

ISSN 0130-5395

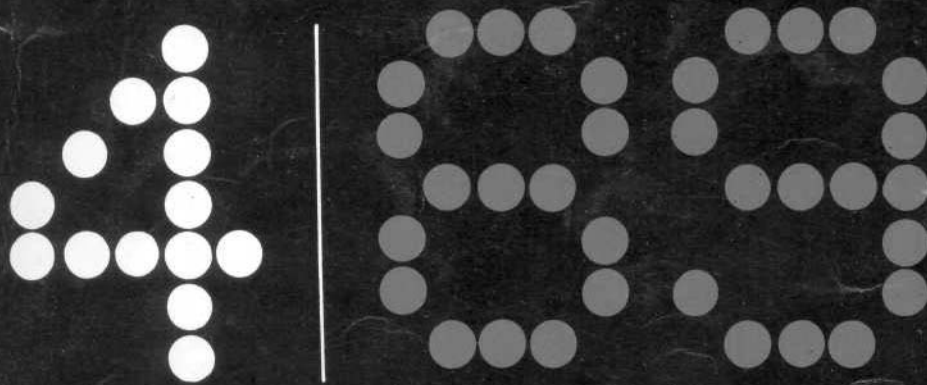
АКАДЕМИЯ НАУК
УКРАИНСКОЙ ССР

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
„ИНСТИТУТ КИБЕРНЕТИКИ им. В.М. ГЛУШКОВА“

УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ И МАШИНЫ

НАУЧНО-
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ
ЖУРНАЛ

УСИМ



Анализ асинхронных схем методом сканирования структуры

Традиционным методом анализа корректности функционирования цифровых структур (и в первую очередь, асинхронных) в динамическом режиме является моделирование в различных алфавитах без учета и с учетом временных параметров составляющих компонентов. При таком подходе разработчику схемы трудно определить полное множество входных состояний, используемых при моделировании схемы и гарантирующих корректность результата исследования. Кроме того, большая размерность данного множества может привести к низкой эффективности подобного исследования даже на самой современной вычислительной системе. В связи с этим являются актуальными как вопрос повышения полноты контроля корректности проектов цифровых устройств, так и разработка методов их экспресс-анализа, позволяющих с высокой скоростью обнаруживать ошибки определенного класса.

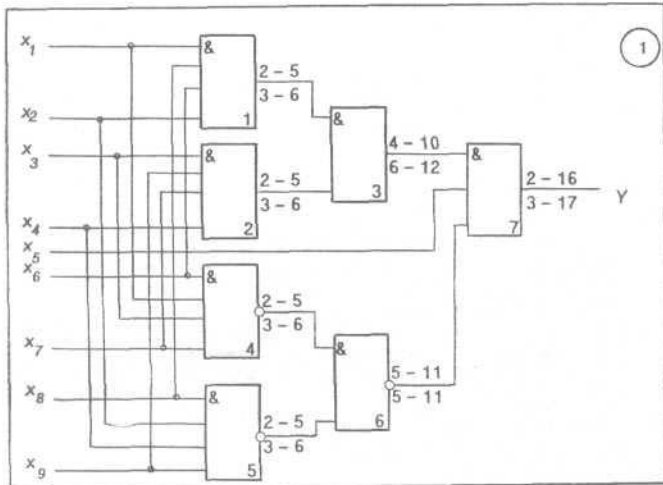
Так, в последнее время при проектировании структур синхронного типа считается целесообразным (с точки зрения эффективности) разделить процессы поиска логических ошибок и ошибок временного характера. Это позволяет для поиска логических ошибок использовать простые средства моделирования, основанные на булевой алгебре, а для поиска временных несоответ-

ствий — методы временной верификации [1—3]. Методы верификации [2, 3] используются для определения критических по длительности цепей распространения сигналов в синхронных структурах между элементами памяти и позволяют эффективно настроить систему их синхронизации.

Ниже приведен метод аналитического определения мест (линий схемы) потенциально возможного появления сигналов типа «статический риск сбоя», который может быть применен на этапе отработки функционально-логического проекта после проверки выполнения предписанных устройству логических функций в статике. Метод предназначен для быстрой проверки выполнения достаточных условий отсутствия возможности появления рискованных сигналов в цепях схемы и обнаружения условий их появления.

Метод базируется на представлении каждого составляющего схему компонента в виде модели его задержки, представленной композицией операторов преобразования интервальных временных функций [1]: $\Phi(\tau_i) \cdot \Omega X_j = Z_i$, где X_j — составная интервальная временная функция, описывающая входное состояние элемента; Ω — оператор симметричного сдвига, моделирующий прохождение переключательного процесса через линию простой задержки, величина которой расположена в некотором диапазоне; $\Phi(\tau_i)$ — оператор высокочастотной отсечки элемента; Z_i — интервальная временная функция, описывающая реакцию элемента. Функция, реализуемая элементом, не вычисляется.

Предполагается, что задержка элемента зависит от его типа, номера канала входа-выхода распространения сигнала через элемент и вида



переключения выходного сигнала. Если i — номер выхода элемента, j — номер его входа, то $t^1i(j) \min$, $t^1i(j) \max$, $t^0i(j) \min$, $t^0i(j) \max$ — граничные величины задержек распространения сигнала через элемент при его переключении из 0 в 1 и из 1 в 0.

Предположим, что указанные параметры задержек известны для каждого типа элемента анализируемой структуры. Как и в методе, изложенном в [2, 3], определим процедуру сканирования структуры как вычисление возможных интервалов времен поступления изменений сигналов на выходы элементов (в [2] ей соответствует процедура «прямой проход»). Вычисление интервалов осуществляется для каждого элемента в порядке возрастания номеров, присвоенных в соответствии с порядком распространения сигналов по схеме. Элементы замкнутых контуров нумеруются условно.

При вычислении минимального и максимального времени возможных переключений сигнала из 0 в 1 и из 1 в 0 на выходе элемента учитываются граничные времена изменений входных состояний, а также граничные величины задержек элементов. Для элементов И/И-НЕ/, например, минимальное время изменения сигнала из 0 в 1 на выходе определяется суммой минимального времени входного изменения из 0 в 1 (из 1 в 0) и минимальной задержки на формирование выходного сигнала из 0 в 1. Для элементов других типов указанные величины вычисляются по алгоритму, определенному типом реализуемой функции.

Выполним процедуру сканирования для схемы, приведенной на рис. 1. Положим, что граничные величины задержек элементов зависят только от вида переключения сигнала, $t^1i(j) \min = 2$, $t^1i(j) \max = 5$, $t^0i(j) \min = 3$, $t^0i(j) \max = 6$. Над каждой линией связи показано минимальное и максимальное время возможного изменения сигнала из 0 в 1 и под линией — соответствующее время для перехода из 1 в 0. В результате выпол-

нения процедуры на выходе элемента 7 планируется появление изменений сигналов из 0 в 1 в интервале [2—16], а при его изменении из 1 в 0 — в интервале [3—17].

Процедура сканирования структуры предполагает вычисление четырех граничных времен возможных изменений сигналов для каждого элемента один раз в случае ранжированной структуры. Информации, полученной при выполнении процедуры сканирования, достаточно, чтобы выполнить описанный ниже анализ.

При функционировании схемы на некотором такте на ее выходах и внутренних линиях возможно переключение сигналов из 1 в 0 или из 0 в 1. Какое переключение произойдет в определенный момент времени — это зависит от функции, реализуемой на данной линии, и последовательности входных сигналов. Проанализируем возможность появления рискованного сигнала на выходе четырехвходового элемента И.

Обозначим события переключений сигналов из 0 в 1 A^1 и из 1 в 0 A^0 на первом входе элемента И; соответственно, B^1 и B^0 — на втором входе, C^1 и C^0 — на третьем входе, D^1 и D^0 — на четвертом входе. Задача анализа возможности появления рискованного сигнала на выходе элемента сводится к анализу переключения элемента при появлении любого события на его входах из множества следующих сложных событий:

$$\begin{aligned}
 &A^0B^0C^0D^0, A^0B^0C^0D^1, A^0B^0C^1D^0, A^0B^0C^1D^1, A^0B^1C^0D^0, \\
 &A^0B^1C^0D^1, A^0B^1C^1D^0, A^0B^1C^1D^1, A^1B^0C^0D^0, A^1B^0C^0D^1, \\
 &A^1B^0C^1D^0, A^1B^0C^1D^1, A^1B^1C^0D^0, A^1B^1C^0D^1, \\
 &A^1B^1C^1D^0, A^1B^1C^1D^1.
 \end{aligned}$$

Каждое сложное событие состоит в появлении на входах определенных простых событий. Например, событие 11 заключается в том, что на первый и третий входы элемента придут изменения сигналов из 0 в 1, а на второй и четвертый входы — из 1 в 0. Каждое из простых событий планируется в некотором интервале времени, определенном на этапе сканирования структуры. Очевидно, что число событий, возможных на входах элемента, равно 2^n , где n — число входов.

Предположим, что все простые события в рамках сложного упорядочены по минимальным временам их возможного появления (это упростит необходимые вычислительные процедуры), т. е. событие $A^1B^0C^1D^0$, например, следует понимать так: в некоторый момент времени сигнал на первом входе переключился в 1, затем на втором входе — в 0, после этого на третьем — в 1, и, наконец, на четвертом — в 0 (рис. 2, а; интервалы появления событий при этом могут пересекаться, как на рис. 2, б).

Каждое простое событие появляется в определенном интервале времени. Обозначим $t^{A^1} \min$, $t^{A^0} \min$, $t^{A^1} \max$, $t^{A^0} \max$ — минимальное (макси-

мальное) время появления событий A^1 и A^0 на соответствующем входе элемента (аналогично для других событий). Тогда для определения возможности генерации рискового сигнала на выходе конъюнктора в ответ на некоторое сложное событие на входах элемента необходимо определить параметр рассогласования R_i (нижний индекс i указывает на сложное событие на входах элемента). Применительно к событию 10 этот параметр имеет следующий вид:

$$R_{10} = \min \{t^{B^0} \max, t^{C^0} \max\} - \max \{t^{A^1} \min, t^{D^1} \min\}.$$

При вычислении R_i используются времена появления простых событий, составляющих анализируемое сложное событие на входах элемента. Если τ — величина инерционной задержки элемента, то при $R_i \geq \tau$ на выходе возможен сигнал типа «статический риск сбоя». Заметим, что параметр R_i вычисляется, если сложное событие включает простые с различными индексами, что соответствует наличию переключений сигналов разного типа. В случае событий 1 и 16 рисков ситуации не возникает, так как на всех входах конъюнктора происходят однотипные переключения.

Таким образом, для того чтобы определить, возможно ли в анализируемой структуре возникновение рискового сигнала на k -й линии, необходимо в общем случае $2^n - 2$ раза вычислить параметр R_i и сравнить его с величиной τ инерционной задержки элемента. Очевидно, при анализе структур на многовходовых элементах объем вычислений оказывается большим.

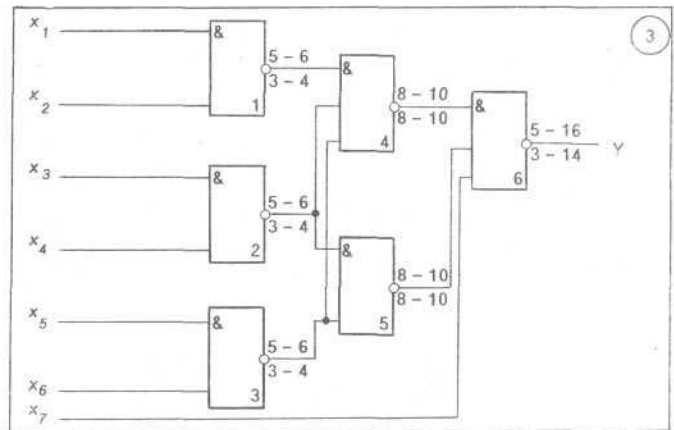
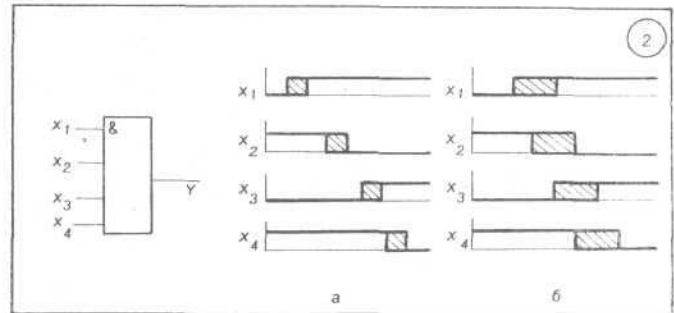
Для сокращения вычислительных процедур вычислим гипотетический параметр

$$R_i^* = \max \{t^{A^0} \max, t^{B^0} \max, t^{C^0} \max, t^{D^0} \max\} - \min \{t^{A^1} \min, t^{B^1} \min, t^{C^1} \min, t^{D^1} \min\}$$

в предположении, что на входах анализируемого элемента присутствует событие $\{A^1 B^1 C^1 D^1 A^0 B^0 C^0 D^0\}$. Если величина гипотетического параметра $R_i^* < \tau$, то анализ реально возможных событий далее не проводится, вычисления по данному элементу заканчиваются. Делается заключение о невозможности генерации данным элементом сигнала статического риска сбоя.

В качестве примера рассмотрим схему, приведенную на рис. 3. Примем, что задержки элементов при формировании выходного переключения из 0 в 1 расположены в диапазоне [5—6], а при переключении из 1 в 0 — в диапазоне [3—4]; $\tau = 3$. Проанализируем схему на появление в ее цепях рискового сигнала.

Предположим, что входные воздействия изменяются в момент времени $t=0$. Пронумеруем элементы в порядке распространения сигнала. Для каждого элемента вычислим возможные времена поступления на выход изменений сигналов из 0 в 1 и из 1 в 0 (выполним процедуру сканирования) и проанализируем возможность появления риска сбоя. Учитывая предположение од-



новременности изменения всех компонентов вектора входного состояния, элементы первого ранга 1, 2, 3 можно не анализировать.

Начинаем вычисления с элемента 4. На его входах возможны следующие простые события: на первом входе событие A^1 при $t^{A^1} \min = 5$ и $t^{A^1} \max = 6$ и событие A^0 при $t^{A^0} \min = 3$ и $t^{A^0} \max = 4$; на втором и третьем входах события B^1 и C^1 при $t^{B^1} \min = t^{C^1} \min = 5$ и $t^{B^1} \max = t^{C^1} \max = 6$, а также события B^0 и C^0 при $t^{B^0} \min = t^{C^0} \min = 3$ и $t^{B^0} \max = t^{C^0} \max = 4$. Для сокращения числа вычислений определим гипотетический параметр

$$\bar{R}_i^* = \max \{4, 4, 4\} - \min \{5, 5, 5\} = -1.$$

Поскольку $R_i^* < \tau$, дальнейшие вычисления для данного элемента не проводим, сразу делаем вывод о невозможности появления рискового сигнала на выходе элемента.

Переходим к анализу элемента 5 и получаем аналогичный результат.

Гипотетический параметр R_i^* для элемента 6:

$$R_i^* = \max \{10, 10, 0\} - \min \{8, 8, 0\} = 10.$$

Для данного элемента $R_i^* \geq \tau$, поэтому отрицать возможность рискового сигнала невозможно. Необходимо продолжать вычисления параметра R_i для реально возможных сложных событий на входах элемента, т. е. для $\{A^0 B^0 C^1, A^0 B^1 C^0, A^0 B^1 C^1, A^1 B^0 C^0, A^1 B^0 C^1, A^1 B^1 C^0\}$:

$$R_1 = \min \{10, 10\} - \max \{0\} = 10, R_1 \geq \tau;$$

$$R_2 = \min \{10, 0\} - \max \{8\} = -8, R_2 < \tau;$$

$$R_3 = \min \{10\} - \max \{8, 0\} = 2, R_3 < \tau;$$

$$R_4 = \min \{10, 0\} - \max \{8\} = -8, R_4 < \tau;$$

$$R_5 = \min \{10\} - \max \{8, 0\} = 2, R_5 < \tau;$$

$$R_6 = \min \{0\} - \max \{8, 8\} = -8, R_6 < \tau.$$

В результате анализа на выходе элемента 6 возможен рисковый сигнал при возникновении на его входах события $A^0B^0C^1$, при котором сигнал на первом и втором входах изменяется из 1 в 0, а на втором — из 0 в 1.

Ниже приведен алгоритм анализа цифровой структуры на наличие рискового сигнала.

1. Вычислить граничные времена возможного изменения сигналов на выходах элементов в порядке их распространения по схеме.
2. Для каждого элемента вычислить гипотетический параметр R_i^* и проверить на выполнение условие $R_i^* \geq \tau$.
3. Для элементов с гипотетическим параметром $R_i^* \geq \tau$ вычислить R_i для каждого реального входного события.
4. Установить признаки рискового сигнала на выходах и входах элементов при $R_i \geq \tau$.
5. Конец.

Метод может быть применен при исследовании корректности проектов схем общего вида для быстрого анализа условий отсутствия рисковых сигналов в комбинационных фрагментах схемы. При исследовании схем, реализующих не полностью определенные булевы функции, возможно появление рискового сигнала на нерабочих входных состояниях, что необходимо учитывать при окончательном решении вопроса о корректности структуры.

1. *Интеллектуальные системы автоматизированного проектирования БИС и СБИС* / В. А. Мищенко, Л. М. Горюшкин, Л. А. Золоторевич и др. — М.: Радио и связь, 1988. — 272 с.
2. *Hitchcock R. B., Smith G. L., Cheng D. D. Timing analysis of computer hardware* // IBM J. Res. Develop. — 1982. — 26, N 1. — P. 100—105.
3. *Malcolm D. G., Roseboom J. H., Clark C. E. Application of a technique for research and development program evaluation* // Oper. Res. — 1959. — N 2. — P. 646—669.

Поступила 18.01.88

(после доработки — 23.09.88)

Тел. для справок: 26-58-81 (Минск)