

## ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ С ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИКОЙ

Голубенко М.А.

Кафедра ПМИИ, ДонНТУ  
michael@r5.dgtu.donetsk.ua

### **Abstract**

*Golubenko M.A. Organization of System for Logic Simulation of Digital Devices with a Programmable Logic. The object-oriented program system for logic simulation of digital devices with a programmable logic is offered. Basic descriptions, data structures and system structure are brought.*

### **Введение**

При изготовлении и эксплуатации цифровых устройств (ЦУ) требуется иметь средства проверки правильности их функционирования. Одним из таких средств являются проверяющие тесты. При построении и анализе тестов широкое применение находит моделирование на логическом уровне [1]. Цель логического моделирования состоит в том, чтобы выполнить функцию проектируемой схемы без ее физической реализации. В случае, когда какие-либо изменения схемы после ее изготовления сделать нелегко, как в схемах, выполненных в виде СБИС, логическое моделирование оказывается эффективным инструментом для проверки правильности или верификации проекта [2]. Анализ современных систем описания и моделирования проектов ЦУ в [3] показывает актуальность проблемы быстрого и адекватного логического моделирования проектов ЦУ. Для повышения быстродействия и облегчения процесса моделирования схем перспективным является применение объектно-ориентированного подхода, за счет использования методов классов, а также свойств инкапсуляции, наследования и полиморфизма объектов моделирования.

### **1. Назначение системы логического моделирования.**

Логическое моделирование заключается в построении математической модели исследуемого устройства – системы соотношений, описывающей поведение этого устройства с заданной точностью, и последующем анализе поведения этой модели по ее реакции на входные воздействия.

Система логического моделирования (СЛМ) входит в состав системы автоматизированного проектирования ЦУ (САПР ЦУ). С помощью моделирования в САПР ЦУ решаются задачи проверки правильности логического функционирования ЦУ. Логическое моделирование проводится на уровне логических элементов. При таком моделировании оказывается возможным обрабатывать значения сигналов и задержки на логических элементах, в связи с чем моделирование на этом уровне применяют для детального моделирования схем, например, для временного анализа.

Система логического моделирования СЛМ-ПРОЛИС входит в состав САПР ПРОЛИС. Исходными данными для СЛМ-ПРОЛИС является модель устройства, которая передается из конструктора описаний проектов ЦУ [4] в виде, подготовленном к проведению моделирования.

Процесс моделирования ЦУ на персональной ЭВМ является трудоемким и занимает много времени. Для разрешения этой проблемы моделирование может проводиться в компьютерных сетях. В случае распределенного моделирования модель ЦУ разделяется на блоки, каждый из которых моделируется на отдельной ЭВМ. Благодаря применению объектно-ориентированного подхода моделирование выглядит единообразно как при проведении его на отдельной ЭВМ, так и в компьютерной сети. При моделировании в сети ЭВМ система моделирования СЛМ-ПРОЛИС работает через систему коммуникации, которая обеспечивает взаимодействие распределенных блоков устройства. При локальном моделировании устройства система коммуникации не приводится в рабочее состояние. Таким образом, СЛМ-ПРОЛИС функционирует единообразно, сетевое взаимодействие обеспечивается системой коммуникации.

## **2. Характеристики системы логического моделирования**

Основными характеристиками алгоритмов моделирования являются адекватность, быстродействие и объем памяти, необходимый при реализации. Под адекватностью понимается степень соответствия результатов моделирования истинному поведению исследуемого ЦУ. Для комбинационных устройств алгоритмы моделирования гарантируют полную адекватность с установленными значениями сигналов. Поведение последовательностных ЦУ в общем случае неоднозначно из-за неопределенности начальных состояний и состязаний между сигналами [1].

**Адекватность моделирования.** Адекватность моделирования зависит в основном от принятой модели устройства, моделей элементов и сигналов, способов учета временных соотношений между сигналами. Как правило, повышение степени адекватности связано со снижением быстродействия и увеличением требуемого объема памяти, поскольку усложнение модели ведет к увеличению ее объема и времени обработки. Наиболее быстрыми являются алгоритмы двоичного моделирования без учета задержек, где реальный порядок срабатывания элементов не принимается во внимание. Существенно ниже быстродействие алгоритмов двоичного моделирования с учетом номинальных задержек элементов. Во многих случаях необходимо принимать во внимание не только номинальные значения задержек, но и их разброс. Быстродействие таких алгоритмов, как правило, еще ниже [1].

В СЛМ-ПРОЛИС моделирование проводится как с учетом, так и без учета номинальных задержек логических элементов.

**Модель устройства.** Модель ЦУ представляет собой систему соотношений, в некотором приближении описывающих это ЦУ. Различают функциональные и структурные модели ДУ.

В СЛМ-ПРОЛИС устройство представляется структурной моделью, в которой выделяется 4 уровня иерархии: корпус микросхемы, блок, макроячейка и функциональный базовый элемент (ФБЭ) [5].

**Модели элементов.** В СЛМ-ПРОЛИС используются функциональные и структурные модели элементов ЦУ. В функциональных моделях отсутствуют сведения о внутренней структуре элемента, то есть он представляется в виде "черного ящика", в СЛМ-ПРОЛИС таким образом представлены ФБЭ. Структурная модель представляется логической сетью, которая задается перечислением входов, выходов и элементов, а также связей между ними. В СЛМ-ПРОЛИС таким образом представляются макроячейки, блоки и корпуса микросхем.

Моделирование ЦУ сводится к моделированию отдельных логических элементов. Простейшей моделью логического элемента комбинационного базиса (И,

НЕ-И, НЕ-ИЛИ и др.) является таблица истинности булевой функции, реализуемой этим элементом. Вторым распространенным методом построения моделей является составление программы с помощью логических операторов ассемблера или языка высокого уровня непосредственно по логическому выражению булевой функции. Применяется также алгоритмический метод построения модели, при котором функционирование элемента задается с помощью некоторого алгоритма. При построении моделей применяются также альтернативные графы, бинарные диаграммы и тому подобное.

В СЛМ-ПРОЛИС функциональная модель элемента задается с помощью таблицы истинности или алгоритма (в частном случае, формулы), который задается на языке описания функционирования логического элемента, а также с помощью конструктора описаний.

**Модели сигналов.** СЛМ-ПРОЛИС использует алфавит моделирования, который задается пользователем при описании устройства в конструкторе описаний [4]. Моделирование проводится в многозначных алфавитах.

**Сходимость моделирования.** Поскольку процесс моделирования представляет собой итерационный процесс, то существует возможность не сходимости процесса. Моделирование в СЛМ-ПРОЛИС прекращается при достижении установившихся значений на выходах элементов схемы (естественное завершение) или при достижении заданного граничного времени моделирования (принудительное завершение), что позволяет прервать не сходящийся итерационный процесс.

**Управление процессом моделирования.** В зависимости от порядка обработки элементов ЦУ различают методы сквозного (сплошного) и событийного моделирования. При сквозном моделировании для текущего входного воздействия вычисляются в определенной последовательности значения выходных сигналов всех элементов ЦУ. При событийном методе моделирования обрабатываются только те элементы, значения входных сигналов которых изменяются, и только в те моменты модельного времени, когда происходит это изменение. Последнее условие существенно для алгоритмов асинхронного моделирования с различными задержками элементов. Быстродействие алгоритма событийного моделирования выше, так как в каждый момент модельного времени активны, то есть имеют изменения на входах, в среднем лишь несколько процентов логических элементов. Событийное моделирование может быть как компилятивным, так и интерпретативным.

Асинхронное событийное моделирование с номинальными задержками реализуется только интерпретативно [6].

СЛМ-ПРОЛИС поддерживает асинхронное моделирование. Имеется возможность проведения нескольких видов моделирования:

- сквозного: этот вид моделирования является неэффективным, так как требует большого расхода памяти и обладает низкой скоростью, поскольку по различным оценкам в каждом такте доля активных элементов при асинхронном моделировании составляет от 1 до 2,5% [1], следовательно, подавляющая часть времени расходуется непроизводительно;

- событийного компилятивного: этот вид моделирования применяется в случае равенства задержек всех элементов схемы;

- событийное интерпретативное: используется при произвольном соотношении задержек элементов.

### 3. Структура системы логического моделирования

Схема программной системы логического моделирования СЛМ-ПРОЛИС приведена на рис. 1.

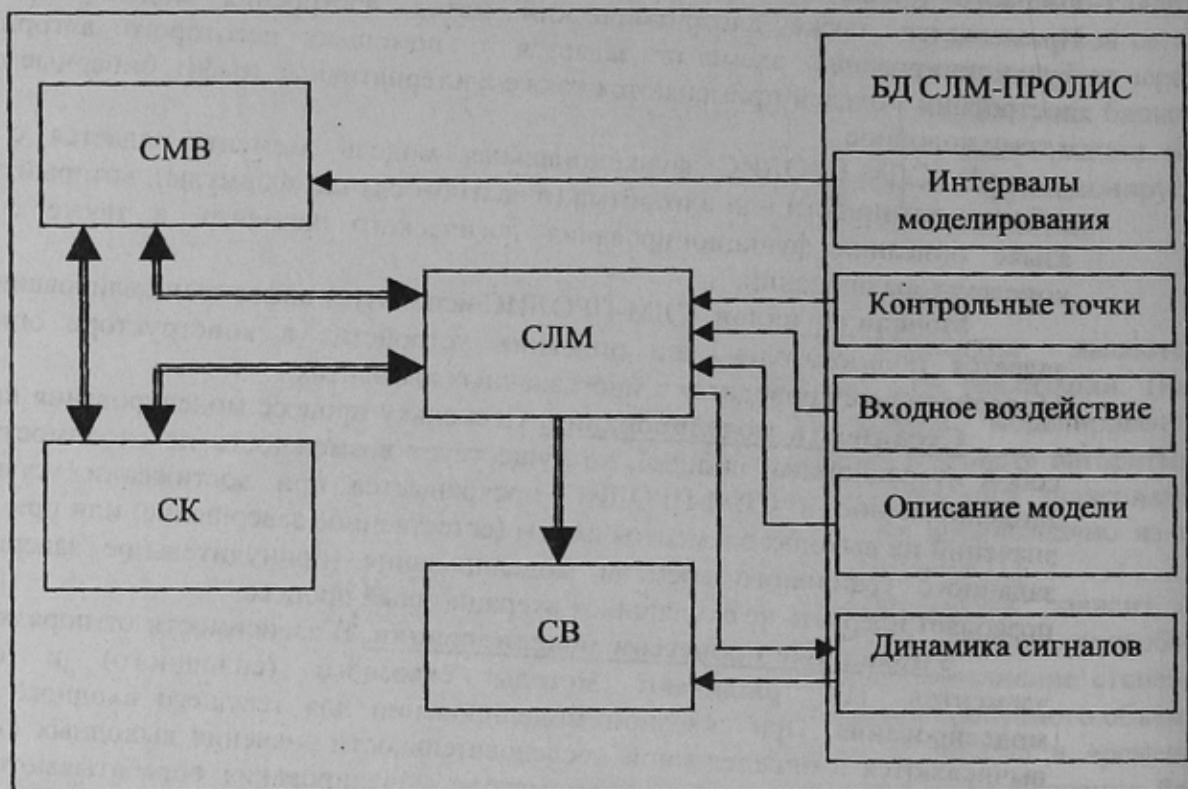


Рисунок 1 – Схема программной системы логического моделирования СЛМ-ПРОЛИС

Система логического моделирования (СЛМ) работает в комплексе с системой управления модельным временем (СМВ), системой коммуникации (СК) и системой визуализации результатов моделирования (СВ).

Система логического моделирования обеспечивает непосредственное моделирование ЦУ, то есть выполняет алгоритмы сквозного, событийного компилятивного и событийного интерпретативного моделирования. Исходными данными для СЛМ являются модель ЦУ, переданная из конструктора описаний, входное воздействие и список контрольных точек (сигнальных линий, динамику сигналов на которых требуется отслеживать в процессе моделирования). Результатом работы СЛМ являются таблицы, содержащие информацию о динамике сигналов в контрольных точках схемы. Управление после завершения моделирования от СЛМ передается системе визуализации результатов.

Система управления модельным временем предназначена для контроля времени при распределенном моделировании. Исходными данными для СМВ является интервал моделирования. В ее функции входит отслеживание локального и глобального времени моделирования. В случае локального моделирования СМВ выступает как составляющая часть СЛМ и не имеет специальных функций.

Система коммуникации предназначена для передачи сигналов моделирования между блоками схемы, которые моделируются на отдельных ЭВМ. Также СК передает

информацию об изменении локальных времен моделирования и необходимости откатов в случае оптимистического распределенного моделирования.

Функцией системы визуализации является предоставление результатов моделирования пользователю в наглядном виде (таблицы, графики и др.).

#### 4. Основные структуры данных системы логического моделирования

В системе моделирования СЛМ-ПРОЛИС используются несколько структур данных, отвечающих требованиям моделирования, однако все эти структуры связаны с табличным способом описания схемы, приведенным на рис.2. Описание схемы основывается на таблицах:

- TEL, TTEL – описание элементов и их типов;
- TFUN – описание функций логических элементов;
- TVX, TVI – описание входов и выходов элементов;
- TSIG – описание сигнальных линий;
- TFEL – описание влияний сигналов на логические элементы;
- OUTVV – описание входного воздействия;
- TINT – описание интервалов моделирования;
- Tss – список событий;
- Tae – список активных элементов.

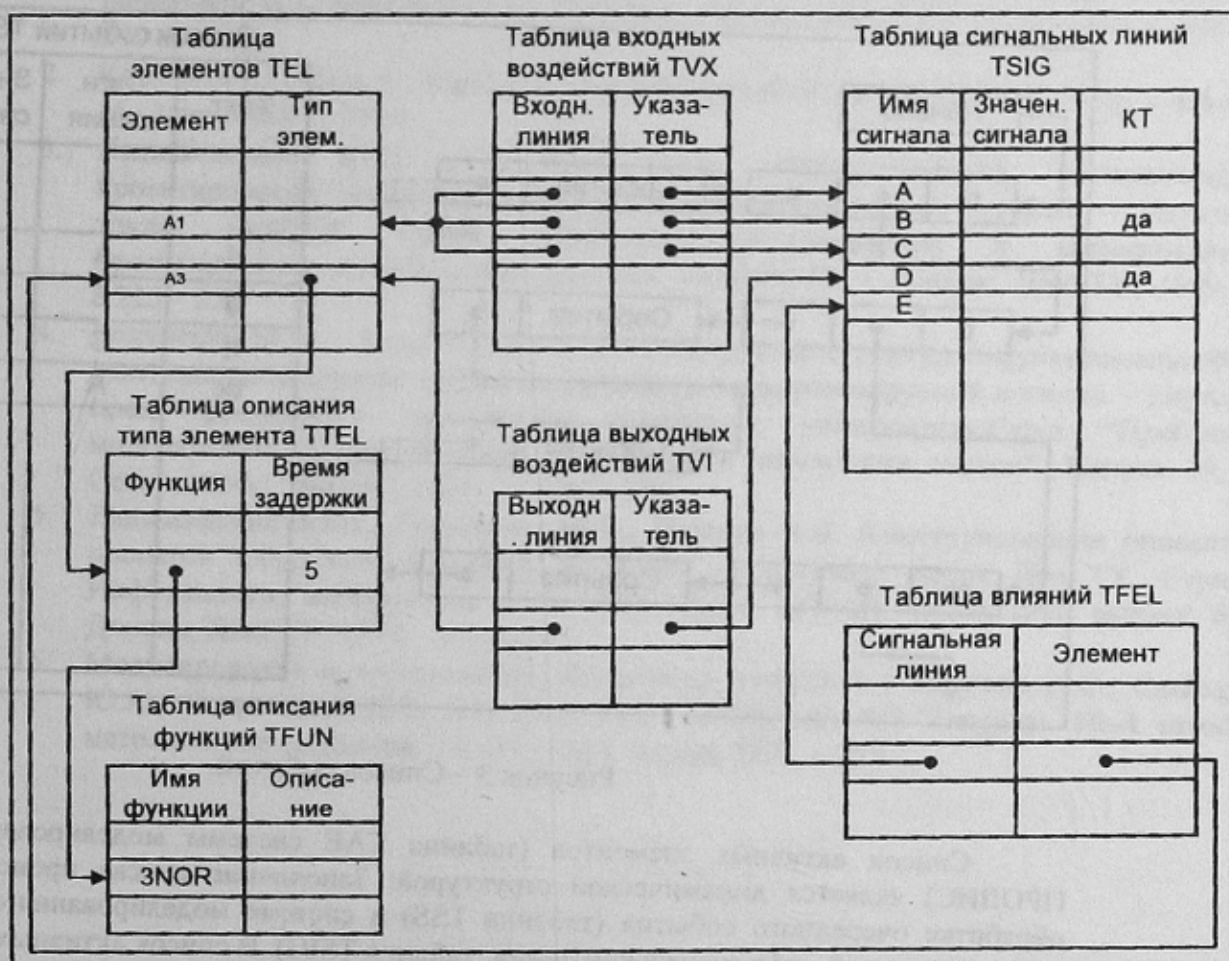


Рисунок 2 – Фрагмент табличного описания схемы

Поскольку для описания схемы используются таблицы, такой способ описания носит название табличного задания. Таблицы составляют базу данных системы моделирования. Таблицы TEL, TTEL, TFUN, TVX, TVI, TSIG, TFEL, OUTVV, TINT передаются в систему моделирования из конструктора имитационной модели, таблицы TSS и TAE формируются в процессе работы системы моделирования.

В событийном моделировании если значение сигнала S1 в момент времени  $t$  отличается от значения S в предшествующий момент, то есть при появлении события, то предполагается, что изменение происходит в момент времени  $t + dt$ , где  $dt$  представляет собой задержку распространения в элементе. Для описания появления событий с течением времени используется линейный список по типу, представленному на рис.3. Этот список носит название списка событий. Вертикальные указатели в списке определяют последовательность моментов времени, горизонтальные указатели соединяют моменты времени с появившимися событиями.

Каждый раз, когда появляется новое событие, оно регистрируется как событие, связанное с определенным моментом времени, однако появление намеченных моментов времени при моделировании не подчиняется временному ряду.

В СЛМ-ПРОЛИС этот список событий реализован в виде таблицы TSS, что снимает проблему упорядочивания событий по времени их появления. События в таблице TSS упорядочены по моменту возникновения в системе. На рисунке 3 приведено отображения списка событий в таблицу TSS системы моделирования.

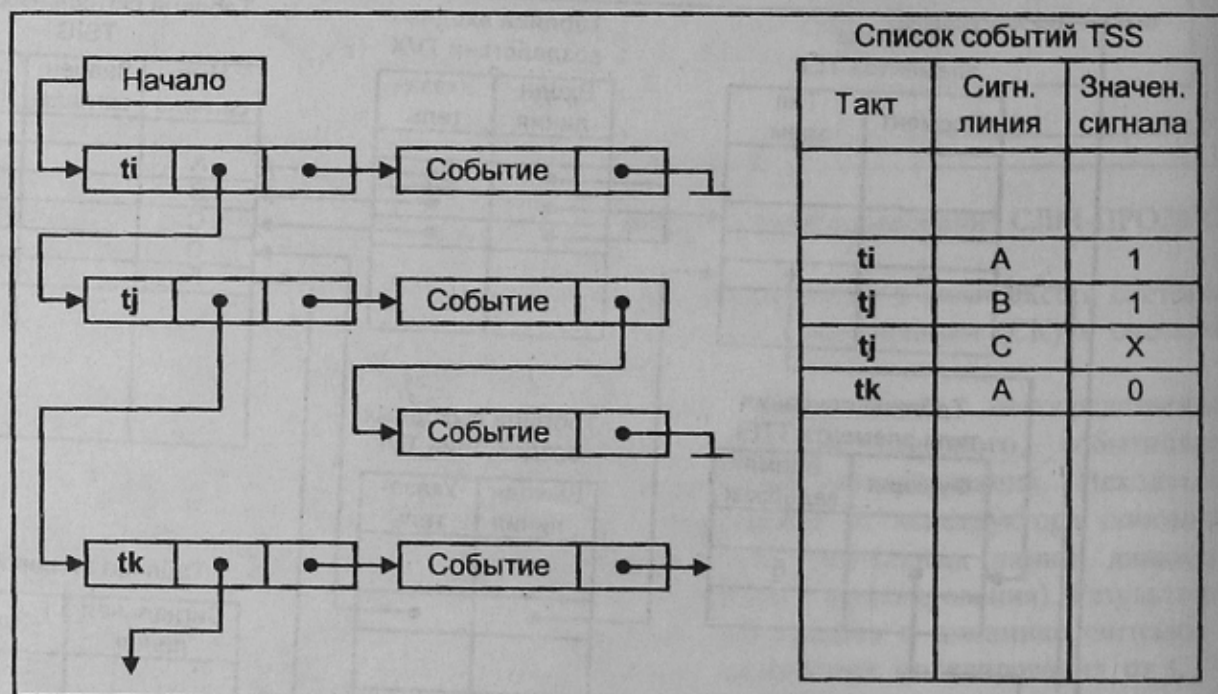


Рисунок 3 – Список событий.

Список активных элементов (таблица TAE системы моделирования СЛМ-ПРОЛИС) является динамической структурой. Заполнение списка происходит при обработке очередного события (таблица TSS) в системе моделирования (изменения сигнала на какой-либо сигнальной линии, таблица TSIG). В список активных элементов вносятся все элементы, которые связаны с этой линией (таблица TFEL). При

последовательном моделировании активных элементов список событий (таблица TSS) пополняется новыми событиями, сгенерированными в результате моделирования очередного логического элемента.

Список событий является ключевой структурой данных при проведении моделирования. Этот список используется для визуализации результатов моделирования. С помощью списка событий имеется возможность проведения откатов при оптимистическом распределенном моделировании, а также возобновления моделирования с заданного момента времени.

### **Заклучение**

Рассмотренная система предназначена для моделирования проектов цифровых устройства в сети ЭВМ. В системе реализованы алгоритмы асинхронного моделирования цифровых устройств: сквозного, событийного компилятивного, событийного интерпретативного. Применение объектно-ориентированного подхода позволяет использовать систему логического моделирования единообразно как для моделирования на локальном рабочем месте, так и при распределенном логическом моделировании частей устройства в локальной сети.

### **Литература**

1. Автоматизированное проектирование цифровых устройств / С.С.Бадулин, Ю.М. Барнаулов, В.А. Бердышев и др.; Под ред. С.С.Бадулина. - М.: Радио и связь, 1981. - 240 с.
2. Киносита К., Асада К., Карацу О. Логическое проектирование СБИС: Пер. с япон. - М.: Мир, 1988. - 309 с.
3. Ладыженский Ю.В., Голубенко М.А. Инструментарий автоматизации проектирования цифровых устройств с программируемой логикой. - Научные труды ДонГТУ. Серия «Проблемы моделирования и автоматизации проектирования динамических систем». Выпуск 10: - Донецк, ДонГТУ, 1999. - с.223 - 230
4. Голубенко М.А., Ладыженский Ю.В. Конструктор структурно-функциональной и имитационной модели цифровых устройств с программируемой логикой. - Наукові праці Донецького державного технічного університету.Серія "Проблеми моделювання та автоматизації проектування динамічних систем". Випуск 29. - Севастополь: "Вебер", 2001. - с. 180 - 185
5. Ладыженский Ю.В., Голубенко М.А., Ищенко В.В. Конструирование описаний проектов цифровых устройств на ПЛИС - Научные труды ДонГТУ. Серия: Информатика, кибернетика и вычислительная техника, (ИКВТ-99), выпуск 6:- Донецк, ДонГТУ, 1999. - с.276-281
6. Моделирование и тестирование дискретных устройств / Барашко А.С., Скобцов Ю.А., Сперанский Д.В. Отв. ред. А.М. Богомолов; АН Украины. Ин-т прикл. математики и механики. - Киев.: Наук. думка, 1992. - 288 с.