

Таким образом, проведенные исследования показали, что идея защиты с помощью экранов из тонких слоев металла и диэлектрика жизнеспособна. Такие экраны представляют интерес для организации временной защиты ответственных объектов (например, на время транспортировки). Для этих целей может быть организовано производство специальных защитных материалов, аналогичных тем, которые применяются для защиты

от статического электричества. Одновременно они смогут обеспечить защиту и от других электромагнитных воздействий.

#### Л и т е р а т у р а

1. Ларионов В. П. Основы молниезащиты. — М.: Знак, 1999.
2. Базелян Э. М., Райзер Ю. П. Физика молнии и молниезащиты. — М.: Физматлит, 2001.

Статья поступила в редакцию 5 мая 2006 г.

## Researches of ways of protection against a lightning by means of shield on the basis of layered metal-dielectric materials

*N. A. Prudkoy, B. F. Skripnik*

RFNC-ARRIEP, Sarov, the Nizhniy Novgorod Region, Russia

*V. P. Miroshnichenko, A. A. Perunov, V. G. Filippov*

Joint-Stock Company "OEP VEI", Istra-2, the Moscow Region, Russia

*Results of researches on installation "Getom" of possibly ways of protection against direct influences of a lightning are submitted. Efficiency of shields is experimentally confirmed on the basis of multilayered metal-dielectric materials. Protective properties metal-dielectric shields are determined at influence of multicomponent impulses of a current of a lightning depending on a condition of a surface of protected objects and ways of fastening of shields.*

УДК 539.1.074.3

## Имитационное моделирование таймерной системы

*А. М. Галкин, В. А. Коковин, Н. В. Радомский, П. У. Юсупалиев, С. А. Шутеев*

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

*Приведено исследование с целью разработки имитационной модели системы таймирования на основе пакета моделирования ANYLOGIC. Разработанная модель позволила определить максимальную интенсивность потока таймерных сообщений при заданном числе узлов коммутации и фиксированном времени обработки таймерных сообщений; длительность обработки таймерных сообщений в узлах коммутации при различной интенсивности входного информационного потока; максимальное число узлов коммутации при фиксированном числе входных таймерных сообщений и максимальной интенсивности входного потока.*

В системе управления любого сложного технологического комплекса, в том числе предназначенного для проведения сложного физического эксперимента с большим количеством оборудования (например, ускорителей различного назначения), важное место занимает система таймирования (синхронизации), которая позволяет синхронизировать работу отдельных узлов всего комплекса. Причем узлы могут располагаться как ря-

дом, так и на больших расстояниях один от другого (до нескольких километров).

Синхронизация нужна для того, чтобы два или более устройства стартовали в одной и той же точке временной шкалы и чтобы в дальнейшем они работали синхронно. Система таймирования необходима также для корректного разделения общих ресурсов и обмена данными между процессами.

В ходе разработки и эксплуатации системы таймирования особое внимание уделяется:

- сокращению времени обработки таймерной информации;
- минимизации числа магистральных кабелей;
- обеспечению удобного доступа к оперативным данным системы управления;
- оснащению системы таймирования достаточными диагностическими средствами.

Для решения этих задач используются общие принципы таймерной системы, изложенные в работе [1].

Сложная система таймирования требует значительных усилий для ее тестирования, проверки эффективности работы, анализа влияния изменения многочисленных параметров в процессе эксплуатации и особенно на стадии разработки. В данном случае существенную помощь может оказать метод имитационного моделирования.

Применение имитационного моделирования при разработке и создании систем таймирования больших физических комплексов дает возможность существенно сэкономить ресурсы. Этот метод позволяет решать задачи анализа больших распределенных систем, включая задачи оценки вариантов структуры системы, эффективности различных алгоритмов управления системой, влияния изменения различных параметров системы [2]. Тем не менее анализ показывает, что метод имитационного моделирования ранее не применялся для исследования систем таймирования. Поэтому данная работа посвящена исследованию возможности применения имитационного моделирования в сложных системах таймирования.

Конечная цель построения имитационной модели системы таймирования — оценка ее предельных возможностей как открытой системы. Целевая программа исследований системы синхронизации на модели включает в себя:

- определение предельной пропускной способности системы таймирования при заданном числе узлов коммутации, максимальной интенсивности таймерных сообщений (ТС) и постоянном времени их обработки в каждом узле;
- фиксирование максимального числа узлов коммутации (возможность наращивания структурных единиц системы) при постоянном числе входных таймерных сообщений;
- измерение времени задержки ТС в узлах коммутации при различной интенсивности входных информационных потоков.

Построение модели для уже разработанной системы имеет ряд преимуществ. Имея данные о реальных компонентах системы, можно более точно отобразить их в формализованном виде. Работая с реальными потоками таймерной информа-

ции, можно более точно классифицировать входные потоки модельных сообщений. В итоге исследование поведения такой модели при изменении конфигурации системы и/или интенсивности потоков таймерной информации гарантирует получение более достоверных результатов, в том числе и при оценке предельных возможностей системы таймирования.

### Формализация структурных компонентов системы таймирования

Имитационная модель — это формальное (т. е. выполненное на некотором формальном языке) описание логики функционирования исследуемой системы. В используемом пакете имитационного моделирования встроена демоверсия объектно-ориентированного языка AnyLogic™, который дает компактное представление структуры модели, гибкое определение данных и т. д. AnyLogic™ поддерживает языковые конструкции для задания поведения агентов (агентный подход моделирования), их взаимодействия, моделирования среды, а также имеет богатейшие анимационные возможности. Язык AnyLogic™ интерпретирует создаваемые графические классы активных объектов в классы Java™.

Примем за базовую структуру модель с тремя узлами MS (рис. 1). Процесс обработки ТС в узлах системы таймирования подпадает под класс задач, связанных с работой систем массового обслуживания (СМО). Последние можно классифицировать по логической структуре процесса обслуживания (число приборов, порядок приоритетов, возможность ожидания и т. п.), а также по аналитическим предпосылкам входящего потока требований. К основным признакам СМО можно отнести наличие:

- входного потока заявок или требований (MS);
- каналов (одного или нескольких) обслуживания заявок;
- накопителей заявок в каналах обслуживания.

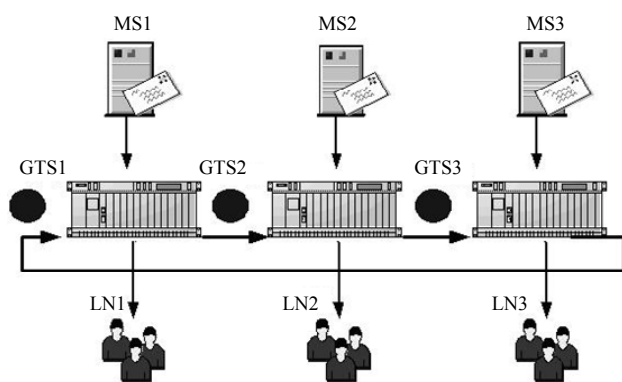


Рис. 1. Базовая структура модели системы таймирования

Основным параметром каналов обслуживания заявок является время их обслуживания, которое, как правило, является случайной величиной, основным же параметром накопителей заявок (место временного хранения заявок, нуждающихся в обслуживании) является их емкость, т. е. максимально возможное число заявок, одновременно находящихся в накопителе.

Основными устройствами системы таймирования являются генератор таймерных сообщений (ГТС) (см. рис. 1), изображенный в виде  $GTS_i$ , и приемник таймерных сообщений (ПТС).

Основными функциями ГТС являются:

- сбор таймерной информации;
- формирование таймерных сообщений;
- взаимодействие с другими ГТС путем обмена таймерными сообщениями по глобальной сети;
- взаимодействие по локальной сети с контроллерами оборудования (КО), которые непосредственно управляют технологическими процессами и осуществляют сбор информации.

Генератор таймерных систем включает в себя следующие функциональные блоки:

- контроллер таймерной сети (КТС) [3];
- преобразователь двоичного параллельного кода в последовательный код Manchester-II;
- буферную память (накопитель типа FIFO), в которую можно записать таймерные сообщения между технологическими циклами; она является также источником программируемых ТС.

Контроллер таймерной сети является узлом коммутации ТС. Он обрабатывает и распределяет входную таймерную информацию между глобальной и локальной магистралями.

Блоки ГТС имеют фиксированное время преобразования, поэтому в разрабатываемой модели учитываются как блоки фиксированной задержки. Модель содержит три активных объекта (генераторы ТС —  $GTS_1$ ,  $GTS_2$ ,  $GTS_3$ ), связанных между собой кольцевой глобальной магистралью. Каждый генератор имеет следующие входы и выходы:

- вход глобальной магистрали для таймерных сообщений от предыдущего генератора и вход,

связанный с соответствующим блоком MS для внешнего потока ТС;

- выход для транзитных сообщений на последующий генератор и выход на локальную радиальную магистраль  $LN_i$ .

Основная функция ПТС — декодирование таймерного сообщения в информацию, представляющую собой слово команд и слово данных.

Внешние потоки ТС задаются с помощью объекта Source (элементы  $MS_1$ — $MS_3$ ), из библиотеки пакета AnyLogic [4], который является источником ТС. Source задает:

- максимальное число генерируемых сообщений за один прогон модели;
- интервалы генерируемых сообщений, которые могут подчиняться закону распределения либо определяться расписанием;
- код сообщений для того, чтобы после возврата по кольцевой магистрали модели можно было эти сообщения исключить из оборота.

В процессе опытной эксплуатации первого сегмента системы таймирования на ускорительном комплексе ИФВЭ были получены экспериментальные данные распределения входных таймерных сообщений, поступающих на узлы системы таймирования в виде таймерных импульсов [1]. Эти данные фиксировались регистраторами таймерных сообщений, встроенными в КТС. Интервалы поступления таймерных сообщений носят переменный характер и в общем случае являются случайными величинами. По экспериментальным данным рассчитаны временные ряды, построена гистограмма распределения и определен закон распределения входного потока модели, имитирующего внешние таймерные сообщения.

На рис. 2 представлен график распределения входных таймерных сообщений. Полученный закон распределения может приписываться объектам IF1, IF2 и IF3 модели.

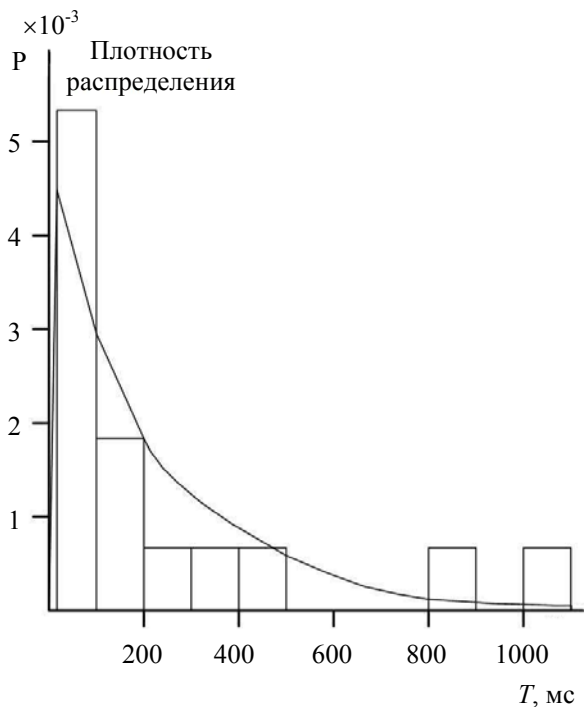


Рис. 2. Распределение входных таймерных сообщений

На рис. 3 представлена структурная схема одного из активных объектов модели GTS3. Большое разнообразие библиотечных объектов позволяет полностью смоделировать работу генератора таймерных сообщений.

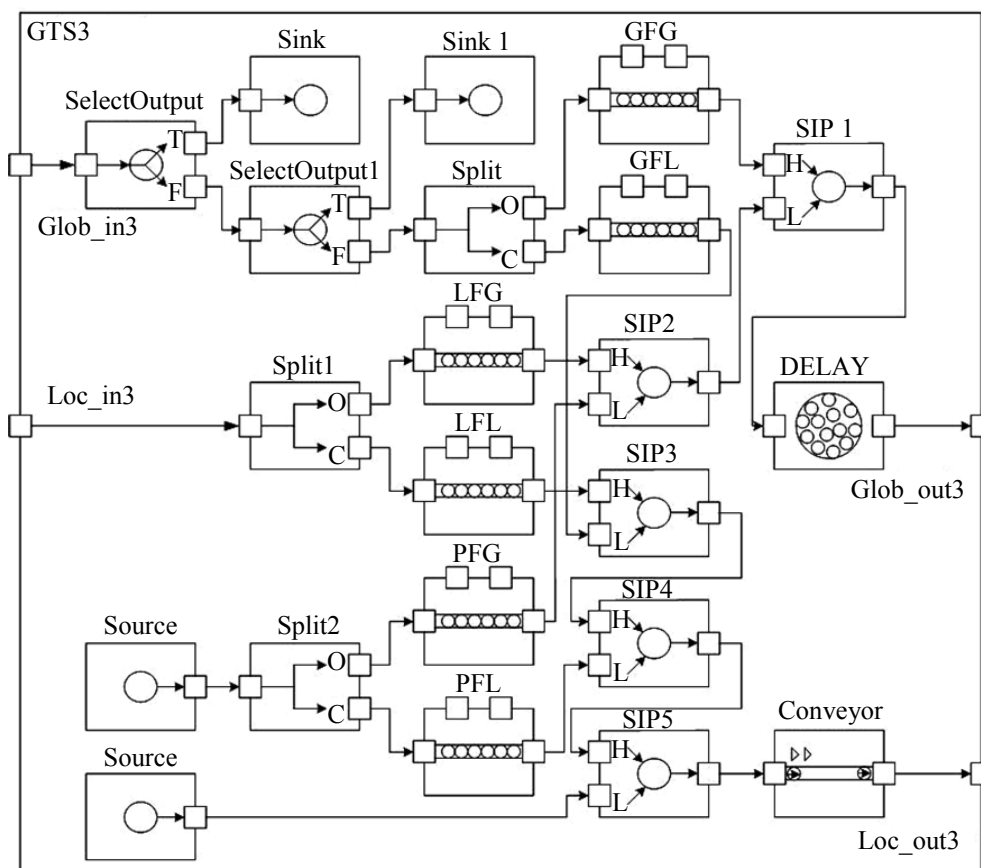


Рис. 3. Структурная схема модели ГТС

Алгоритм ГТС задается следующими объектами:

- Source — источник программируемых сообщений (source1 задает импульсы);
- Sink — уничтожает "свои" сообщения, вернувшиеся по глобальной магистрали;
- Split — задает копии сообщений для локальной и глобальной магистралей;

- SelectInput-Priority — соединяет сообщения, пришедшие из разных источников согласно заданному приоритету [3];
- SelectOutput — принимает сообщения из глобальной магистрали, а затем сортирует в зависимости от заданного условия

- ("свой" — уничтожить, "чужие" — пропустить);
- Queue — моделирует FIFO (блоки GFG, GFL, LFG, LFL, PFG, PFL);
  - Delay — задерживает сообщения на фиксированное время  $T_G$ ;
  - Conveyor — моделирует конвейер, задавая такт выдачи сообщений в локальную сеть.

### Исследования на базе имитационной модели

Пакет моделирования AnyLogic позволяет проводить с моделью эксперименты как простые, так и с варьируемыми параметрами [4]. Примем в качестве основного показателя эффективности работы системы допустимое время доставки таймерного сообщения ( $T_S$ ). Это время складывается из времени передачи по глобальной магистрали ( $T_G$ ) и времени обработки в каждом узле ( $T_{GTS}$ ) при направлении ТС в радиальную магистраль.

Таким образом, суммарное время доставки любого таймерного сообщения складывается из двух составляющих:

$$T_S = (N - 1) * T_G + T_{GTS}, \quad (1)$$

где  $N = 1, 2, 3, \dots, k$  — число узлов глобальной магистрали, через которые проходит маршрут сообщения.

При транспортировке по глобальной магистрали таймерному сообщению присвоен наивысший приоритет, поэтому величина  $T_G$  является фиксированной и определяется аппаратным протоколом стандарта MIL1553. При увеличении интенсивности  $\lambda$  потока ТС в блоках ГТС возникают очереди, буферная память объектов Queue начинает заполняться и, соответственно, начинает увеличиваться время  $T_{GTS}$ . В общем виде имеем

$$T_{GTS} = m * T_{ser}, \quad (2)$$

где  $T_{ser}$  — фиксированное время, определяемое только аппаратными возможностями канала обслуживания;

$m$  — глубина буферной памяти объектов Queue.

Для оценки допустимых значений  $T_S$ , соответствующих эффективной работе системы таймирования, воспользуемся выражениями и экспериментальными данными, приведенными в работе [3]. Введем обозначения:  $P_{loss}$  — вероятность потерь;  $Q$  — относительная пропускная способность канала обслуживания;  $\rho$  — коэффициент загрузки канала обслуживания, определяемый выражением  $\rho = \lambda T_{ser}$ .

Тогда получаем

$$P_{loss} = \rho^{m+1} (1 - \rho) / (1 - \rho^{m+2}); \quad (3)$$

$$Q = 1 - P_{loss} = \rho^{m+1} (1 - \rho) / (1 - \rho^{m+2}). \quad (4)$$

Из выражений (3) и (4) следует, что при увеличении глубины буферной памяти  $m$  уменьшается вероятность потерь и увеличивается относительная пропускная способность. Однако увеличение параметра  $m$  приводит к увеличению  $T_{GTS}$  (2) (при максимальном заполнении буферной памяти), что снижает достоверность ТС. Исходя из требований к системе таймирования со стороны технологического оборудования ускорительного комплекса и физической пропускной способности магистралей, общее время доставки  $T_S$  не должно превышать времени, соответствующего обработке 8 ТС ( $m \leq 8$ ). Кроме того, экспериментально установлена величина соотношения параметров  $T_{ser}/T_G \approx 3$ . Тогда выражение (1) можно переписать как

$$T_S = (N - 1) * (T_{ser}/3) + m T_{ser} \leq 8 T_{ser}. \quad (5)$$

Условие соблюдения этого неравенства используется при прогоне моделей как показатель эффективности работы системы, а переменные  $N$  и  $m$  — как параметры, изменяемые во время эксперимента и отличные от нуля. Упростив выражение (5), получим

$$N + 3m \leq 25. \quad (6)$$

Из выражения (6) видно, что когда нет доставки ТС по глобальной магистрали ( $N = 1$ ), допустимая глубина буферной памяти не должна превышать 8.

*Общие исходные данные для всех экспериментов.*

- время прогона модели — 100 единиц модельного времени;
- шаг по времени — 0,01;
- случайное начальное число (для уникального эксперимента);
- блоки MS1, MS2, ...,  $k$  генерируют сообщения, заданные экспоненциальным распределением или по расписанию;
- число сообщений, генерируемых каждым из MS1, MS2, ...,  $k$  за прогон модели, не должно превышать 16 (это соответствует конфигурации реального ГТС);
- интенсивность сообщений, заданная по умолчанию: потоки по глобальной сети — 2,56 сообщ./м.е. (сообщение за модельную единицу времени); потоки от источников IF — 0,8 сообщ./м.е.; суммарный поток от программируемой памяти всех GTS — 20,4 сообщ./м.е. [3];
- число прогонов в каждом эксперименте — 10.

Настройки для экспериментов формировались исходя из намеченных исследований.

В результате проведения экспериментов на созданной модели получено большое количество данных. В качестве примера опишем результаты эксперимента с предельными характеристиками.

Условия эксперимента: прогон модели с увеличенной интенсивностью ТС и числом ГТС:

- интенсивность сообщений как в эксперименте 3;
- число узлов  $N = 10$ ;
- поток таймерных сообщений задается экспоненциальным законом распределения.

Результаты экспериментов приведены в таблице.

Наименование буферной памяти FIFO	$m_L$ — глубина буферной памяти; $L$ — номер прогона модели ( $L = 1, 2, \dots, 10$ )									
	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$m_5$	$m_6$	$m_7$	$m_8$	$m_9$	$m_{10}$
GFG	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
GFL	5	5	5	4	5	5	5	4	5	5
LFG	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4
LFL	4	4	4	3	4	4	5	4	4	4
PFG	4	5	5	4	4	4	4	3	4	4
PFL	1	2	2	2	1	2	1	2	2	2

На рис. 4 изображен фрагмент работы FIFO (PFG) узла GTS3 модели.

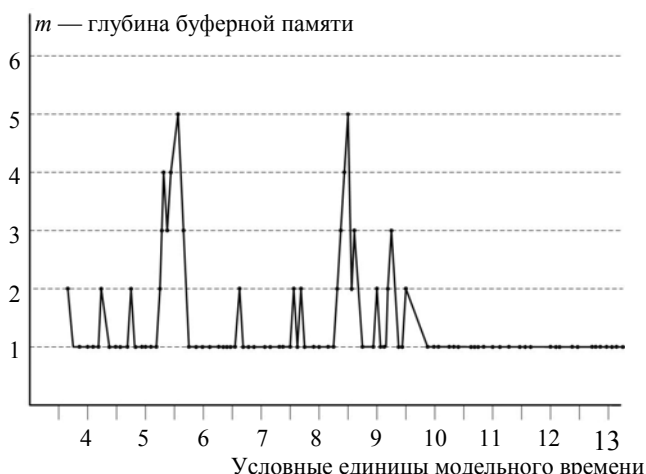


Рис. 4. Фрагмент графика работы FIFO (PFG) узла GTS3

Максимальное значение  $m = 5$ , что соответствует эффективной работе модели при заданном числе узлов [выражение (6)].

### Выводы

1. При значительном повышении интенсивности ТС (в 50 раз больше, чем задано по умолчанию) и существенном увеличении числа узлов (до 10) работа модели соответствовала показателям эффективной работы.

2. На снижение эффективности работы модели в большей степени влияет повышение интенсивности ТС, чем увеличение числа узлов.

3. Использование имитационного моделирования в задаче оценки вариантов структуры распределенной таймерной системы и влияния изменения различных параметров при заданных показателях работы представляет собой эффективный метод исследования системы.

4. Проведенные эксперименты на модели позволяют с большой достоверностью спрогнозировать успешную работу реальной системы таймирования как при проектной конфигурации и существующих условиях, так и при значительном увеличении числа узлов системы и интенсивности таймерных сообщений. Разработанная модель применима также в случае замены физической среды распространения ТС (витая пара на оптоволокно) без корректировки структуры модели.

5. Приведенная в работе имитационная модель может быть эффективно использована для разработки и анализа эффективности работы уже существующих физических комплексов, имеющих разветвленную систему управления и требующих синхронизации работы технологических процессов. Имитационную модель можно использовать при разработке систем синхронизации в технологических комплексах физики высоких энергий, физики плазмы.

6. Представленная имитационная модель была успешно апробирована на общей таймерной системе ускорительного комплекса У-70 ГИЦ ИФВЭ.

### Литература

1. Комаров В. В.// Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. 2005. № 5. С. 23.

2. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем. — М.: Высш. шк., 1998.

3. Коковин В. А., Комаров В. В.// Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. 2005. № 6. С. 15.

4. <http://www.xjtek.ru/anylogic/modeling-levels/>

Статья поступила в редакцию 28 июля 2006 г.

## The timing system simulation

*A. M. Galkin, V. A. Kokovin, N. V. Radomsky, P. U. Yusupaliev, S. A. Shuteyev*  
M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

*The development of simulation model for the timing system is in this article. The model is worked out with help of software package ANYLOGIC. This model allows to evaluate: maximum intensity of timing messages under number of commutation nodes and fixed timing messages processing time in each node; establishment of timing messages processing time at commutation nodes under different intensity of timing messages input flow; definition of utmost amount of commutation nodes under fixed number of input TM flow.*