

ПРОБЛЕМЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОДХОДА В ПРОЕКТИРОВАНИИ САМОСИНХРОННЫХ СХЕМ

Л.П.Плеханов

1. Введение

В статье рассматриваются схемы, относящиеся к полумодулярным по Маллеру – строго самосинхронные схемы (ССС-схемы).

Традиционно сложилось так, что методы проектирования СССР-схем основываются на представлении в виде изменений значений переменных схемы – событий. В работах Д.Маллера [1] и других использовались диаграммы переходов (ДП) – изменения полных состояний, то есть наборов значений всех переменных. В.И.Варшавский с сотрудниками применили более компактное представление – диаграммы изменений (ДИ) [2], где указывается только та переменная, которая изменяется в текущем событии. Развиваются также и представления в виде сетей Петри. Такой подход далее будем называть событийным.

Методы исследования СССР-схем в событийном подходе так или иначе основаны на теории полумодулярности Маллера. Исходным описанием является замкнутая система логических уравнений – модель Маллера. Исследуется процесс, заданный таким описанием.

Функциональный подход был использован В.И.Варшавским для построения теории индицируемости комбинационных СССР-схем [3]. Однако это направление далее осталось без развития.

Рассмотрим особенности функционального подхода в сравнении с событийным. С общих позиций эти особенности рассмотрены ранее в [4]. Опыт, полученный после этой публикации, позволяет сделать более подробное сравнение.

2. Особенности функционального подхода

Цифровая электронная схема представляет собой устройство преобразования информации, и наличие входов и выходов для нее является необходимым атрибутом. Для событийного подхода, однако, существенным условием выступает замкнутость описания. Она необходима для обеспечения бесконечного циклического изменения состояний, что диктуется условием полумодулярности [1]. Схемы в таких описаниях не имеют ни входов, ни выходов, что, вообще говоря, выглядит неестественно.

В функциональном подходе, в противоположность событийному, существенно используются описания в виде логических функций. Такой подход более понятен и привычен большинству разработчиков электронных схем. При нем сохраняются входы и выходы схемы, легко обеспечивается связь с базовыми и библиотечными элементами, из которых будет изготовлена схема.

В рамках событийного подхода доказана возможность построения СССР-схем из элементов типов И-НЕ, ИЛИ-НЕ, а также типов И-ИЛИ-НЕ и ИЛИ-И-НЕ [3]. Но важнейший для практики "обратный" вопрос – на каких элементах нельзя строить СССР-схемы – не исследован. Этот вопрос связан с выбором элементов для реализации СССР-схем из большого количества библиотечных элементов, предлагаемых производителями микросхем.

Рассмотрение данного вопроса с функциональных, а также технологических позиций позволило найти такие ограничения. Кроме того, был выявлен целый класс библиотечных элементов, пригодных для реализации ССС-схем, не замеченный ранее.

Основными объектами описания и исследования в событийном подходе являются события и их свойства в заданной схеме. События – объекты из "сжатой" временной области, в которой сохранен только порядок следования; это порождает еще один большой недостаток подхода. Такие важные понятия проектирования схем, как быстроедействие и затраты реализации, не относящиеся к событийным, остаются "за бортом" подхода. Их очень сложно учитывать и проводить оптимизацию.

В силу максимальной общности и, как следствие, абстрактности методов событийного подхода, в замкнутых схемах теряют смысл такие основополагающие понятия разработки ССС-схем, как промежуточная фаза (спейсер) и рабочая фаза.

Еще одним важным фактором практического проектирования является модульность – возможность построения сложных схем из более простых частей. В этом вопросе функциональный подход радикально превосходит событийный.

3. Проблемы анализа

Трудности анализа ССС-схем на строгую самосинхронность состоят в том, что это свойство является свойством схемы в целом. Изменение какой-либо ее части требует обязательной проверки всей схемы.

Большую практическую трудность при анализе представляет необходимость перебора начальных состояний схемы.

В теоретических работах Д.Маллера и В.И.Варшавского вопрос о выборе начальных состояний не рассматривается. Считается, что начальные состояния должен задавать пользователь.

Практика показала, что для всех схем (кроме одной – вырожденной), прошедших проверку на полумодулярность при некоторых начальных состояниях, всегда найдутся другие начальные состояния, при которых схема не полумодулярна. Таким образом, свойство полумодулярности (независимости от задержек замкнутой схемы) определяется теорией Маллера только в связке: схема плюс начальное состояние. Такая ситуация явно не удовлетворяет потребностям практики, так как свойство независимости от задержек будет следствием случайных факторов, например, порядка установления напряжений при включении схемы.

Все начальные состояния обычных разомкнутых схем можно разделить на два класса: устойчивые и неустойчивые. Неустойчивые состояния возникают лишь при включении схемы и сразу переходят в устойчивые. Поэтому обеспечивать независимость работы схемы от задержек для неустойчивых начальных состояний не имеет смысла.

Следует отметить, что теория полумодулярности Д.Маллера не дает возможности найти устойчивые состояния схемы, поскольку рассматриваются только замкнутые уравнения, и для нетупиковых схем (только и имеющих практическое значение) устойчивых состояний нет. Вместе с тем, при функциональном подходе расчет устойчивых состояний разомкнутых схем не имеет принципиальных трудностей.

Таким образом, потребности практики так или иначе приводят к необходимости рассмотрения разомкнутых схем. В связи с этим целесообразно разделить понятия самосинхронности и полумодулярности (в работах В.И.Варшавского они фактически одинаковы).

ССС-схемами будем называть разомкнутые схемы, удовлетворяющие условиям полумодулярности Д.Маллера при двух условиях:

- 1) они искусственно замкнуты корректным образом;

2) они полумодулярны при начальных условиях, устойчивых для разомкнутого состояния.

Искусственное замыкание не вызывает трудностей, так как его алгоритм хорошо известен.

Имеющиеся программные средства анализа, разработанные на основе событийного подхода (программа ТРАНАЛ [5] и ее модернизированная версия БТРАН), имеют следующие недостатки:

- необходимость "ручного" замыкания схемы;
- большие вычислительные затраты во многих практических случаях, например, для комбинационных схем;
- анализ проводится только для одного начального состояния, заданного пользователем "вручную";
- сложная связь между диагностикой анализа и элементами схемы.

Эти программные средства практически можно использовать только для небольших схем порядка 50 - 100 элементов. Их эффективность в большой степени зависит от "степени параллельности" прохождения информации в схеме.

Простые соображения показывают, что в рамках событийного подхода провести анализ для всех возможных начальных состояний большинства схем, имеющих практическое значение, нереально.

Средства анализа функционального подхода находятся на стадии разработки. Концепции, положенные в их основу, следующие.

- Замыкание схемы производится автоматически.
- Предполагается использование аппарата булевых производных.
- Вместо перебора всех возможных начальных состояний предполагается делать проверку переходов 0-1 и 1-0 каждого элемента схемы. Идеологически такая задача близка к задаче синтеза проверочных тестов схем. В подобных задачах для каждого элемента решаются два вопроса: обеспечение переходов 0-1 и 1-0 выхода элемента и обеспечение "прохождения" этих изменений на контролируемые выходы схемы. Для ССС-схем второй вопрос решается свойством полумодулярности. Остаётся только первый, и он детально разработан в литературе как раз в рамках функционального подхода.

Приведенные соображения дают основание предполагать, что вычислительная сложность анализа будет значительно сокращена по сравнению со средствами событийного подхода.

При практическом проектировании часто нет необходимости индцировать все входные переменные схемы, так как некоторые из них могут индцироваться в других частях устройства. Анализ в рамках функционального подхода, в отличие от событийного, дает возможность использовать данное обстоятельство для повышения качества проектирования.

4. Проблемы синтеза

Методы синтеза ССС-схем в событийном подходе базируются на исходном описании в виде замкнутого графа событий, то есть бесконечного процесса. При этом процесс уже должен обладать свойством, аналогичным полумодулярности. Синтез состоит в проверке этого свойства и реализации процесса в форме логических уравнений. Так, в частности, работает метод В.И.Варшавского на основе ДИ [5].

Основные недостатки событийных методов синтеза следующие.

Необходимо заранее сконструировать бесконечный (замкнутый) процесс. Это непривычная и сложная задача для пользователя. В случае комбинационных схем эта

задача из-за размерности становится нереальной. Далее, процессу надо придать свойство полумодулярности, что также весьма сложно.

Другими словами, можно утверждать, что основная часть синтеза – обеспечение полумодулярности – возложена на пользователя, а сам метод выполняет вспомогательную часть – перевод описания из одной формы в другую.

Исходное описание требует, чтобы все входы схемы после замыкания прошли через все существенные переходы 0-1 и 1-0. Это приводит к экспоненциальной зависимости не только вычислительных затрат, но и самого описания от числа входов (а часто и от всех переменных). Данное обстоятельство делает нереальным синтез практических схем, например, даже простых комбинационных.

Если попытаться синтезировать схему по частям, то приходится выполнять ручные операции большой трудоемкости: каждую часть необходимо замкнуть, создать для нее описание бесконечного процесса, синтезировать, разомкнуть и правильно соединить с другими частями. Кроме трудоемкости, такой путь создает условия возникновения ошибок.

Один из больших недостатков событийных методов синтеза (по крайней мере, в известной программе группы В.И.Варшавского ТРАСИН [5]) – отсутствие возможностей оптимизации схем по быстродействию и затратам транзисторов.

В функциональном подходе исходным описанием является функциональный прототип – система логических уравнений, задающая только функциональные зависимости. Такой прототип может быть отлажен путем моделирования для устранения исходных ошибок.

Обеспечение свойства самосинхронности и его реализация осуществляется в системе синтеза. Сохраняется связь с базовыми элементами, и становится возможной оптимизация по обоим критериям.

В области синтеза основная задача – синтез комбинационных ССС-схем.

Поскольку ССС-ячейки памяти (D-триггеры) хорошо известны, задача синтеза автоматных схем общего вида по классической методологии сводится к синтезу комбинационной части. Таким образом, решается вопрос о принципиальной возможности синтеза любой ССС-схемы. В силу известной избыточности универсальных методов автоматного синтеза, задачи создания специализированных ССС-устройств, например, сложных триггерных схем, регистров, счетчиков и др., остаются в повестке дня.

Примером системы функционального синтеза может служить программа СИНТАБИБ. Основанная на методе, приведенном в [6], она синтезирует однокаскадные комбинационные схемы на заданном множестве библиотечных элементов.

В дальнейшем предполагается расширение программных средств синтеза ССС-схем на многокаскадные комбинационные, схемы с памятью – триггерные и автоматные общего вида, а также создание средств объединения ССС-узлов в единую схему - программ блочной индикации.

Отметим, что если схемы синтезируются автоматически, без прямого участия человека-пользователя, то необходимость проверки целых схем на строгую самосинхронность отпадает. Это открывает возможность проектирования ССС-схем неограниченного объема, что для событийных методов в настоящее время очень проблематично.

Конечно, фактор размерности актуален и для функциональных методов синтеза. Однако с учетом того, что обоснованы и частично реализованы методы проектирования небольших фрагментов и соединения их в одну схему, можно ожидать, что вычислительная сложность этих методов будет (приблизительно) линейно зависеть от размеров задачи.

5. Некоторые результаты функционального подхода

Рассмотрение ССС-схем с функциональной точки зрения позволило получить ряд теоретических и практических результатов.

Сформулировано определение строго самосинхронной схемы, не зависящее от начальных условий (относящихся к временной категории) и отличающееся от используемых терминов "полумодулярная" и "самосинхронная", обязательно связанных с начальными состояниями.

Исследование возможностей реализации ССС-схем, в частности, на элементах КМДП-технологии [7] позволило сформулировать требования к базовым элементам этих схем. Были выявлены два класса таких элементов – обычные однокаскадные вентили типа И-ИЛИ-НЕ и ИЛИ-И-НЕ и элементы с внутренней памятью на 3-м состоянии. Второй класс элементов предложен впервые; в теоретических и практических разработках группы В.И.Варшавского и других авторов он не встречается.

Элементы первого класса содержатся во всех базовых кристаллах полузаказной КМДП-технологии, а также в библиотеках заказной технологии. Элементы второго класса дают заметную экономию транзисторов при построении ССС-схем, но в обычных базовых кристаллах, как правило, отсутствует. Поэтому их целесообразно использовать в рамках заказных технологий или в будущих специализированных для ССС-схем матричных кристаллах.

Метод синтеза комбинационных ССС-схем предложен в статье [6]. Создана программа СИНТАБИБ для синтеза схем нижнего уровня – однокаскадных на заданном множестве базовых элементов. Одна из особенностей программы – реализация "тонкой структуры" индикации, когда для каждой входной переменной можно задать требуемые параметры: индцировать при переходе в спейсер, в рабочую фазу или вовсе не индцировать. Такая структура обеспечивает более оптимальное по затратам построение схем. Реализовать подобное свойство в событийном подходе невозможно.

Специфической особенностью ССС-схем является наличие большого числа индцирующих сигналов, которые необходимо свести к одному сигналу. Соответствующие схемы (названные схемами редукции) рассмотрены в статье [8]. Показано, что существует всего два типа редукторов, из которых один – схема параллельного сжатия – по всем показателям уступает другому – Г-триггеру. Математически обоснованы и способы оптимизации таких схем по быстродействию и затратам транзисторов. Эти способы хорошо поддаются автоматизации.

6. Заключение

В практическом проектировании ССС-схем функциональные методы анализа и синтеза имеют ряд преимуществ перед традиционными, исторически первыми событийными методами. Функциональный подход может дополнить существующие средства проектирования новыми эффективными решениями.

Функциональный подход, как более привычный для большинства разработчиков, может и должен развиваться в специализированных САПР строго самосинхронных схем.

Список литературы

1. Muller D.E., Bartky W.C. A theory of asynchronous circuits // Proc. Int. Symp. on the Theory of Switching, Part 1. – Harvard: Harvard University Press, 1959. P. 204-243.
2. Варшавский В.И., Кишиневский М.А., Кондратьев А.Ю. и др. Модели для спецификации и анализа процессов в асинхронных схемах // Техн. Кибернетика. 1988. № 2. – С. 171-190.
3. Автоматное управление асинхронными процессами в ЭВМ и дискретных системах. / Под ред. В.И.Варшавского. М.: Наука, 1986. – 398 с.
4. Л.П.Плеханов. Автоматизация разработки электронных строго самосинхронных схем // Системы и средства информатики. Вып 9. – М.: Наука, 1999. – С. 292-300.
5. Теория, методы и программная поддержка проектирования самосинхронных схем. / Варшавский В.И., Кишиневский М.А., Кондратьев А.Ю. и др. // Отчет о НИР "Трасса-ПИН2" (Промежуточный), Г Р № 0189 0070181. – Л.: ПНТК Трасса, 1990. – 462 с.
6. Л.П.Плеханов. Синтез комбинационных самосинхронных электронных схем // Системы и средства информатики. Вып 14. – М.: Наука, 2004. – С. 292-304.
7. Л.П.Плеханов. Базовые элементы самосинхронных схем КМДП-технологии // Системы и средства информатики. Вып 11. – М.: Наука, 2001. – С. 316-320.
8. Л.П.Плеханов. Индикация в самосинхронных электронных схемах. Обоснование и оптимизация // Системы и средства информатики. Вып 12. – М.: Наука, 2002. – С. 290-297.