

АКАДЕМИЯ НАУК ЛАТВИЙСКОЙ ССР

**АВТОМАТИКА
И
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

1984

ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК ● ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗИНАТНЕ» ● РИГА

УДК 007.52:519.873

Л. А. Золоторевич

ИНТЕРВАЛЬНАЯ ВРЕМЕННАЯ БУЛЕВА АЛГЕБРА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРОЕКТИРУЕМЫХ УСТРОЙСТВ ЭВМ

Повышение степени интеграции проектируемых микроэлектронных устройств требует постоянного совершенствования методов их математического анализа, применяемых на стадии проектирования. Используемые на практике методы моделирования дискретных устройств (ДУ) базируются на теории конечных автоматов, которая позволяет обнаруживать не практически возможные ошибки функционирования ДУ, а «соствязания» сигналов [1], ориентируя разработчика на обеспечение безошибочного переключения схемы даже в случае практически невозможных сочетаний величин паразитных задержек. В работе [2] предложен новый подход к моделированию ДУ, основанный на использовании математического аппарата бесконечнозначной логики, который позволяет учитывать реальные задержки элементов устройства. Этот подход обеспечивает более адекватное описание функционирования ДУ в стадии переключения. В работе [3] он распространяется на случай воздействий на входы ДУ последовательностей импульсов, содержащих немгновенные изменения сигналов, а также сигналов типа статического риска сбоя. Модель элемента, принятая в этой работе, учитывает номинальное значение задержки на срабатывание элемента и величину ее инерциальной составляющей. В работе [4] исследование динамики переключения ДУ осуществляется с вероятностной точки зрения. Весьма актуальной является задача исследования поведения ДУ в условиях отсутствия полной информации о временных параметрах составляющих компонентов, что имеет место на стадии проектирования. Ниже предлагается один подход к описанию динамических режимов функционирования ДУ. Задержки компонентов ДУ не известны, но имеются их граничные значения, в пределах которых эти задержки могут предполагаться.

Определим интервальную временную булеву переменную (ИВБП) как заданную строго возрастающую последовательность действительных значений времени, стремящуюся к бесконечности $(t_1, t_1^*, \dots, t_i, t_i^*, \dots)$, и последовательность значений булевых величин $(\delta_0, \delta_0^*, \dots, \delta_i, \delta_i^*, \dots)$. При этом ИВБП определяет сигнал, имеющий логическое значение δ_0 для $t < t_1$, значение δ_i для $t_i^* \leq t < t_{i+1}$ и значение δ_i^* для $t_i \leq t < t_i^*$; $t \in \bar{R}$ (\bar{R} — действительное число). Здесь $\delta_0, \delta_1, \dots, \delta_i, \dots$ — двоичные переменные, а $\delta_0^*, \delta_1^*, \dots, \delta_i^*, \dots$ — неизвестные значения булевой переменной. ИВБП определяется множеством интервалов, закрытых слева и открытых справа, в которых она имеет значение 1, а также множеством интервалов, закрытых слева и открытых справа, в которых она имеет значение 0. В интервалах времен $[t_i, t_i^*]$ значение функции не определено.

Логические функции $f(t)$ от ИВБП назовем интервальными временными булевыми функциями (ИВБФ). Множество таких функций обозначим W . На W введем операции сложения, умножения и дополнения следующим образом:

а) операция сложения: $\delta(t) = f(t) + g(t)$, где $\delta(t): \delta(t) = 1 \Leftrightarrow f(t) = 1$ или $g(t) = 1$; $\delta(t) = 0 \Leftrightarrow f(t) = g(t) = 0$; $\delta(t), f(t), g(t) \in W$ (в остальных случаях $\delta(t)$ не определена);

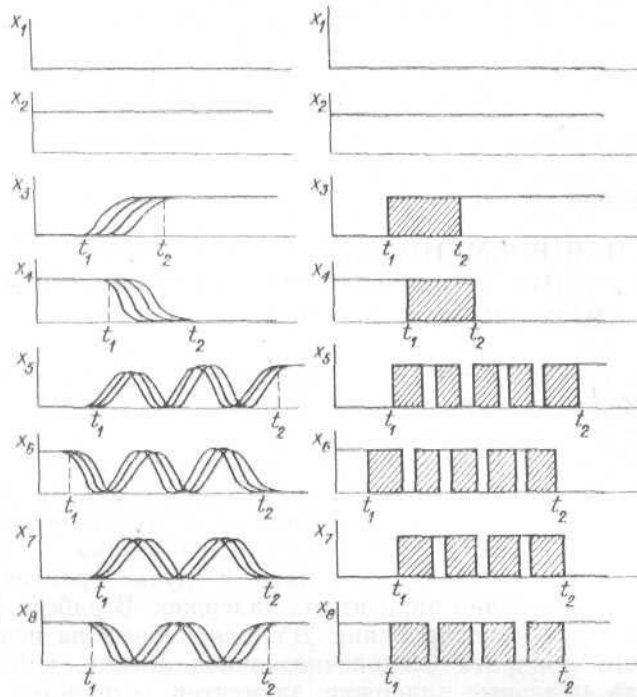


Рис. 1. Реальные сигналы, вырабатываемые в ДУ, и их представление в виде ИВБФ.

б) операция умножения: $\delta(t) = f(t) \cdot g(t)$, где $\delta(t)$: $\delta(t) = 1 \Leftrightarrow f(t) = g(t) = 1$; $\delta(t) = 0 \Leftrightarrow f(t) = 0$ или $g(t) = 0$; $\delta(t), f(t), g(t) \in W$ (в остальных случаях $\delta(t)$ не определена);

в) операция дополнения: $f'(t) = g(t)$, где $g(t)$: $g(t) = 1 \Leftrightarrow f(t) = 0$; $g(t) = 0 \Leftrightarrow f(t) = 1$; $f(t), g(t) \in W$ (в остальных случаях $g(t)$ не определена).

Определение 1. Множество ИВБП W вместе с операциями сложения, умножения и дополнения назовем интервальной временной булевой алгеброй и обозначим $B = \langle W; +, \cdot, ' \rangle$, где $\langle + \rangle$, $\langle \cdot \rangle$, $\langle ' \rangle$ — операции сложения, умножения и дополнения, определенные на множестве W .

Определим простые типы ИВБФ. Назовем Δ -шагом с передним Δ -фронтом $[t_i, t^*_i]$ ИВБФ $f(t)$: $\exists t_i, t^*_i \in \bar{R}$, $f(t) = 0$ для $t < t_i$ и $f(t) = 1$ для $t \geq t^*_i$. Аналогично, Δ -контршагом с задним Δ -фронтом $[t_j, t^*_j]$ называется ИВБП $f(t)$: $\exists t_j, t^*_j \in \bar{R}$, $f(t) = 1$ для $t < t_j$ и $f(t) = 0$ для $t \geq t^*_j$. Прямоугольным Δ -импульсом называется $f(t)$: $\exists t_i, t^*_i, t_j, t^*_j \in \bar{R}$, $f(t) = 1$ ($f(t) = 0$) для $t^*_i \leq t < t_j$ и $f(t) = 0$ ($f(t) = 1$) для $t \geq t^*_j, t < t_i$; $t_i \leq t^*_i < t_j \leq t^*_j$. Единичным дребезгом называется ИВБФ $f(t)$: $\exists t_i, t^*_i \in \bar{R}$, $f(t) = 0$ для $t \geq t^*_i$ и $t < t_i$; $t_i < t^*_i$. В интервале времени $[t_i, t^*_i]$ значение $f(t)$ не определено. Нулевым дребезгом называется $f(t)$: $\exists t_i, t^*_i \in \bar{R}$, $f(t) = 1$ для $t \geq t^*_i$ и $t < t_i$; $t_i < t^*_i$. В интервале времени $[t_i, t^*_i]$ значение $f(t)$ не определено. На рис. 1 приведены сигналы, вырабатываемые в ДУ, и их представление ИВБФ.

Определение 2. ИВБФ $f(t)$ называется стабилизированной, если $\exists t_i, t^*_i, t_j, t^*_j$, что $f(t) = 1$ или $f(t) = 0$ для $t < t_i, t \geq t^*_j, t_i \leq t^*_i < t_j \leq t^*_j$. Здесь t_i, t^*_j называются порогами стабилизации ИВБФ $f(t)$ слева и справа соответственно. Обозначим порог стабилизации $f(t) \in W$ слева (справа) через $PS^a(f(t))$ ($PS^b(f(t))$). Стабилизированными значениями слева и справа стабилизированной ИВБФ $f(t)$ являются величины стабилизации $VS^a(f(t))$ и $VS^b(f(t))$ — значения $f(t)$ для $t < PS^a(f(t))$ и $t > PS^b(f(t))$ соответственно.

Обозначим A^1 — ИВБФ $f_{A^1}: f_{A^1}=1, \forall t, t \in [0, \infty[$; A^0 — ИВБФ $f_{A^0}: f_{A^0}=0, \forall t, t \in [0, \infty[$. Стабилизированной ИВБФ описывается любой переходный процесс, возникающий в ДУ, если в нем отсутствуют генерирующие контурные связи.

Представим логический элемент i в виде последовательного соединения идеального элемента, мгновенно воспроизводящего определенную булеву функцию, к j -й входной цепи которого присоединена линия задержки с величиной, расположенной в некотором диапазоне времени, заданном минимальной ($t_{i(j)\min}^1$ или $t_{i(j)\min}^0$) и максимальной ($t_{i(j)\max}^1$ или $t_{i(j)\max}^0$) статистически определяемыми величинами паразитных задержек и величиной инерциальной составляющей τ_i , зависящими от ряда технологических и эксплуатационных факторов [5]. Сведем задачу адекватного моделирования логической схемы, представленной ее структурой, к определению ИВБФ, описывающих переходный процесс на выходе каждого составляющего элемента. Определим оператор линейного сдвига $\tau^{k_1, k_2}, W \rightarrow W$, где $k_1, k_2 \in \mathbb{R}, k_2 \geq k_1$, таким образом, что умножение ИВБФ $g(t)$ на τ^{k_1, k_2} дает ИВБФ, которая получается из $g(t)$ путем сдвига на величину k_1 вправо по оси времени интервалов неопределенности и их расширения на величину $(k_2 - k_1)$. Этот оператор моделирует прохождение переключательного процесса, описанного ИВБФ, через линию задержки, характеризующуюся свойствами совершенной задержки [1], с величиной, расположенной в диапазоне времени $[k_1, k_2[$.

Рассмотрим свойства τ^{k_1, k_2} : 1) если $f(t), g(t) \in W$, то $\tau^{k_1, k_2}(f(t)g(t)) = (\tau^{k_1, k_2}f(t))(\tau^{k_1, k_2}g(t))$; 2) если $f(t), g(t) \in W$, то $\tau^{k_1, k_2}(f(t) + g(t)) = \tau^{k_1, k_2}f(t) + \tau^{k_1, k_2}g(t)$; 3) если $f(t) \in W$, то $(\tau^{k_1, k_2}f(t))' = \tau^{k_1, k_2}f'(t)$; 4) если $f(t) \in W$, то при $k_1 = k_2 = k$ $f(t) = \tau^{k_1, k_2}f(t - k)$.

Определим оператор симметричного сдвига $\tau^{m_1, m_2, n_1, n_2}, W \rightarrow W$, где $m_1, m_2, n_1, n_2 \in \mathbb{R}; m_2 \geq m_1; n_2 \geq n_1$, таким образом, что воздействие оператора симметричного сдвига на ИВБФ аналогично воздействию оператора линейного сдвига τ^{k_1, k_2} на передние Δ -фронты ИВБФ при $k_1 = m_1, k_2 = m_2$, на задние Δ -фронты — при $k_1 = n_1, k_2 = n_2$, на фронты сигналов единичного дребезга — при $k_1 = m_1, k_2 = n_2$ и нулевого дребезга — при $k_1 = n_1, k_2 = m_2$.

Оператор симметричного сдвига $\tau^{m_1, m_2, n_1, n_2}$ моделирует прохождение переключательного процесса, описанного ИВБФ, через линию совершенной задержки, величина которой расположена в заданном диапазоне, зависящем от вида переключения. Воздействие оператора симметричного сдвига на ИВБФ, в отличие от оператора линейного сдвига, может уменьшить кратность соответствующего переключательного процесса.

Определим задачу временного моделирования поведения ДУ как выяснение характера реакций составляющих элементов и вычисление времен возможных переключений сигналов в устройстве при воздействии определенного входного набора, описанного ИВБФ. Рассмотрим процесс переключения логического элемента. Определим множество операторов преобразования $W \rightarrow W: \Omega(m_1, m_2, n_1, n_2) x_j = x'_j$. Здесь x_j — преобразуемая ИВБФ. Для получения ИВБФ x'_j необходимо выполнить линейный или симметричный сдвиг ИВБФ x_j . Определим далее множество операторов преобразования $W \rightarrow W$, которые будем называть операторами высокочастотной отсеки: $\Phi(\tau_i)(z'_i) = z_i$. Для получения ИВБФ z_i необходимо в ИВБФ z'_i , представленной в виде суперпозиции ИВБФ простых типов, исключить составляющие, которые моделируют изменения сигнала с длительностью, меньшей или равной τ_i , где τ_i — инерциальная переменная элемента [5]. Если z_i — ИВБФ, описывающая поведение i -го элемента, x_j — ИВБФ, описывающая поведение элементов, являющихся источниками входных сигналов для i -го элемента, а z_i^1 — логическая функция, реализуемая идеальным элемен-

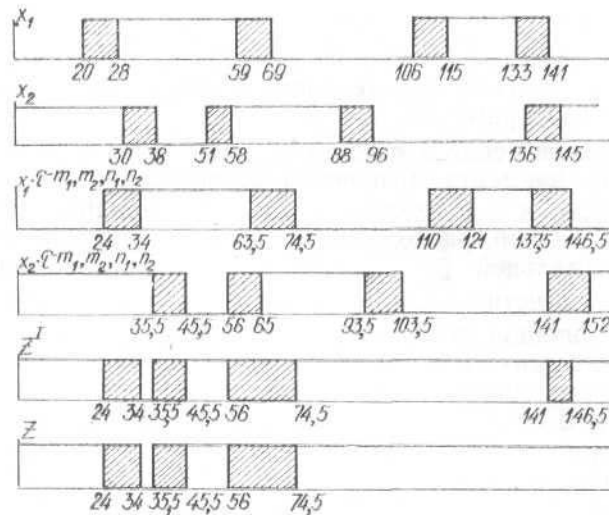


Рис. 2. Эпюры ИВБФ, полученных в результате последовательных этапов преобразования входных воздействий, поданных на элемент И—НЕ; $t_{i(1)\min}^1 = 4$ нс; $t_{i(1)\max}^1 = 6$ нс; $t_{i(1)\min}^0 = 4,5$ нс; $t_{i(1)\max}^0 = 5,5$ нс; $t_{i(2)\min}^1 = 5$ нс; $t_{i(2)\max}^1 = 7$ нс; $t_{i(2)\min}^0 = 5,5$ нс; $t_{i(2)\max}^0 = 7,5$ нс; $\tau_i = 6$ нс.

том, то реальное функционирование элемента можно описать с помощью суперпозиции операторов преобразования $W \rightarrow W$:

$$\Phi(\tau_i) z_i^I \Omega x_j = z_i.$$

Таким образом, моделирование элемента включает следующие этапы.

1. Выполнить линейный или симметричный сдвиг ИВБФ, описывающих входные воздействия.
2. Выполнить соответствующую логическую функцию, определяемую типом логического элемента, над ИВБФ, полученными в результате выполнения п. 1 [3].
3. Преобразовать полученную в результате выполнения п. 2 ИВБФ с помощью операторов высокочастотной отсечки.
4. Конец.

Рассмотрим моделирование двухвходового вентиля И—НЕ, временные параметры которого приведены на рис. 2. На входы элемента действуют сигналы, описываемые ИВБФ x_1 и x_2 , которые будем представлять в виде суперпозиции Δ -шагов, Δ -контршагов, прямоугольных Δ -импульсов и сигналов дребезга: $x_1 = (20-28) (59'-69') + (106-115) \times (133'-141')$; $x_2 = (30'-38') + (51-58) (88'-96') + (136-145)$. В соответствии с заданными временными параметрами элемента осуществляем линейный и симметричный сдвиги ИВБФ. При этом для x_1 оператор $\tau^{m_1, m_2, n_1, n_2} = \tau^{4,5;5,5;4;6}$, а для x_2 — $\tau^{5,5;7,5;5;7}$. На рис. 2 приведены эпюры ИВБФ x_1 и x_2 , результаты их сдвига, а также результат моделирования элемента, который описывается стабилизированной ИВБФ $z = (24'-34') + (35,5-45,5) (56'-74,5') + (56-74,5)$.

Вычисление ИВБФ можно проводить вручную методами, приведенными, например, в работе [3]. Однако для решения практических задач моделирования ДУ такой подход неприемлем. Поэтому считаем целесообразным вычисление ИВБФ с помощью ЭВМ декомпозиционными методами [6].

Расширим понятие стабилизированной ИВБФ. Составную ИВБФ $(W)_g$ будем называть стабилизированной, если все ее составляющие являются стабилизированными ИВБФ. Если

$$(W(t))_g = \begin{pmatrix} W_1(t) \\ \dots \\ W_i(t) \\ \dots \\ W_g(t) \end{pmatrix} \text{ — стабилизированная ИВБФ, то}$$

$$PS^\alpha((W(t))_g) = \min_{i=1, g} \{PS^\alpha(W_i(t))\};$$

$$PS^\beta((W(t))_g) = \max_{i=1, g} \{PS^\beta(W_i(t))\};$$

$$VS^\alpha((W(t))_g) = \begin{pmatrix} VS^\alpha(W_1(t)) \\ \dots \\ VS^\alpha(W_i(t)) \\ \dots \\ VS^\alpha(W_g(t)) \end{pmatrix}; \quad VS^\beta((W(t))_g) = \begin{pmatrix} VS^\beta(W_1(t)) \\ \dots \\ VS^\beta(W_i(t)) \\ \dots \\ VS^\beta(W_g(t)) \end{pmatrix}.$$

Утверждение 1. Если $(W)_h$ — составная стабилизированная ИВБФ, описывающая полное состояние схемы, то максимальная длительность переходного процесса в схеме определяется порогами стабилизации слева и справа ИВБФ $(W)_h$: $T_{\max} = |PS^\alpha((W)_h) - PS^\beta((W)_h)|$.

Рассмотрим ИВБФ $U(t) \in W$ или $U(t) \in (W)_h$. Определим упорядоченное конечное множество действительных чисел (t_1, \dots, t_l) . Тогда под разделением ИВБФ $U(t)$, связанным с множеством (t_1, \dots, t_l) , будем понимать $l+1$ ИВБФ, определенных правилом R : $(U(t), (t_1, \dots, t_l)) \rightarrow (U^0, U^1, \dots, U^l)$, где

$$U^i(t) = \begin{cases} U(t) & \text{для } t_i < t < t_{i+1}; \\ U(t_i) & \text{для } t \leq t_i; \\ U(t_{i+1}) & \text{для } t \geq t_{i+1}. \end{cases}$$

В частности,

$$U^0(t) = \begin{cases} U(t) & \text{для } t < t_1; \\ U(t_1) & \text{для } t \geq t_1; \end{cases} \quad U^l(t) = \begin{cases} U(t) & \text{для } t > t_l; \\ U(t_l) & \text{для } t \leq t_l. \end{cases}$$

Рассмотрим пример. Пусть составная ИВБФ $(W)_2$ имеет следующий вид:

$$(W(t))_2 = \begin{pmatrix} (1-3)(8'-9') + (15-20) \\ (5-7)(15'-17') + (25-27) \end{pmatrix}.$$

Тогда

$$R((W(t))_2, (4; 7,5; 12; 20)) = \begin{pmatrix} (1-3) \\ A^0 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} A^1 \\ (5-7) \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} (8'-9') \\ A^1 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} (15-20) \\ (15'-17') \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} A^1 \\ (25-27) \end{pmatrix}.$$

Заметим, что для любого разделения ИВБФ характерно следующее свойство: если (U^0, \dots, U^l) — разделение ИВБФ $U(t)$ относительно (t_1, \dots, t_l, \dots) , то $VS^\beta(U^i) = VS^\alpha(U^{i+1})$, а $PS^\beta(U^i) < PS^\alpha(U^{i+1})$, $i=0, 1, \dots, l-1$. При заданном множестве ИВБФ (U^0, \dots, U_l) , в котором все составляющие ИВБФ удовлетворяют отношениям указанного выше свойства, можно определить единственную ИВБФ, для которой данное множество будет разделением относительно (t_1, \dots, t_l) , где $t_i \in]PS^\beta(U^{i-1}), PS^\alpha(U^i)[$.

Для того чтобы восстановить ИВБФ $U(t)$ по одному из ее разделений, определим операцию присоединения $\lambda(W \rightarrow W)$.

Если $U^1, U^2 \in W$, $PS^\beta(U^1) < PS^\alpha(U^2)$ и $VS^\beta(U^1) = VS^\alpha(U^2)$, то

$$U^1 \lambda U^2 = \begin{cases} U^1 \cdot U^2, & \text{если } VS^\beta(U^1) = 1; \\ U^1 + U^2, & \text{если } VS^\beta(U^1) = 0. \end{cases}$$

В остальных случаях λ -операция присоединения не определена. Применительно к составной ИВБФ λ -операция выглядит так:

$$\left| \begin{array}{c} U^1 \\ \vdots \\ U^i \end{array} \right| \lambda \left| \begin{array}{c} W^1 \\ \vdots \\ W^i \end{array} \right| = \left| \begin{array}{c} U^1 \lambda W^1 \\ \vdots \\ U^i \lambda W^i \end{array} \right|.$$

Утверждение 2. Если (U^0, U^1, \dots, U^l) — разделение ИВБФ $U(t)$, то $U(t) = U^0 \lambda U^1 \lambda \dots \lambda U^l$.

На основании приведенной теоремы восстановим ИВБФ по одному из ее разделений:

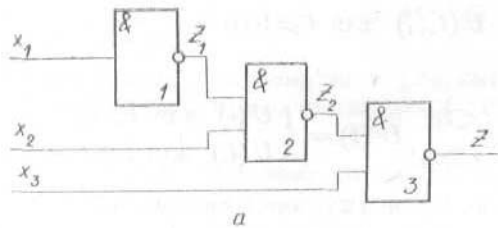
$$\left| \begin{array}{c} (1-3) \\ A^0 \end{array} \right| \lambda \left| \begin{array}{c} A^1 \\ (5-7) \end{array} \right| \lambda \left| \begin{array}{c} (8'-9') \\ A^1 \end{array} \right| \lambda \left| \begin{array}{c} (15-20) \\ (15'-17') \end{array} \right| \lambda \\ \lambda \left| \begin{array}{c} A^1 \\ (25-27) \end{array} \right| = \left| \begin{array}{c} (1-3)(8'-9') + (15-20) \\ (5-7)(15'-17') + (25-27) \end{array} \right|.$$

Рассмотрим комбинационную схему с r входами и g выходами. Входное воздействие описывается составной ИВБФ $(X)_r$. Разделение $(X)_r \rightarrow (X^0, X^1, \dots, X^l)$. Выходные сигналы описываются составной ИВБФ $(z)_g$. Тогда справедливо следующее утверждение.

Утверждение 3. Если реакция схемы на входное воздействие, описываемое $(X)_r$, равна результату λ -операции присоединения реакций схемы, полученных на каждую составляющую X^i разделения $(X)_r$, то комбинационная схема работает без ошибок, т. е. в ответ на простое переключение входов [2] на выходах схемы происходят простые переключения сигналов.

Рассмотрим схему, изображенную на рис. 3. Пусть на входы схемы воздействуют сигналы, описываемые составной ИВБФ

$$(X)_3 = \left| \begin{array}{c} (10'-14') \\ A^1 \\ (19-25) \end{array} \right|.$$



Рассмотрим разделение

$$R((X)_3, (16)) = \left| \begin{array}{c} (10'-14') \\ A^1 \\ A^0 \\ (19-25) \end{array} \right|.$$

Определим реакцию схемы в ответ на $(X)_3$ и на каждую составляющую X^0, X^1 ее разделения. Эпюры ИВБФ, описывающих функционирование эле-

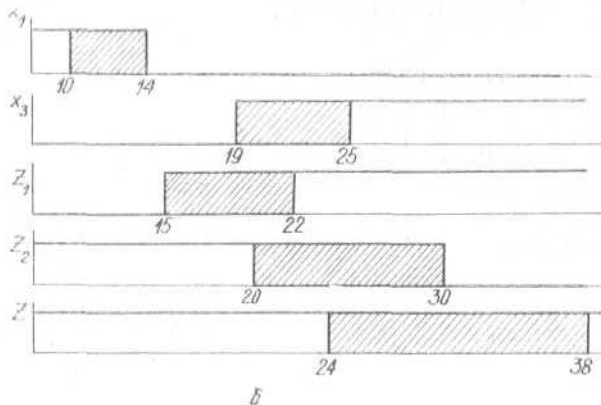


Рис. 3. Интервальное временное моделирование комбинационной схемы: $t_{i \min}^1 = t_{i \min}^0 = 5$ нс; $t_{i \max}^1 = t_{i \max}^0 = 8$ нс; $\tau_i = 5$ нс ($i \in \{4, 5, 6\}$).

ментов схемы, приведены на рис. 3—б. В результате моделирования схемы получаем: $z((X)_3) = (24' - 38') + (24 - 38)$; $z(X^0) = A^1$; $z(X^1) = A^1$. Очевидно, что $(24' - 38') + (24 - 38) \neq A^1 \lambda A^1$, т. е. в данном случае реакция схемы на входное воздействие, описываемое $(X)_3$, не равна результату λ -операции присоединения реакций, полученных на составляющие X^0 и X^1 . Значит, простой переключательный процесс на входах схемы при заданных разбросах задержек элементов может привести к появлению на ее выходе ложного сигнала. Если же на входы схемы воздействуют сигналы, описываемые ИВБФ

$$(X)_3 = \begin{pmatrix} (10' - 14') \\ A^1 \\ (27 - 33) \end{pmatrix},$$

то этого не произойдет, так как $z((X)_3) = z(X^0) = z(X^1) = A^1$.

В работе [4] для анализа динамических режимов последовательностного ДУ используются рекуррентные временные булевы функции от входных временных переменных и временных переменных обратной связи. Такие функции зависят не только от значений входных сигналов, но и от значений сигнала на анализируемом выходе. При этом, если между входом и выходом ДУ имелось \bar{n} путей с различными задержками, то значение выходного сигнала в момент времени t может определяться, кроме входных сигналов, еще и значениями этого же сигнала в \bar{n} моментов времени, задаваемых указанными задержками. Применение интервального временного моделирования при решении указанной задачи не всегда позволяет построить точную цепь событий, возникающих на входах контурных элементов, так как при этом интервалы времени возможного появления событий могут пересекаться. В данном случае цепь событий строится по минимальному граничному времени. Экспериментальное исследование соответствующих программных средств показало практически приемлемую адекватность получаемых моделей.

Применение интервальной временной булевой алгебры представляет определенный интерес при проектировании асинхронных схем, корректных по Хаффмену [1]. Учитывая величины разбросов задержек элементов, составляющих такую схему, а также задержек сигналов в линиях связи, можно определить такой наименьший интервал следования последовательных входных изменений, что при любом превышении данного интервала схема работает без отклонений от наперед заданного закона функционирования.

Приведем общий алгоритм интервального временного моделирования последовательностной схемы. Схема имеет r входов, на которые воздействует переключательный процесс, описываемый составной ИВБФ $(X(t))_r$, g выходов, описываемых ИВБФ $(Y(t))_g$, n элементов. Полное состояние схемы описывается составной ИВБФ $(L(t))_n$. Здесь

$$(X(t))_r = \begin{pmatrix} X_1(t) \\ \dots \\ X_i(t) \\ \dots \\ X_r(t) \end{pmatrix}; \quad (Y(t))_g = \begin{pmatrix} Y_1(t) \\ \dots \\ Y_i(t) \\ \dots \\ Y_g(t) \end{pmatrix}; \quad (L(t))_n = \begin{pmatrix} L_1(t) \\ \dots \\ L_i(t) \\ \dots \\ L_n(t) \end{pmatrix}$$

1. Вычислить разделение $PR((X(t))_r) = ((X(t))_r)^0, (X(t))_r^1, \dots, (X(t))_r^k$. Здесь

$$(X(t))_r^i = \begin{pmatrix} (X_1(t))^i \\ \dots \\ (X_2(t))^i \\ \dots \\ (X_r(t))^i \end{pmatrix} \quad (0 \leq i \leq k).$$

2. Установить $L^0 \in \{A^1, A^0\}_n; i := 0$.
3. $X^i := (X(t))_T^i; j := 1$.
4. Сформулировать множество $S (S = \{s_1, \dots, s_p\})$ возбужденных элементов схемы, относящихся к моменту времени, определенному i -й составляющей разделения $PR((X(t))_T)$.
5. Вычислить ИВБФ, описывающую функционирование элемента s_j .
6. Если состояние элемента (величина и порог стабилизации справа соответствующей ИВБФ) не изменилось, перейти к п. 9.
7. Определить множество S_1 элементов, нагруженных на s_j . Если $\dim S_1 = \emptyset$, перейти к п. 9.
8. $S = S \tilde{\cup} S_1$. Здесь $\tilde{\cup}$ — операция объединения множеств с одновременным упорядочением элементов в соответствии с минимальными граничными временами появления событий на их входах.
9. Исключить s_j из множества S .
10. Если $\dim S \neq \emptyset, j := j + 1$, перейти к п. 5.
11. Если $i \geq k$, перейти к п. 13.
12. $i := i + 1$. Перейти к п. 3.
13. $L := L^0 \lambda L^1 \lambda \dots \lambda L^k$.
14. Конец.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ангер С. Асинхронные последовательностные схемы. М.: Наука, 1977. 398 с.
2. Левин В. И. Бесконечнозначная логика и переходные процессы в конечных автоматах. — АВТ, 1972, № 6, с. 1—9.
3. Левин В. И. Переходные процессы в комбинационных схемах при затянутых фронтах сигналов. — Изв. АН СССР. Техн. кибернетика, 1975, № 2, с. 118—127.
4. Рогинский В. Н. Основы дискретной автоматки. М.: Связь, 1975. 429 с.
5. Золоторевич Л. А. Определение длительности переходного процесса в логических схемах. — АВТ, 1977, № 6, с. 19—22.
6. Золоторевич Л. А., Медзько Т. В. Многозначное моделирование дискретных устройств без сходящихся ветвлений с учетом разбросов задержек на срабатывание логических элементов. — В кн.: Современные вычислительные и автоматизированные системы, 1980, с. 75—78 (Минск: БГУ).

Поступила в редакцию
10.10.83 (30.11.82)