

Посвящаю моей жене, Татьяне Серафимовне,  
верному другу и помощнику

## Предисловие

Все схемы цифровой аппаратуры можно разделить на два больших класса: комбинационные и последовательные. Комбинационные схемы не имеют памяти, поэтому выходы комбинационных схем непосредственно зависят от входов, т. е. каждый входной вектор однозначно определяет значение выходного вектора. Последовательные схемы имеют память. Благодаря этому выходной вектор последовательной схемы зависит от всей последовательности входных векторов, поступающих на вход с момента начала ее работы. Конечный автомат является математической моделью последовательных схем.

Разработчики цифровой аппаратуры часто сталкиваются с необходимостью проектирования конечных автоматов, поскольку любая последовательная схема может быть представлена в виде конечного автомата. Более того, любая цифровая система теоретически может быть представлена в виде конечного автомата. Другими словами, конечный автомат — это универсальная технология проектирования и моделирования последовательных схем.

В цифровых устройствах и системах конечные автоматы чаще всего исполняют роль устройств управления или контроллеров. Поскольку большинство цифровых устройств и систем имеют устройства управления, конечные автоматы очень широко используются в цифровой аппаратуре. Более того, многие цифровые системы и устройства как раз и отличаются своими устройствами управления. Поэтому при разработке каждого нового проекта остро стоит вопрос проектирования конечных автоматов.

В настоящее время наблюдается разрыв между теорией и практикой проектирования конечных автоматов. В технических университетах студентам преподаются только основы теории конечных автоматов, а инженерам-практикам нет времени разбираться в многообразии предлагаемых научным сообществом методов синтеза конечных автоматов.

Данная книга является попыткой устранить этот пробел. Автор имеет многолетний опыт в проектировании конечных автоматов на современной элементной базе, им предложено большое количество методов оптимизации стоимости реализации, увеличения быстродействия и уменьшения потребляемой мощности конечных автоматов. Однако в предлагаемой книге читатель не увидит изопренных формул и сложных алгоритмов. Изложение материала ведется предельно просто на языке, понятному обычному инженеру.

В книге объясняются основные моменты в проектировании конечных автоматов с минимальным использованием теоретических выкладок, со строгой ориентацией на практическое использование. Большое внимание в книге уделяется представлению конечных автоматов на языках описания аппаратуры (hardware description language — HDL). В книге освещаются вопросы кодирования состояний конечных автоматов, а также использование значений входных и выходных переменных для кодирования состояний конечного автомата.

В данной книге представлены следующие новые результаты в теории и практике проектирования конечных автоматов:

- показано различие в функционировании конечных автоматов Мили и Мура, которые реализуют один и тот же алгоритм логического управления;
- показано, что стили описания конечных автоматов с 3, 2 и одним процессом, которые часто упоминаются в литературе, очень слабо влияют на параметры синтезируемого конечного автомата;
- представлены разнообразные способы описания конечных автоматов на языках Verilog, SystemVerilog и VHDL, которые позволяют значительно увеличить быстродействие и уменьшить стоимость реализации конечных автоматов, а также улучшить читабельность исходного кода;
- предложены новые способы и методы кодирования состояний конечных автоматов, которые позволяют существенно улучшить параметры конечных автоматов (площадь, быстродействие и потребляемую мощность);
- продемонстрировано практическое применение методов синтеза конечных автоматов, которые используют значения входных и выходных переменных в качестве кодов состояний; в результате значительно уменьшается стоимость реализации и увеличивается быстродействие синтезируемых конечных автоматов.

Книга содержит 12 глав.

Глава 1 является вводной. В ней дается ответ на вопрос: что такое конечный автомат. Определяются автоматы Мили и Мура, приводится определение состояния конечного автомата, рассматриваются традиционные и базовые структурные модели конечных автоматов. Показано место конечных автоматов в традиционной методике проектирования цифровых устройств, когда проект представляется в виде операционного и управляющего устройств. Приведена методика проектирования конечных автоматов Мили и Мура по граф-схеме алгоритма. При этом внимание концентрируется на проблемах, с которыми сталкивается инженер при проектировании устройств управления. В конце указывается на место конечных автоматов в цифровой аппаратуре и на дальнейшее развитие теории конечных автоматов.

Прежде чем спроектировать конечный автомат, его необходимо как-то представить. Поэтому в главе 2 рассматриваются способы представления

конечных автоматов, которые наиболее часто используются на практике: графы автоматов, таблицы переходов и выходов, списки переходов, язык алгоритмических конечных автоматов (algorithmic state machine — ASM), а также формат KIS2. В конце дается анализ различных способов представления конечных автоматов и пример конечного автомата, который далее используется в настоящей книге.

На практике каждый конечный автомат реализуется «в железе». В главе 3 рассматривается современная элементная база цифровых систем, частью которых являются конечные автоматы. Знание архитектур электронных компонентов необходимо для правильного выбора метода синтеза конечного автомата, а также для возможности оценки его быстродействия и стоимости реализации. В главе 3 рассматриваются электронные компоненты, на которых (или в которых) реализуются конечные автоматы. Элементная база цифровых устройств значительно изменилась за последние несколько десятилетий: уже не используются элементы малой и средней степени интеграции, однако появились новые программируемые пользователем электронные компоненты (CPLD, FPGA, SoC), архитектуру которых следует учитывать при синтезе конечных автоматов. В главе также обсуждается память электронных компонентов и реализация конечных автоматов в блоках встроеной памяти. В дальнейшем особое внимание будет уделено реализации конечных автоматов в программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС — FPGA — field programmable gate array).

В настоящее время проектирование цифровых систем, как правило, выполняется с использованием программных средств проектирования. Чтобы правильно использовать средства проектирования, важно понимать, что в них происходит с проектом конечного автомата. В главе 4 рассматриваются методы синтеза, используемые в промышленных средствах проектирования, на примере системы Quartus от Intel. Основными этапами проектирования, выполняемыми средством проектирования, являются логический и физический синтезы. В главе кратко описываются методы логического синтеза (двухуровневый и многоуровневый синтез, декомпозиция булевых функций), а также этапы и методы физического синтеза.

Следующие шесть глав посвящены представлению конечных автоматов на языках описания аппаратуры (HDL — hardware description language). Дело в том, что разработчик должен хорошо владеть языком описания аппаратуры и правильно использовать его конструкции для представления исходного кода конечного автомата.

В главе 5 рассматриваются конструкции языка Verilog для описания конечных автоматов. В данной главе приведена типичная структура кода проекта на языке Verilog для синтеза, а также представлены основные операторы языка Verilog, которые используются в описаниях конечных автоматов. Читатель, хорошо знакомый с языком Verilog, может эту главу пропустить.

В главе 6 приводятся стили описания конечных автоматов на языке Verilog. Представлены следующие стили описания конечных автоматов Мили

и Мура на языке Verilog: с тремя процессами, с двумя процессами и с одним процессом. Более подробно рассматриваются традиционные проекты конечных автоматов с тремя процессами. Сравняются результаты функционального моделирования автоматов Мили и Мура для одного и того же алгоритма логического управления. Показано, что это разные автоматы. В конце главы дается анализ временных диаграмм, а также приводится анализ параметров рассмотренных стилей описания конечных автоматов.

Глава 7 посвящена описанию конечных автоматов на языке SystemVerilog. Язык SystemVerilog полностью наследует язык Verilog и предоставляет новые возможности для разработки больших и сложных проектов на самых верхних уровнях проектирования: системном, абстрактном и уровне транзакций. Кроме того, язык SystemVerilog включает новые языковые конструкции для описания конечных автоматов. В главе 7 рассматриваются особенности использования новых конструкций языка SystemVerilog для описания конечных автоматов.

В главе 8 исследуются стили и способы описания конечных автоматов на языке Verilog, которые могут быть также использованы в языке SystemVerilog. Рассматриваются некоторые полезные стили и способы описания конечных автоматов, которые разработчики наиболее часто применяют на практике. В конце дается анализ рассмотренных описаний конечных автоматов, который показывает, что некоторые способы описания позволяют увеличить быстродействие конечного автомата более чем в 4 раза.

В главе 9 рассматриваются конструкции языка VHDL, используемые для описания конечных автоматов. Указывается на аналогичные конструкции в языках Verilog и SystemVerilog. Язык VHDL предназначен для описания цифровых систем с целью синтеза и моделирования, а также документирования проектов, передаваемых между различными группами разработчиков. Поэтому языку VHDL присуща некоторая избыточность в описании проектов, по сравнению с языками Verilog и SystemVerilog. Читатель, хорошо знакомый с языком VHDL, может эту главу пропустить.

Глава 10 посвящена описанию конечных автоматов на языке VHDL. Рассматриваются различные стили и способы описания конечных автоматов на языке VHDL. В конце главы приводится анализ рассмотренных описаний, а также даются рекомендации по практическому использованию различных описаний конечных автоматов, которые касаются не только языка VHDL, но также языков Verilog и SystemVerilog.

В главе 11 рассматривается задача кодирования состояний конечных автоматов. Указывается на сложность этой задачи, представлены популярные коды, которые используются для кодирования состояний конечных автоматов. На примере автомата Мура подробно анализируются способы кодирования состояний конечных автоматов, предоставляемые системой проектирования Quartus. Особо отмечаются моменты, когда используемое кодирование состояний конечного автомата не соответствует ожидаемому результату. Представлен анализ применения способов кодирования состояний для

автоматов Мура и Мили. Отмечается разнообразие подходов к решению задачи кодирования состояний конечных автоматов, приводится классификация методов кодирования состояний конечных автоматов, дается характеристика каждой группы методов. В качестве примера рассматривается простой алгоритм кодирования состояний для минимизации площади конечного автомата.

В главе 12 показано использование значений входных и выходных переменных для кодирования состояний конечного автомата. В главе 1 была дана классификация структурных моделей конечных автоматов. Согласно этой классификации все конечные автоматы можно разделить на шесть классов: А, В, С, D, Е и F. Особенностью автоматов классов С, D, Е и F является то, что входные или выходные векторы совпадают с кодами состояний. Другими словами, значения входных или выходных переменных определяют коды состояний конечного автомата. В главе 12 на практических примерах рассматриваются методы синтеза автоматов классов С–F с расщеплением и без расщепления состояний. Для каждой структурной модели конечных автоматов приводится нижняя и верхняя граница стоимости реализации на FPGA. В конце дается анализ структурных моделей конечных автоматов, а также представлен анализ рассмотренных методов проектирования конечных автоматов

Каждая глава заканчивается выводами. В выводах в краткой форме излагаются основные положения, рассматриваемые в данной главе, подводятся главные итоги, приводятся наиболее значимые результаты исследований, внимание читателя акцентируется на особо важных моментах, которые могли быть упущены во время прочтения главы. Материал книги сопровождается большим количеством примеров, результатами их синтеза и моделирования.

Книга в первую очередь предназначена для инженеров-практиков, а также студентов соответствующих специальностей технических университетов. Материал книги может быть использован преподавателями для чтения лекций, проведения лабораторных и практических занятий. Многие вопросы, рассматриваемые в книге, еще не до конца исследованы, поэтому могут быть интересны аспирантам и молодым ученым. Книга также может использоваться разработчиками в качестве самоучителя для изучения различных вопросов проектирования конечных автоматов. Некоторые темы и результаты, излагаемые в книге, являются достаточно новыми и могут быть интересны опытным разработчикам.

Научные исследования, результаты которых вошли в данную книгу, частично финансировались грантом WZ/WI-III/5/2023 Белостокского технологического университета из ресурсов для научных исследований Министерства науки и высшего образования Республики Польша.