задач моделирования.** Состав решаемых задач определяется в зависимости от целей исследования. Количество задач должно быть таково, чтобы можно было получить ответы на все вопросы, стоящие перед проектировщиком. Например, для предложенной структуры сети с коммутацией пакетов к числу решаемых задач можно отнести следующие:

- оценка влияния внешней нагрузки на характеристики процессов транспортировки данных;
- оценка влияния объемов передаваемой информации;
- оценка влияния профиля решаемых задач;
- оценка влияния длины пакета;
- оценка влияния конфигурации сети связи на время доставки сообщений.

Для оценки различных вариантов структуры и архитектуры предложенного объекта необходимо разработать интегральные показатели качества. Каждый из них представляет собой математическое выражение, преобразующее множество локальных оценок в один интегральный

показатель. Полученные оценки необходимо согласовать с составом задач, т. е. определить, какие из них будут использоваться при решении той или иной задачи.

**Разработка графической схемы имитационной модели и ее декомпозиция.** На основе информации об исследуемом объекте разрабатывается детальная графическая схема модели, отражающая его структуру, связи между отдельными элементами и сигналы управления логикой работы устройств-имитаторов. Любая графическая схема модели составляется из унифицированных взаимосвязанных типовых элементов, представляющих собой обслуживаемые устройства. В общем виде схема модели любого обслуживаемого устройства представлена на **рис. 2**.

На схеме изображены обслуживаемое устройство (ОУ), входящие потоки, очереди, формируемые на входе устройства, окна, сигналы управления. Назначение первых трех понятий известно из теории массового обслуживания. С помощью понятия “окно” реализуются механизмы управления нагрузкой, используемые в сетях коммутации пакетов.

**Сигналы управления (СУ)** предназначены для обеспечения возможности разработки моделей алгоритмов управления логикой работы устройств и распределением потоков в сети. Они подразделяются на сигналы управления источниками требований, устройствами и нагрузкой.

*Сигналы управления источниками требований* предназначены для генерации новых сообщений в моменты изменения определенных состояний ОУ.

*Сигналы управления устройствами* используются для изменения состояния устройства (“включено”, “выключено”), а также для прерывания процесса обслуживания заявок.

*Сигналы управления нагрузкой* необходимы для работы с окнами.

Генерация сигналов производится в моменты изменения состояния ОУ. К числу таких состояний относятся: поступление заявки на вход ОУ, завершение операции обслуживания и изменение количества заявок, находящихся в очереди. Последнее событие вызывает реакцию на постановку (РНП) или извлечение (РНИ) заявок из очереди. Набор генерируемых СУ для каждого типа реакций может изменяться в зависимости от длины очереди, что позволяет легко разрабатывать модели адаптивных алгоритмов управления.

На **рис. 3** приведен пример детальной схемы модели.

В процессе составления схемы модели производится уточнение следующих аспектов функционирования объекта:

- входящих потоков и их характеристик (тип распределения, параметры, класс, приоритет и период запуска);
- порядка формирования очередей (общая, отдельная, смешанная), их приоритетов и ограничений;
- механизма обслуживания (в порядке поступления, в обратном порядке и т. д.);
- типа распределения времени обслуживания и его параметров;
- способа подключения к обслуживанию и правил выбора свободного устройства;
- возможности наступления отказа ОУ, правил его восстановления и порядка резервирования;
- взаимодействия между устройствами на уровне сигналов управления;
- механизма ограничения нагрузки на логические соединения.

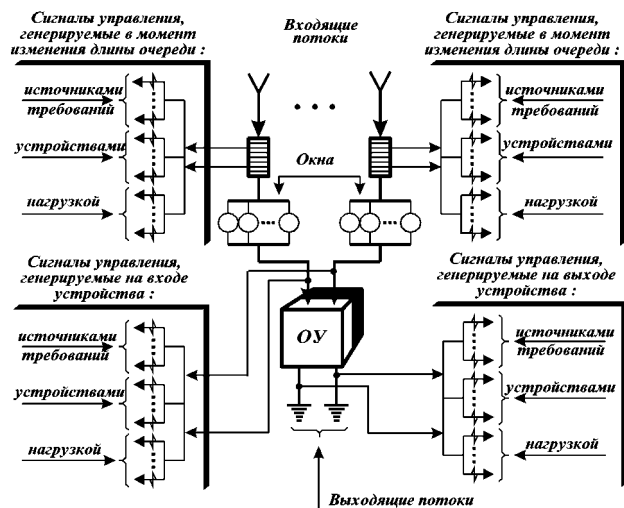


Рис. 2

После уточнения особенностей функционирования всех устройств производится процедура декомпозиции. В процессе декомпозиции модели осуществляется разбиение сети на отдельные узлы с указанием для каждого из них всех связей по входу и выходу, показывающих исходную картину распределения потоков в сети. Затем на схеме производится нумерация внесистемных потоков путем присвоения им уникальных индексов (номеров). Далее устанавливаются связи между отдельными узлами. Каждая связь характеризуется индексом потока и идентификаторами узла, с которого поступают требования. Совокупность всех связей представляет собой маршрутную матрицу, характеризующую общую схему транспортировки требований между обслуживаемыми устройствами.

**Описание модели на входном языке и отладка.**

После завершения этапа декомпозиции сети производится последовательное описание всех обслуживаемых устройств, входящих в структуру модели. Каждое устройство описывается с помощью предложения **устройство**, а особенности его функционирования — набором следующих предложений: **входящий поток, механизм обслуживания, очередь, механизм подключения, время обслуживания, время отказа, механизм дообслуживания, выходящий поток, транспортная сеть, время моделирования.**

Пример описания модели представляется следующим образом:

```

y(v,1)(1); мо:ск-у(a,1); вп: у(д,1),у(n,1);
во:пс(1.8e-2);
од:общая рни (0 вкл * (((ип=55))) выкл);
вып: вкл*(((ип=56))) выкл птв(0.089 у(n,1)*);
...
y(v,7)(1); мо:ск-у(a,1); вп: у(д,7),у(n,1);
во:пс(1.8e-2);
од:общая рни (0 вкл * (((ип=58))) выкл);
вып:вкл*(((ип=57)))выкл птв(0.089 у(n,1)*);
у(φ,1); вп:(ип=1-10 уп); од: отдельная; во:
пс(0.1); вып:
(ип=1) вкл(у(v,1))(((ип=2))) выкл,
(ип=2) вкл(у(v,2))(((ип=3))) выкл,

```

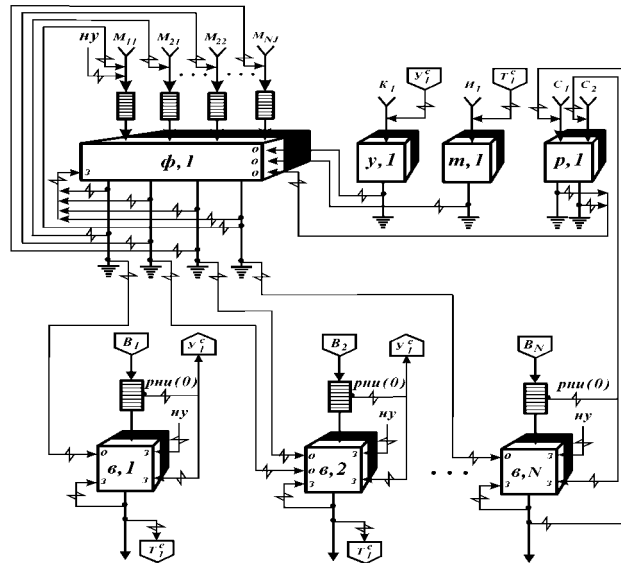


Рис. 3

```

(ип=3) вкл(у(v,2))(((ип=4))) выкл,
...
(ип=10) вкл(у(v,7))(((ип=1))) выкл;
у(y,1); вп:(ип=55 уп); во: пс(0.08); вып: вкл
(у(φ,1));
у(t,1); вп:(ип=56 уп); во: пс(0.08); вып: вкл
(у(φ,1));
у(p,1); вп:(ип=57*58 уп); во:(ип=57) пс(0.2),
(ип=58) пс(0.208); вып: вкл (у(φ,1)).

```

После описания всех устройств и времени моделирования производится запись модели в библиотеку, а затем осуществляется запуск ее на выполнение. Процесс преобразования полученного текста в программную имитационную модель состоит из пяти этапов: ввода, трансляции, логического контроля, инициации и моделирования.

После устранения имеющихся ошибок производится проверка правильности функционирования устройств модели. Такая проверка осуществляется с использованием тестового режима. Тестовый режим дает возможность получения информации об очередности наступления событий, отражающих внутренние процессы функционирования модели. На экране отображаются процессы передачи требований между обслуживаемыми устройствами, генерации сигналов управления, а также выводится текущая статистика и справочная информация о работе модели (см. **рис. 4**).

При исследовании сложных стохастических сетей с управлением выполнение трассировки модели является обязательным, поскольку достаточно потери одного сигнала, чтобы вся модель оказалась неработоспособной. Поэтому в процессе проверки моделей с управлением отслеживаются не только траектории движения требований, но и сигналы управления, влияющие на алгоритмы функционирования устройств и внесистемных источников. При имитации систем с большим количеством потоков и обслуживаемых устройств значительно затрудняется анализ процесса работы из-за необходимости контроля большого числа различных событий. Для уп-

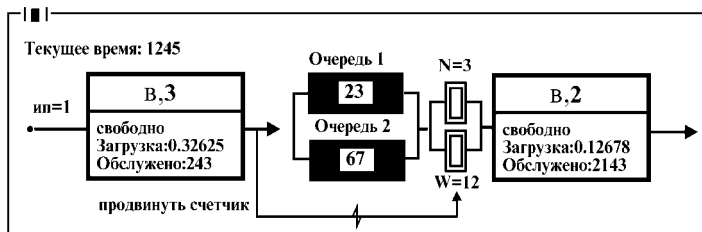


Рис. 4

рошения анализа трассы можно ограничивать число тестируемых потоков.

**Параметризация модели и составление плана эксперимента.** Параметризация модели предполагает определение временных параметров работы физического устройства проектируемого объекта. Затем каждому имитатору, в соответствии с выполняемыми им функциями, задаются теоретический или эмпирический законы распределений, имитирующие задержки в обслуживании требований физическими устройствами. Для получения законов распределений могут производиться измерения на реальных объектах или их прототипах. При проектировании принципиально новых систем могут использоваться законы распределений, полученные экспертным путем. Ожидаемая внешняя нагрузка может быть получена из соображений общего назначения объекта и возможных предельно допустимых нагрузок на него.

При наличии эмпирических законов распределений до начала моделирования необходимо записать их в базу данных. Затем в исходном тексте модели следует установить соответствия между именами файлов, содержащих гистограммы, и законами распределений, задающими интенсивности входящих потоков и времена обслуживания.

В процессе параметризации осуществляется приведение всех параметров, используемых для генерации временных задержек, к одной условной единице времени. Например, такой единицей может быть миллисекунда, секунда, час и т. д.

Процесс параметризации модели может осуществляться одновременно с разработкой детальных графических схем устройств-имитаторов. Это в значительной степени сокращает трудоемкость формирования исходного текста, т. к. отпадает необходимость в отдельном выполнении процедуры установки параметров в описании модели.

**Проведение имитационного эксперимента с моделью.** После запуска модели на выполнение пользователю предоставляется набор средств, обеспечивающих возможность непрерывной оценки текущих результатов моделирования и — на основе их анализа — поиска наиболее целесообразных вариантов структуры и параметров функционирования отдельных блоков модели. Анализ результатов моделирования производится с использованием подсистемы доступа к текущим оценкам и их визуального контроля.

Подсистема доступа к текущим результатам моделирования обеспечивает возможность прерывания процесса имитации и последующего просмотра всех текущих

локальных оценок, характеризующих обслуживаемые устройства, очереди, потоки, механизмы ограничения нагрузки, процессы транспортировки пакетов и т. д. На основе анализа этих оценок принимается решение о необходимости корректировки параметров, влияющих на функционирование отдельных элементов модели. В случае обнаружения перегруженных устройств путем изменения времен обслуживания или уменьшения интенсивностей входящих потоков можно оперативно подобрать состав параметров, удовлетворяющих установленным ограничениям.

В случае недогрузки устройств путем увеличения этих же параметров можно определить предельно допустимую нагрузку на сеть взаимосвязанных устройств-имитаторов. В качестве примера на рис. 5 показана замена нормального закона распределения на табличный (т. е. заданного с помощью гистограммы) при задании времени обслуживания, а также корректировка интенсивности поступления требований от внесистемного источника.

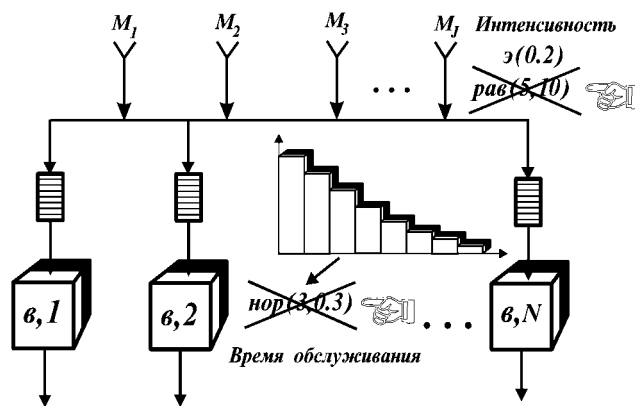


Рис. 5

В процессе каждого прогона модели осуществляется контроль загрузки устройств. При этом на экран выводится информация о состоянии устройств, длинах очередей, коэффициенте загрузки (см. рис. 6).

При обнаружении перегрузок в работе устройств производится корректировка либо параметров внешней нагрузки, либо пропускной способности устройств. Одновременно может осуществляться изменение выбранного плана эксперимента. В частности, в тех точках плана, где возникают перегрузки, эксперимент не производится. Выполнение перечисленных выше этапов значительно облегчается за счет использования интегральной среды, обеспечивающей высокий уровень автоматизации соответствующих работ.

Контроль переходного процесса в модели осуществляется с помощью графика, отражающего изменения средней и текущей длин очередей на входе выбранного устройства (рис. 7).

Поиск наилучших вариантов структуры может осуществляться с использованием механизма реконфигурации модели. Этот механизм предназначен для выдачи пользователем команд управления устройствами и источниками требований.

Первый тип команд используется для выключения работающих, а также для включения заблокированных

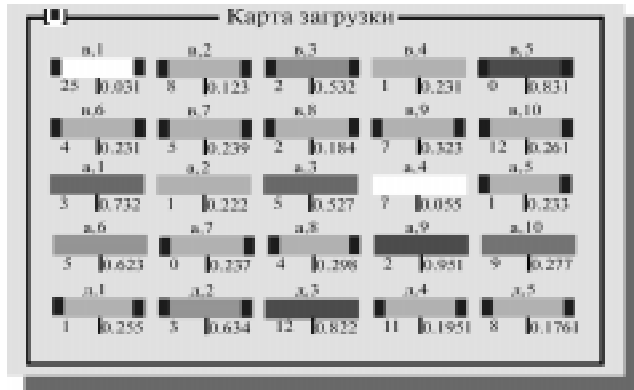


Рис. 6

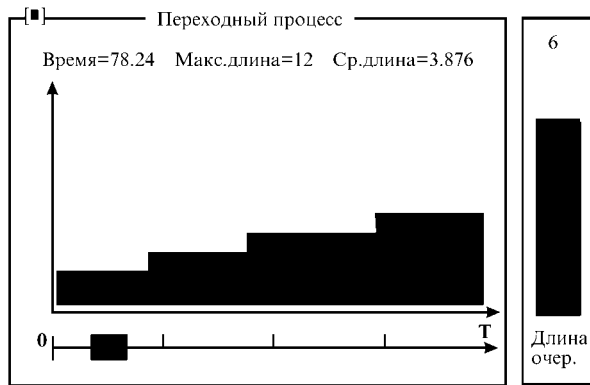


Рис. 7

устройств. При работе модели подключение дополнительных устройств или их блокировку можно рассматривать как реконфигурацию модели, т. е. изменение в процессе эксперимента количества обслуживающих устройств, выполняющих идентичные функции. С помощью команд первого типа достаточно просто решаются задачи выбора оптимального количества обслуживающих устройств.

Второй тип команд предназначен для запуска управляемых источников. В результате на вход системы поступает требование, которое может использоваться как для увеличения внешней нагрузки на моделируемый объект, так и для выдачи сигналов управления, воздействующих на состояние устройств и источников требований.

**Сбор, обработка и интерпретация результатов моделирования.** Проведение имитационного эксперимента непрерывно сопровождается выполнением процедур сбора, обработки и интерпретации результатов моделирования. Такая стратегия эксперимента базируется на возможностях постоянного визуального контроля текущих результатов и замены любых параметров в процессе моделирования. Это позволяет использовать последовательный метод планирования эксперимента, в котором основная роль принадлежит разработчику модели. Процедура сбора результатов моделирования предполагает запись их в базу данных как в процессе имитации, так и по завершении прогона модели. Дальнейшая обработка результатов моделирования заключается в построении зависимости влияния одного или нескольких факторов на значения локальных и интегральных оценок. При использовании интегральных показателей перед построением регрессионной

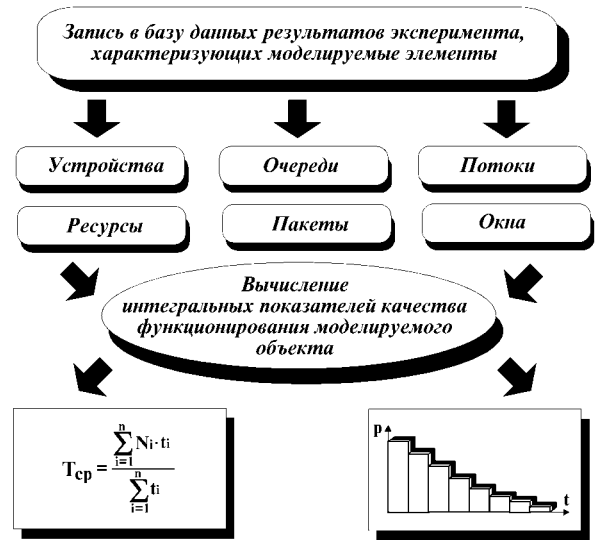


Рис. 8

зависимости производится расчет этих показателей. Если в стандартном наборе нет необходимых оценок, то пользователь должен на основе информации об устройствах, очередях, потоках и т. д. произвести вычисление интегральных показателей (см. рис. 8). Обработка результатов может заключаться также в нахождении доверительных интервалов для локальных и интегральных оценок путем выполнения нескольких прогонов модели с различными начальными числами базового генератора.

Процедура интерпретации результатов моделирования заключается в формулировке выводов о поведении исследуемого объекта при различных сочетаниях входных параметров и их уровней, а также в оценке влияния структуры этого объекта или его отдельных механизмов на значения контролируемых характеристик. Процесс интерпретации сопровождается оценкой адекватности поведения модели и исследуемого объекта. При сравнении результатов могут использоваться статистические данные функционирования реальных систем-прототипов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Семишин Ю. А., Гуржий В. П., Литвинова О. В. Моделирование дискретных систем на ДАСИМ. — М.: Моя Москва, 1995.
2. Семишин Ю. А., Литвинова О. В. ДАСИМ как инструментальное средство моделирования дискретных систем // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2000. — № 2-3. — С. 22-26.
3. Литвинова О. В., Майба Ю. Г., Семишин Ю. А. О методике имитационного моделирования протоколов множественного доступа с резервированием времени в пакетных радиосетях // Электронное моделирование. — 1995. — № 1. — С. 40-47.
4. Ракоед А. Ф., Семишин Ю. А. Имитационная модель мультипроцессорной системы обработки сигнала // УСИМ. — 1986. — № 3. — С. 30-35.
5. Литвинова О. В., Майба Ю. Г., Семишин Ю. А. Об использовании имитационного моделирования в учебном процессе // Тез. докл. науч.-метод. конф. "Компьютерное моделирование". — Днепропетровск, 1999. — С. 174-175.