

# Проектирование самосинхронных схем: функциональный подход

Л.П. Плеханов

Учреждение Российской академии наук Институт проблем информатики РАН (ИПИ РАН),  
lppl@akado.ru

**Аннотация** — Предложен новый подход к проектированию, уникальных по свойствам, самосинхронных схем. Подход призван приблизить проектирование этих схем к категориям и понятиям, привычным для большинства разработчиков, без использования методов теории автоматов. В рамках подхода, эффективно решена задача анализа самосинхронных схем и некоторые задачи синтеза. Подход открывает новые возможности в проектировании таких схем, трудно реализуемые в существующих событийных методах: иерархический анализ, иерархический синтез, покрытие широкого класса неисправностей.

**Ключевые слова** — Самосинхронные схемы, асинхронные схемы, проектирование схем, самопроверяемость, надёжные электронные схемы.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Названные в заголовке схемы относятся к дискретным асинхронным электронным схемам, интерес к которым носит ныне исключительный характер.

### A. Самосинхронные схемы

В развитии теории и практики таких схем можно отметить два главных этапа. В работах Д.Е. Маллера (например, [1]) доказано существование и выявлены особенности поведения схем, имеющих следующее свойство.

**Свойство 1.** Независимость поведения от задержек элементов (вентилей). Здесь считается, что задержки приведены к выходам элементов, а задержки межсоединений после разветвлений несущественны.

Свойство 1 гарантирует целый ряд практически важных качеств данных схем при их реализации: отсутствие состязаний, широкий диапазон внешних условий безошибочной работы и другие.

Вторым важнейшим этапом развития этих схем явились работы В.И. Варшавского с сотрудниками (основной материал – в книге [2], ряд вопросов развит в книге [3] на английском языке). В этих работах впервые приведено, как целенаправленно строить практические схемы, обладающие свойством 1: триггеры, регистры, счётчики, комбинационные схемы и другие. Схемы данного типа в этих работах названы *самосинхронными*.

В публикациях В.И. Варшавского и его группы, кроме того, впервые обращено внимание на ещё одно практически важное свойство самосинхронных схем.

**Свойство 2.** Самопроверяемость по отношению к выходным константным неисправностям типа залипания (КНЗ), одиночным и кратным.

Данное свойство означает, что после возникновения упомянутых неисправностей схема останавливается. Это гарантирует достоверность работы схемы (на выходах либо правильная информация, либо отсутствие каких-либо изменений), а также даёт возможность самодиагностики и саморемонта, то есть построения резервированных, надёжных схем.

Совокупность свойств 1 и 2 является уникальной и присуща только данному типу электронных схем. К следствиям такого сочетания (подробно изложенным в [4], [5]) можно отнести: предельно широкий диапазон правильной работы по температуре и напряжению питания, меньшее энергопотребление по сравнению с синхронными аналогами, повышение выхода годных чипов и некоторые другие.

Публикации по самосинхронным схемам за рубежом можно отнести к двум разновидностям. В первой рассматриваются более-менее частные вопросы в рамках теории автоматов (примеры есть ниже по тексту). В публикациях другого вида описываются схемы, названные самосинхронными, однако ни самих схем, ни их фрагментов не приводится, что не позволяет оценить их свойства. В России (также и в СНГ) единственная группа, систематически развивающая самосинхронные схемы, работает в составе ИПИ РАН.

С практической точки зрения крайне интересен и важен вопрос, оправдываются ли теоретически заявленные уникальные свойства в реальных самосинхронных схемах. Существующие в литературе публикации очень фрагментарны, и обнаружить сообщения о более-менее представительных испытаниях реальных самосинхронных схем не удалось.

Такие испытания были проведены в 2005 – 2006 годах в ИПИ РАН совместно с МИЭТ (г. Зеленоград) [6], [7]. Результаты превзошли ожидания: схемы работали правильно (и только правильно) во всём диапазоне по температуре от  $-80^{\circ}$  до  $+130^{\circ}$  С и по напря-

жению от 0,5 – 1,2 В (для разных температур) до 13 – 14 В при номинале 5 В. При выходе из диапазона по напряжению схемы переставали работать.

### Б. О подходящей терминологии

В отечественной и зарубежной литературе используется несколько названий, к которым можно отнести обсуждаемые схемы.

*Speed-independent (SI)* – независимые от скорости. Термин, впервые введённый Маллером, неудачен, так как понятие "скорость" никогда не применялось и не применяется в дискретной электронике. Означает независимость от выходных задержек (задержек распространения) элементов схемы. Используется в зарубежной литературе как дань традиции.

*Delay-insensitive (DI)* – нечувствительные к задержкам. Здесь имеется в виду нечувствительность как к задержкам элементов, так и к задержкам в "проводах" (межсоединениях). В точном смысле термин может применяться только к схемам "на чипе" - реализованным физически. На этапе разработки логической схемы в вентилях ("на рисунке"), когда он обычно и применяется в зарубежной литературе, этот термин не вполне корректен по двум причинам. Во-первых, как следует из теории Маллера, создать схему, независимую от любых задержек межсоединений после разветвлений (то есть приведённых ко входам элементов), невозможно. Во-вторых, для реализации такой независимости в конкретных случаях требуются сведения о технологии (величина эквивалентной зоны), топологии (длины трасс) и другие. При разных реализациях физическая схема может быть или не быть независимой от задержек после разветвлений.

Используется также термин *quasi delay-insensitive (QDI)* в случаях, когда нечувствительность от задержек ограничена какими-либо условиями.

*Self-timed (ST)* – самотактируемые, или самосинхронные. В зарубежной литературе термин широко применяется не только в смысле Варшавского, но и ко многим другим асинхронным и даже не совсем асинхронным схемам, например, к схемам с изменяемой частотой синхроимпульсов. При употреблении этого термина, как правило, о свойствах 1, и особенно 2, не упоминается.

Таким образом, термин "самосинхронные" в литературе используется слишком широко, и в научных публикациях требует уточнения. В данном случае подразумеваются схемы, функционирование которых не зависит от выходных задержек вентилях, и далее в тексте они будут называться СС-схемами.

## II. СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПОДХОДЫ

В проектировании асинхронных схем господствуют либо методы из теории автоматов, либо те или иные

частные приёмы, приводящие к частичной независимости от задержек.

По отношению к СС-схемам со времен Маллера (не считая работ ИПИ РАН) применяется только одна группа подходов к их исследованию. Эти подходы унаследованы из теории автоматов и состоят в представлении работы схемы как *процесса* изменения выходных значений элементов – событий. Поэтому данные подходы далее будут называться *событийными*.

Описания работы делаются в виде диаграмм переходов (в полных состояниях, как в теории Маллера), диаграмм изменений, сетей Петри, сигнальных графов и других графических представлений.

Событийные методы и описания широко используются в теоретических выкладках. Однако, в среде практической разработки они не нашли пока большого распространения.

Рассмотрим особенности событийных подходов в применении к СС-схемам. В этом случае все событийные подходы, в конечном итоге, опираются на теорию Маллера.

Цифровая электронная схема представляет собой устройство преобразования информации, и наличие входов и выходов для неё является необходимой принадлежностью. Для событийных подходов, однако, существенным условием выступает замкнутость описания. Это условие диктуется теорией Маллера для обеспечения свойства *полумодулярности* [1] – критерия независимости поведения от задержек элементов. Схемы в событийных описаниях в результате не имеют ни входов, ни выходов, что выглядит неестественно.

Важно отметить, что свойство полумодулярности и, следовательно, свойства 1 и 2 являются свойствами всей схемы. Любое изменение схемы, даже введение инвертора (рутинная операция для обычных схем), способно нарушить полумодулярность и требует новой её проверки.

Замкнутость описания порождает ещё ряд трудностей при практическом построении схем. Модульное, иерархическое построение схем в событийных подходах очень неудобно из-за необходимости их замыкания-размыкания. Далёкая и опосредованная связь полумодулярности с функциями элементов затрудняет оптимизацию схем по быстродействию и затратам в транзисторах, оставляя обычно только метод подбора/перебора.

## III. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПОДХОД

Традиционно и справедливо считается, что проектирование СС-схем относится к весьма трудным задачам. Немалую роль в этом играют особенности событийных подходов, приведённые выше.

Основной целью предлагаемого функционального подхода является стремление вернуть процесс проектирования в категории, привычные для большинства разработчиков обычных схем. Поэтому были приняты следующие основные принципы функционального подхода:

- 1) рассматриваются разомкнутые схемы, имеющие входы и выходы;
- 2) используются описания элементов в виде логических функций, событийные описания не привлекаются.

При дальнейшем развитии оказалось, что функциональный подход открывает новые возможности в проектировании СС-схем, недоступные событийным методам.

Построение СС-схем при функциональном подходе основывается на разработках [2]. Используется самосинхронное кодирование информации, преимущественно парафазный код, как наиболее подходящий для практических схем. Не исключаются также и другие самосинхронные коды в специальных случаях, например, для передачи данных по шине.

Другим необходимым условием построения схем в данном подходе является двухфазная дисциплина работы – чередование рабочей фазы и спейсера.

Хотя разработка схемы проводится в разомкнутом виде, её реальная работа должна проходить с замкнутой общей обратной связью для обеспечения правильного чередования фаз.

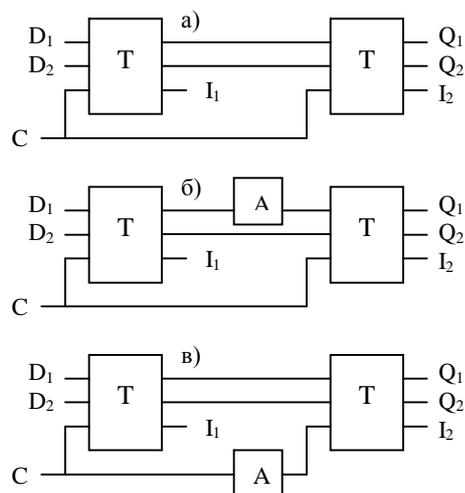
В соответствии с [2] разомкнутая схема должна иметь на входе, помимо чисто информационных сигналов, сигналы, задающие фазу для схемы: либо управляющие, задающие фазу индивидуально, либо парафазные (в общем случае любые, закодированные самосинхронным кодом), определяющие как значащую информацию, так и фазу. Аналогичные сигналы должны быть и на выходах схемы.

Отказ от общей обратной связи (замыкания) при проектировании имеет важные теоретические последствия: теория Маллера становится неприменимой, свойство 2 перестаёт быть следствием свойства 1, и оба свойства должны рассматриваться независимо.

На рис. 1 показаны три простые схемы. Схема а) имеет оба свойства 1 и 2, для схемы б) выполняется свойство 1, но не выполняется свойство 2, схема в), наоборот, имеет свойство 2, но не имеет свойства 1.

Другой аспект функционального подхода связан с начальными состояниями. Свойство полумодулярности [1] определяется для каждого конкретного начального состояния. Происхождение этих состояний вынесено за рамки теории. Для практики, однако, важны не любые начальные состояния, а те, в которых схема может находиться в процессе реальной работы. При функциональном подходе это равновесные состояния, то есть сохраняющиеся неограниченно

долго (неустойчивые разомкнутые схемы не рассматриваются, как не имеющие смысла). Например, одинаковые значения на входе и выходе инвертора неравновесны, и как начальные условия не интересны для практики.



T – двухтактные триггеры ([2], рис. 4.11-б),  
 A – усилители (повторители),  
 D1, D2, Q1, Q2 – информационные входы и выходы,  
 C – управляющие входы,  
 I1, I2 – индикаторы.

**Рис. 1. Схемы с различными свойствами**

Равновесные состояния определяются информационными входами и внутренними переменными памяти.

#### А. Определение СС-схем

Самосинхронной схемой (СС-схемой) в функциональном подходе будет называться разомкнутая схема, среди входов и выходов которой есть хотя бы по одному фазовому сигналу, и обладающая свойствами 1 и 2 при всех равновесных начальных условиях.

Следует отметить, что приведённое определение не противоречит теории Маллера: СС-схема совместно с согласованным замыканием [2] будет полумодулярной при соответствующих начальных условиях.

Рассмотрим задачи, специфические для СС-схем, в различных подходах.

#### Б. Анализ схем

Под анализом схемы будем понимать установление факта выполнения для неё интересующих нас свойств 1 и 2.

Анализ является одной из самых трудоёмких процедур проектирования данного типа схем. Трудность этой процедуры состоит в том, что свойства 1 и 2, как



крыты, поскольку в процесс переключения с необходимостью вовлечены все элементы схемы.

Функциональный подход открывает возможность иерархического анализа. Параметры входов и выходов СС-схем, вычисленные при их функциональном анализе [10], а также ряд формальных правил соединения схем из [2] позволяют анализировать только соединения блоков между собой без раскрытия их содержимого.

#### Д. Обнаружение неисправностей

При создании надёжных схем большое значение имеет вопрос самопроверяемости и обнаружения (покрытия) неисправностей схем. Как указывалось, СС-схема полностью самопроверяема в классе КНЗ на выходах элементов.

В рамках событийных подходов исследованы критерии самопроверяемости полумодулярных схем и для некоторых других неисправностей: выходных и входных КНЗ [11], выносных (выводящих схему из рабочих состояний) выходных КНЗ [12].

Однако нахождение критериев для замкнутых полумодулярных схем связано с рядом трудностей. Необходимо обнаружить фиктивный класс эквивалентности [2] и другие свойства и условия диаграммы переходов как целого, что представляет сложность, равнозначную сложности определения полумодулярности. Критерии определены на диаграммах переходов, имеющих экспоненциальный размер от числа элементов, что на практике означает их применимость лишь для небольших схем.

В функциональном подходе прямой метод вычисления самопроверяемости даёт возможность проверки покрытия любых константных логических неисправностей, то есть тех, которые выражаются логическими соотношениями. Это могут быть:

- залипания на входах элементов, что эквивалентно большим задержкам межсоединений после разветвлений;

- мутантные неисправности, изменяющие значения сигналов в момент возникновения.

Мутантные неисправности могут быть как выносными, так и невыносными.

Таким образом, множество неисправностей, проверяемых при функциональном подходе, значительно шире, чем при событийных.

Кроме сказанного, при вычислении покрытий функциональным методом в одном сеансе определяются условия (значения входов и переменных памяти) обнаружения конкретных неисправностей, что позволяет одновременно строить для них проверочные тесты. В событийном методе для этого необходимо многократно повторять полный цикл анализа.

#### Е. Синтез схем

В зарубежной литературе публикуется много работ по синтезу асинхронных схем. В большинстве из них используются предположения или ограничения на задержки элементов, что не гарантирует выполнения свойств 1 и 2, и такие схемы относятся к классу QDI.

Публикуемые работы, посвящённые синтезу SI- и DI-схем, основаны исключительно на событийных представлениях. Одним из первых был метод синтеза, разработанный группой В.И. Варшавского на основе диаграмм изменений [3]. Аналогичная методология была затем разработана на языке сетей Петри [13]. Другие публикации находятся, в основном, в русле этих методологий.

Особенностью этих методов является то, что исходные данные – разного рода диаграммы – уже должны обладать свойствами, в совокупности эквивалентными полумодулярности. Построение исходной диаграммы возложено на пользователя, а методы и средства синтеза лишь проверяют её по нескольким критериям. После проверки запускается процедура конверсии описания диаграммы в схемный базис. С методологической точки зрения такие методы – не совсем синтез, поскольку целевое свойство схемы – полумодулярность – не синтезируется, а только проверяется.

Следует отметить, что практически подготовить исходную диаграмму можно лишь для простых схем, в основном различных контроллеров. Для вычислительных схем (сумматоров, умножителей и т.д.) такая задача становится нереальной. Например, для 8-разрядного мультиплексора в исходной диаграмме надо дать все 256 возможных комбинаций значений входов. Усложняет задачу и замкнутость диаграмм.

В функциональном подходе естественна другая постановка задачи синтеза. Предварительно заметим, что автоматически синтезировать триггерные ячейки нет смысла по двум причинам. Во-первых, их автоматический синтез даёт почти всегда неоптимальные решения, и обычно такие ответственные элементы синтезируются вручную. Во-вторых, уже накоплено большое количество готовых самосинхронных триггерных ячеек.

Постановка задачи синтеза, назовём её *монофазной*, такова. Задаётся система логических уравнений элементов, описывающая значащую информацию в исходном, не самосинхронном виде, без любой синхронизации, и связанные триггерные ячейки, например, в виде библиотечных элементов. Средство синтеза должно преобразовать сигналы в самосинхронные коды, дополнить описание необходимыми элементами (уравнениями), связями и индикацией.

Близкой к монофазной будет постановка задачи на иерархический синтез при замене триггерных ячеек на ранее разработанные самосинхронные блоки.

Вопрос оптимизации актуален при любом синтезе. В событийных подходах существует, в основном, оптимизация двух видов: исходных графических описаний и минимизация булевых функций. Эта оптимизация эффективна для небольших схем и схем контроллеров. В других случаях трудности возникают из-за необходимости учёта всех комбинаций значений независимых переменных.

При функциональном подходе традиционно используется булева минимизация, но и открываются другие интересные возможности оптимизации по критериям быстродействия и затрат в транзисторах: локальная оптимизация в синтезе комбинационных фрагментов [14], оптимизация массовой индикации, характерной для самосинхронных схем [15].

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для проектирования самосинхронных схем, обладающих уникальными свойствами, предложен новый, функциональный подход.

Подход возник как стремление привести проектирование этих схем к понятиям, привычным для обычных (синхронных) схем и по возможности не связанным с теорией автоматов. Подход показал свою продуктивность и позволил не только по-новому решать задачи анализа и синтеза самосинхронных схем, но и открыл для этого новые пути.

В результате развития функционального подхода были получены следующие основные результаты.

Разработан метод анализа строгой самосинхронности [9] и программа ФАЗАН на его основе [10] в рамках разрабатываемой в ИПИ РАН САПР самосинхронных схем РОНИС. Основные параметры программы: язык описания схем – VHDL, использование VHDL-библиотеки и/или операторов уровня data flow (RTL), учёт всех возможных комбинаций значений входов и переменных памяти. Программа не только определяет самосинхронность, но и готовит данные для иерархического анализа самосинхронности верхнего уровня, выполняет проверку установочных режимов, рассчитывает покрытие консервативных и мутантных константных неисправностей входов и выходов всех элементов.

Разработан табличный метод синтеза комбинационных СС-схем небольшого размера в монофазной постановке [14] и реализующая его программа СИНТАБИБ [16].

Исследован актуальный вопрос о массовой индикации в самосинхронных схемах с оптимизацией по быстродействию и затратам в транзисторах [15].

В перспективе, подход будет развиваться в направлении иерархического анализа, синтеза в монофазной и иерархической постановках, построения надёжных схем.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Muller D.E., Bartky W.C. A theory of asynchronous circuits // Proc. of Int. Symp. on the Theory of Switching 1957 (Cambridge, Massachusetts, April 2-5, 1957). Part 1. Harvard University Press, 1959. P. 204–243.
- [2] Автоматное управление асинхронными процессами в ЭВМ и дискретных системах / под ред. В.И. Варшавского. М.: Наука, 1986. 400 с.
- [3] Concurrent Hardware: The Theory and Practice of Self-Timed Design. Kishinevsky M., Kondratyev A., Taubin A., Varshavsky V. London: John Wiley and Sons, 1993. 388 p.
- [4] Филин А.В., Степченков Ю.А. Компьютеры без синхронизации // Системы и средства информатики. М.: Наука, 1999. Вып. 9. С. 247 – 261.
- [5] Степченков Ю.А., Дьяченко Ю.Г., Петрухин В.С., Плеханов Л.П. Самосинхронные схемы – ключ к построению эффективной и надёжной аппаратуры долговременного действия // Системы высокой доступности. 2007. Т. 3. №1-2. С. 73 – 88.
- [6] Плеханов Л.П., Степченков Ю.А. Экспериментальная проверка некоторых свойств строго самосинхронных схем // Системы и средства информатики. М.: Наука, 2006. Вып. 16. С. 476 – 485.
- [7] Соколов И.А., Степченков Ю.А., Петрухин В.С., Дьяченко Ю.Г., Захаров В.Н. Самосинхронная схемотехника – перспективный путь реализации аппаратуры // Системы высокой доступности. 2007. Т. 3. № 1-2. С. 61 – 72.
- [8] Плеханов Л.П. Самосинхронность и задачи анализа строго самосинхронных электронных схем // Системы и средства информатики. М.: Наука, 2007. Вып. 17. С. 492 – 502.
- [9] Плеханов Л.П. Анализ самосинхронности электронных схем функциональным методом // Системы и средства информатики. М.: Наука, 2008. Вып. 18. С. 225 – 233.
- [10] Плеханов Л.П. Реализация функционального метода анализа самосинхронности электронных схем // Системы и средства информатики. М.: Наука, 2009. Вып. 19. С. 143 – 148.
- [11] Beerel P.A., Meng T.-Y. Semi-Modularity and Testability of Speed-Independent Circuits // Integration, the VLSI Journal. 1992. V. 13. P. 301–322.
- [12] Liebelt M.J., Burgess N. Detecting Exitory Stuck-At Faults in Semimodular Asynchronous Circuits // IEEE Transactions on Computers. 1999. V. 48. № 4. P. 442–448.
- [13] The Use of Petri Nets for the Design and Verification of Asynchronous Circuits and Systems / Kondratyev A., Kishinevsky M., Taubin A., Cortadella J., Lavagno L. // Journal of Circuits, Systems and Computers. 1998. V. 8. № 1. P. 67–118.
- [14] Плеханов Л.П. Синтез комбинационных самосинхронных электронных схем // Системы и средства информатики. М.: Наука, 2004. Вып. 14. С. 292 – 304.
- [15] Плеханов Л.П. Индикация в самосинхронных электронных схемах. Обоснование и оптимизация // Системы и средства информатики. М.: Наука, 2002. Вып. 12. С. 290 – 297.
- [16] Плеханов Л.П. Программа синтеза комбинационных самосинхронных схем на заданной библиотеке элементов СИНТАБИБ. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007613665. Реестр программ для ЭВМ, 27.08.2007.