ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Белорусский ордена Трудового Красного Знамени
государственный университет имени В.И.Ленина

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Сборник научных статей

Минск
Издательство "Университэтское"
1987

Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств: Тез. докл. Всесоюз. науч. -техн. симпоз. М.: Радио и связь, 1986. С. 47-48.

УДК 007.52:519.873

В.И.Левин, Л.А.Золоторевич

ПРИМЕНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИАГНОСТИКИ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ

Рассмотрим представленный в виде соответствующей комбинационной схемы [1] с двоичными входами и одним выходом произвольный дискретный автомат без памяти, реализующий логическую функцию

$$y=f(x_1,\dots,x_i,\dots,x_n), \quad x_i, y \in \{0,1\}.$$

Воздействующие на входы схемы переключательные процессы $x_i(t)$, $i=\overline{1,n}$, представляют собой дискретные (двоичные) функции непрерывного времени, удовлетворяющие следующим условиям: на любом конечном интервале t переключательный процесс $x_i(t)$ содержит конечное число переключений. Тогда

$$y(t)=f[x_1(t),\dots,x_n(t)].$$

Для вычисления функции $y(t)$ в динамической теории автоматов [2] разработаны специальные методы аналитического и численного решения. Главный из них - метод подстановки, состоящий в декомпозиции схемы на последовательные ступени глубины в один элемент и последовательном применении заранее заготовленных соотношений между входными и выходными процессами базовых логических элементов [2].

Рассмотрим функционирование схемы при условии появления в ней неисправности. Известно, что 80 % физических дефектов, возникающих в реальной схеме, покрываются моделью неисправности константного типа, т.е. приводят к появлению постоянного значения c_i ($c_i \in \{0,1\}$), на некоторой линии схемы.

В общем случае, переключательный процесс $y_H(t)$, возникающий на выходе схемы с неисправностью Н, отличается от процесса $y(t)$, описывающего реакцию исправной схемы на некоторое входное воздействие. При заданном множестве допустимых неисправностей задача построения проверочного теста сводится к отысканию и анализу изменения процесса на выходе схемы, вызванного появлением любой неисправности, т.е. к вычислению некоторого процесса Δ-изменения вида

$$\Delta_H y(t) = \begin{cases} 1 \text{ при } y(t) \neq y_H(t), \\ 0 \text{ при } y(t) = y_H(t). \end{cases} \qquad (1)$$

На данном этапе будем полагать, что задержки элементов комбинационной схемы не обладают свойством инерциальности, а безынерциальные задержки для получения реакции схемы можно вынести на первичные входы, что позволит, сдвинув входные процессы $x_1(t),\dots,x_n(t)$ на определенные величины, применить известные методы для вычисления реакции схемы в терминах бесконечнозначной логики [2].

Знание процесса Δ-изменения $\Delta_H y(t)$ позволяет решить задачи обнаружения и различения неисправностей по искажениям, возникающим в динамическом режиме на выходе схемы, так называемые задачи динамической диагностики.

Неисправности константного типа могут привести на некотором такте работы схемы к искажению значения входной переменной (неисправность на первичных входах схемы) или внутренней переменной, что может исказить значение реализуемой схемой функции. Появление неисправности на первичном входе x_i может быть идентифицировано некоторым индикатором изменения $dx_i \in \{0,1\}$, называемым логическим дифференциалом переменной

$$dx_i = x_i \oplus x_i' = \begin{cases} 1, & x_i \neq x_i', \\ 0, & x_i = x_i', \end{cases} \quad i=\overline{1,m},$$

где x_i' - значение переменной x_i при появлении неисправности. Очевидно, что при изменении одной или группы входных переменных значение выходной функции y может измениться на y'. Индикатором данного изменения будем считать логический дифференциал функции $dy = y \oplus y'$. Прибавлением к обеим частям y с учетом, что $y+y=0$, несложно получить соотношение

$$y' = y \oplus dy.$$

Дифференциал функции $y=f(x_1,\ldots,x_i,\ldots,x_m)$, отвечающий фактическому изменению переменной x_i, называется логической частной производной 1-го порядка от f по x_i и обозначается $\frac{\partial f}{\partial x_i}$:

$$\frac{\partial f}{\partial x_i}=f(x_1,\ldots,x_i,\ldots,x_m)\oplus f(x_1,\ldots,\overline{x_i},\ldots,x_m).$$

Логическая частная производная k-го порядка от функции f по переменным $x_1, x_2, \ldots, x_k$ вводится через частную производную 1-го порядка:

$$\frac{\partial^k f}{\partial x_k\ldots\partial x_1}=\frac{\partial}{\partial x_k}\left(\cdots\frac{\partial}{\partial x_2}\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)\cdots\right).$$

Полное состояние схемы представляется множеством входно-выходных переменных ($x_1, x_2, \ldots, x_n, y$) и переменных, описывающих переключательные процессы на выходах составляющих элементов ($x_{n+1}, \ldots, x_m$). Появление неисправности любой линии, состояние которой описывается указанными переменными, определяется единичным значением дифференциала соответствующей переменной и в результате этого – возможностью единичного значения дифференциала реализуемой схемой функции.

Дифференциал dy любой логической функции $y=f(x_1,\ldots,x_m)$ есть некоторая логическая функция от значений независимых переменных и их дифференциалов $dx_1, \ldots, dx_m$. Эту функцию можно представить в виде канонического разложения, аналогичного тейлоровскому разложению функции непрерывных переменных:

$$dy=\left(\bigoplus_{i=1}^{m}\frac{\partial f}{\partial x_i}dx_i\right)\oplus\left(\bigoplus_{i,j=1}^{m}\frac{\partial^2 f}{\partial x_i\partial x_j}dx_i\,dx_j\right)\oplus$$
$$\oplus\left(\bigoplus_{\substack{i,j,k=1\\ i<j<k}}^{m}\frac{\partial^3 f}{\partial x_i\partial x_j\partial x_k}dx_i\,dx_j\,dx_k\right)\oplus\left(\frac{\partial^m f}{\partial x_1\ldots\partial x_m}dx_1\ldots dx_m\right).$$

Данное соотношение можно рассматривать как математическую модель исследуемой комбинационной схемы с внесенными неисправностями на входных и внутренних линиях. Эта модель характеризует связь дифференциала dy с входными и внутренними переменными и их дифференциалами в любой отдельный момент времени t. Как входные, так и внутренние переменные схемы являются переключательными процессами с непрерывным временем. Дифференциал dy также является некоторым переключательным процессом. При этом интервалы единичных (нулевых) значений процессов $dy(t)$ – интервалы искаженного (правильного) значения реализуемой функции.

Получение процесса $dy(t)$ состоит из следующих этапов.

1. По заданной комбинационной схеме находим реализуемую на выходе функцию $y=f(x_1,\ldots,x_m)$. Для этого используем метод обратных подстановок, сводящийся к разбиению схемы на последовательные ступени глубиной в один элемент (начиная от входов схемы) и анализу ступеней, начиная с последней.

2. Вычисляем переключательные процессы на выходе каждого элемента схемы методом прямых подстановок.

3. Определяем дифференциалы соответствующих переменных $dx_1(t),\ldots,dx_m(t)$ по заданным неисправностям.

4. Находим все производные $f^{(k)}_{x_k\ldots x_1}=\frac{\partial^k f}{\partial x_k\ldots\partial x_1}$ дифференциала dy (см. (2)).

5. Убираем в разложении (2) все нулевые составляющие, в которых $dx_i(t)=0$, $f^{(k)}_{x_k\ldots x_1(t)}=0$. В результате получаем логическое выражение дифференциала dy неисправной схемы.

6. Применяем динамический метод прямых подстановок для вычисления dy и, таким образом, определяем искомый процесс Δ-изменения (1) анализируемой схемы, вызванный наличием заданной неисправности.

Рассмотрим более подробно вопросы, связанные с динамическим моделированием схемы. Выше предполагалось, что возникающие в схеме переключательные процессы описываются непрерывными двоичными функциями, а составляющие схему элементы безынерционны. В действительности это ограничение является весьма существенным и в значительной степени влияет на результат анализа. Инерциальные характеристики реальных физических элементов определяют максимальную частоту их переключения. Переключения входных сигналов с частотой выше предельной не воспринимаются элементом. В работе [3] это явление называется "высокочастотной отсечкой" элемента. Кроме того, при анализе динамики переключения цифрового устройства желательно учесть диапазон "флуктуаций" задержек его компонентов, который характеризует функционирование элементов в условиях воздействия на него ряда эксплуатационных и конструктивно-технологических факторов.

В [4] для точного описания работы устройства применена интервальная временная функция (ИВФ) $f(t)$, заданная двумя множествами временных интервалов (закрытых слева и открытых справа), на которых функция принимает единичные и нулевые значения. Определены тривиальные типы такой функции: Δ-шаг, Δ-контршаг, единичный и нулевой дребезги, прямоугольный Δ-импульс. Суперпозицией ИВФ тривиального типа предложено описывать любой переключательный процесс в устройстве при отсутствии в нем генерирующих контурных связей. Практическая реализация динамического моделирования на основе ИВФ связана с хранением в оперативной памяти большого объема информации, так как в общем случае в любой линии схемы возможен переключательный процесс большой кратности. Кроме того, сложность вычисления ИВФ от входного переключательного процесса большой кратности, описанного в свою очередь ИВФ, не позволяет построить эффективные процедуры реализации и, как следствие, получить эффективные средства для практического моделирования. Для повышения скорости интервального динамического моделирования воспользуемся упрощенной ИВФ, описывающей переключательный процесс множеством параметров

$$\{U, t_1, t_2, P_1, P_2\},$$

где $U \in \{0; 1\}$ – величина стабилизации справа соответствующей ИВФ; t_1, t_2 – пороги стабилизации слева и справа данной функции; P_1, P_2 – двоичные переменные, характеризующие ИВФ. При этом если $P_1 = P_2 = 0$, то упрощенная ИВФ описывает переключательный процесс, представляющий собой простое переключение сигнала, происходящее в интервале $[t_1, t_2[$ (в том случае, если $t_2 \geq t_1$, $t_1 > T_0$, где T_0 – момент изменения входного состояния схемы). Если $P_1 = 1$ или $P_2 = 1$ (состояние $P_1 = P_2 = 1$ недопустимо), то это характеризует ИВФ типа дребезга ($P_1 = 1$) или ИВФ, описывающую сигнал неплавного перехода. В данном случае $[t_1, t_2[$ – интервал времени не-

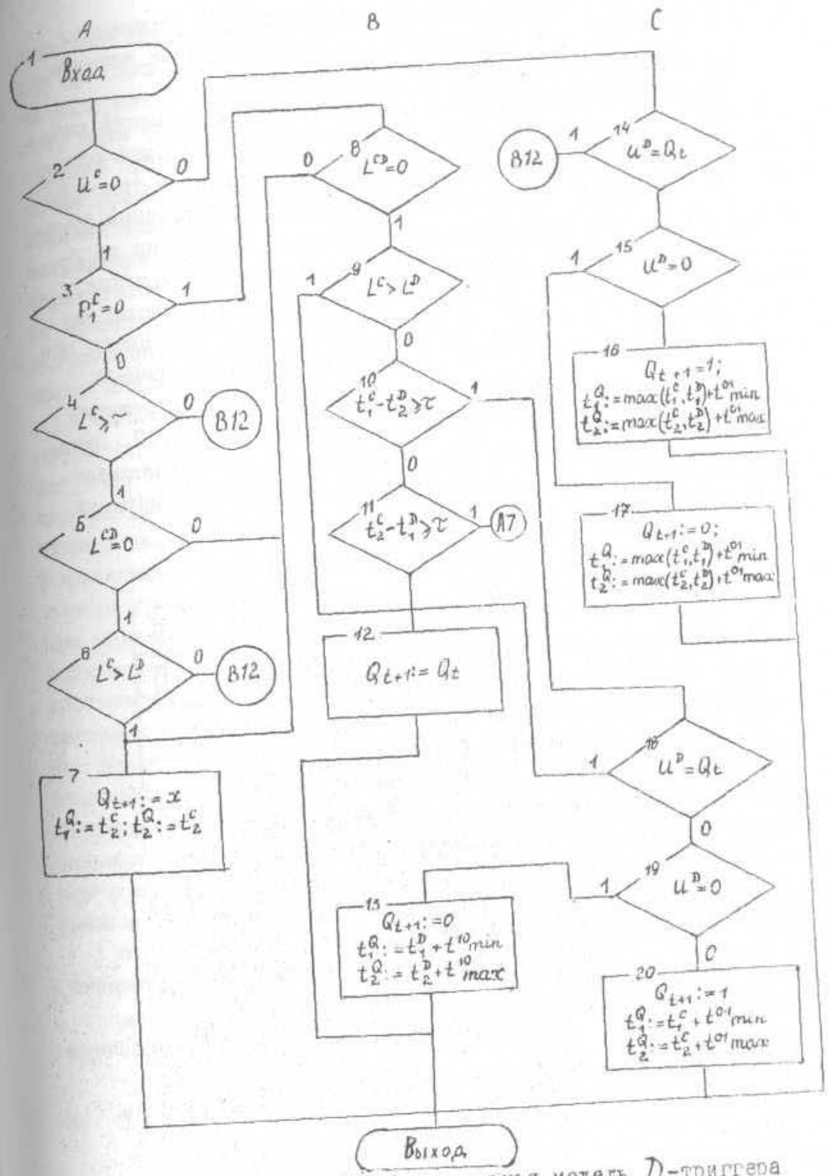


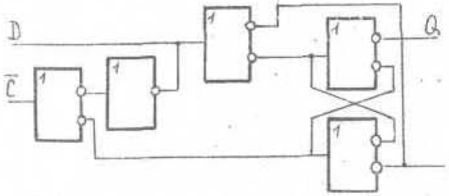
Рис. 1. Интервальная модель D-триггера

определенного состояния функции (иногда вместо переменных P_1 и P_2 используется переменная P, которая равна единице, если P_1 или P_2 равны единице).

Построение интервальной временной модели элемента вентильного типа не представляет трудностей и может быть основано, например, на использовании моделей элементов-типов И, ИЛИ, НЕ. Задача интервального временного моделирования функционально сложных элементов заключается в построении диаграммы альтернативных решений и определении характеристик устройства в терминах множества испытаний. Такое множество может быть полным в том смысле, что оно должно описывать все возможные аспекты функционирования устройства во времени

На рис. 1 дан пример диаграммы альтернативных решений для синхронного D -триггера, приведенного на рис. 2. Входное воздействие задано в виде упрощенных ИВФ двумя множествами параметров $\{U^c, t_1^c, t_2^c, P^c\}$ и $\{U^D, t_1^D, t_2^D, P^D\}$ (верхний индекс указывает на вход триггера).

а



б

$\bar{C}$	D	Q	$\bar{Q}$
1	x	Q	$\bar{Q}$
0	0	0	1
0	1	1	0

Рис. 2. Логическая схема (а) и таблица переходов (б) D-триггера

Интервал времени $[t_1^c, t_2^c[$ обозначен L^c, а $L^c \cap L^D$ - пересечение соответствующих интервалов - L^{cD}. Принято, что $L^c > L^D$, если $t_1^c \geq t_2^D$. Граничные задержки на переключение триггера обозначены $t_{min}^{01}, t_{max}^{01}, t_{min}^{10}, t_{max}^{10}$ (верхний индекс указывает вид переключения элемента); τ -величина инерциальной переменной.

Пока отсутствуют средства автоматического построения

диаграмм альтернативных решений. Построение таких диаграмм для функционально сложных элементов, учитывающих разбросы их задержек и разбросы моментов переключений входных сигналов, пока еще представляет собой неформальную достаточно сложную процедуру, основанную на эрудиции разработчика. В то же время использование подобных интервальных временных моделей элементов памяти позволяет успешно решать весьма актуальную проблему, связанную с необходимостью сохранить адекватность моделирования при переходе на более высокий по сравнению с логическим уровень описания моделируемого устройства, и, таким образом, значительно повысить размерность анализируемой схемы.

Одним из путей динамического моделирования сложных цифровых структур является применение "примитивного" подхода [5]. Структура может быть представлена на уровне элементов различной функциональной сложности, т.е. вентилей, элементов памяти, счетчиков, микропроцессоров и т.д. При этом управляющая часть системы представляется на вентильно-триггерном уровне, а операционная - на функциональном уровне. При моделировании элементов вентильного типа и элементов памяти может быть применена упрощенная интервальная модель, достаточно точно отражающая динамику их функционирования в реальных условиях. При моделировании же функционально сложных элементов можно применить "примитивную" модель, которая отличается от упрощенной интервальной модели простотой построения и тем, что фактически не позволяет определить стабильное конечное состояние элемента, а лишь дает представление о корректности временных соответствий между информационными и синхронизирующими сигналами.

Литература

1. Глушков В.М. Синтез цифровых автоматов. М.: Физматгиз, 1962. 420 с.

2. Левин В.И. Динамика логических устройств и систем. М.: Энергия, 1980. 224 с.

3. Chappel S.G., Jay C.S. Simulation of large asynchronous logic circuits using an ambiguous gate model//AFIPS Conf. Proc. 1971. Vol. 39. P. 651-666.

4. Золоторевич Л.А. Интервальная временная булева алгебра и ее применение для динамического анализа проектируемых устройств ЭВМ // Автоматика и вычисл. техника. 1984. № 4. С. 81-88.

5. Колдуэл Д., Ли Э. Пакет программ для проверки временных диаграмм работы цифровых схем в диалоговом режиме // Электроника. 1982. Т.55. № 19. С. 70 - 75.

УДК 681.3