

К. т. н. О. В. НИКОЛАЕНКО

Украина, г. Одесса, Гос. политехнический ун-т

Дата поступления в редакцию
09.12 1998 г.
Оппонент к. т. н. Н. И. КОВАЛЕВ

ТЕРМОЗАВИСИМЫЕ МАКРОМОДЕЛИ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Макромодели позволяют реализовать схемотехническое и функционально-логическое проектирование с учетом влияния температуры в общем базисе.

Macromodels allow to realize the circuit engineering and functional-logical design with taking account of temperature influence in common basis.

Современная электронная аппаратура (ЭА) базируется на схемотехнических решениях, содержащих аналоговую и цифровую части, последняя из которых чаще всего имеет достаточно сложную структуру и включает большое количество логических элементов. Поэтому автоматизированная разработка электронной схемы аппаратуры основывается на использовании как схемотехнических САПР, так и САПР функционально-логического проектирования [1, 2]. При этом первой задачей, возникающей в процессе обработки схемотехнического решения ЭА, является стыковка результатов анализа аналоговой и цифровой частей аппаратуры в средах соответствующих САПР. Вторая, не менее важная, задача — анализ влияния температуры на характеристики цифровой части ЭА.

Предлагаемый в настоящей работе подход позволяет решить обе вышеуказанные задачи в среде СхСАПР на базе термозависимых макромоделей цифровых электронных устройств, что обеспечивает практическую разработку схемы ЭА на ЭВМ.

В общем случае в процессе функционально-логического проектирования находят применение следующие алфавиты моделирования [3, с. 57]: двоичный {0, 1}, троичный {0, 1, x}, четырехзначный {0, 1, x, z}, пятизначный {0, 1, x, /, \} и шестизначный {0, 1, x, /, \, z}, где 0 — состояние логического нуля, 1 — состояние логической единицы, x — логически неопределенное состояние, z — высокоимпедансное состояние, / — переключение из 0 в 1, \ — переключение из 1 в 0. Существуют и другие алфавиты моделирования, однако с ростом числа знаков алфавита быстро увеличивается время проектирования и требуемый объем оперативной памяти.

Максимально простыми и достаточно эффективными в плане реализации можно считать моделирование с алфавитом двоичным — {0, 1}, двоичным с задержкой — {0, 1, τ } и троичным — {0, 1, 1/2}. Этим алфавитам соответствуют синхронное, асинхронное и трехзначное функционально-логическое проектирование [3, 4], для

решения задач которого и предназначены предлагаемые термозависимые макромодели электронных цифровых устройств (ЭЦУ) [5].

Термозависимые функционально-логические макромодели (ТФЛМ) ЭЦУ можно разделить на два типа (синхронные и асинхронные макромодели), каждый из которых может быть с двузначной и трехзначной логикой.

На рис. 1 (здесь t — время) приведены эпюры сигналов входного ($U_{вх}(t)$), выходного ($U_{вых}(t)$), с двузначной ($U_{c2}(t)$) и трехзначной ($U_{c3}(t)$) логикой для синхронных ТФЛМ ЭЦУ. При этом зависимыми от температуры (T) являются параметры $U^1(T)$

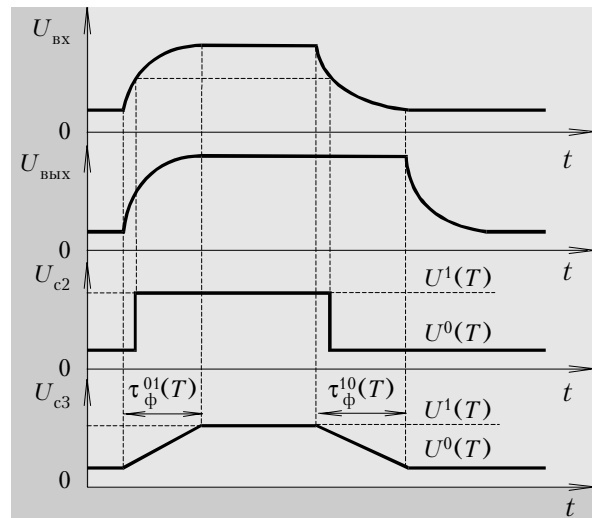


Рис. 1

(U^1 — уровень логической единицы), $U^0(T)$ (U^0 — уровень логического нуля) и $\tau_\phi(T)$ — длительность фронтов (обычно $\tau_\phi(T) = [\tau_\phi^{01}(T) + \tau_\phi^{10}(T)]/2$, где $\tau_\phi^{01}(T)$, $\tau_\phi^{10}(T)$ — длительность соответственно переднего и заднего фронтов сигнала).

Рис. 2 иллюстрирует эпюры сигналов для асинхронных ТФЛМ ЭЦУ с двузначной ($U_{a2}(t)$) и трехзначной ($U_{a3}(t)$) логикой. При этом дополнительным параметром, зависящим от температуры, выступает время задержки $\tau_3(T) = [\tau_3^{01}(T) + \tau_3^{10}(T)]/2$, где $\tau_3^{01}(T)$, $\tau_3^{10}(T)$ — время задержки соответственно переднего и заднего фронтов сигнала.

Как следует из приведенных эпюр, ТФЛМ первого типа обеспечивают проведение анализа логики

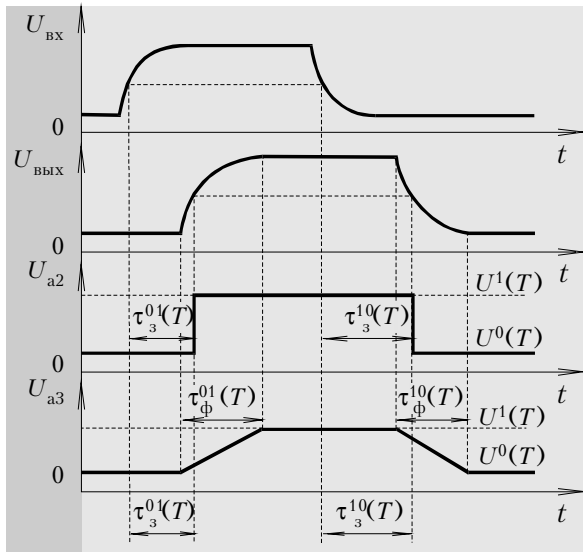


Рис. 2

функционирования схемы с возможностью выявления статического риска сбоя. Второй тип ТФЛМ позволяет дополнительно оценить динамический риск сбоя в схеме ЭА. При этом как синхронные, так и асинхронные ТФЛМ обладают параметрами, зависящими от температуры T ($U^0(T)$, $U^1(T)$, $\tau_\phi(T)$, $\tau_3(T)$), и, следовательно, позволяют описывать работу цифровой части аппаратуры при различных ее значениях.

Рассмотрим подробнее особенности формирования и применения предлагаемых ТФЛМ ЭЦУ.

Для синхронных макромоделей (рис. 1) справедливы следующие допущения: все сигналы могут иметь значения $U^M(T) \in [U^{M0}(T), U^{M1}(T)]$; задержки всех моделируемых ЭЦУ приняты равными нулю; изменение состояния элементов памяти может происходить не более одного раза за такт анализа. Тогда для выходных сигналов ТФЛМ можно записать:

$$\begin{aligned} U_{\text{ВЫХ}}^{M0}(T) &= [U_{\text{ВЫХ}}^0(T) - U_0^0] / [U_1^0 - U_0^0]; \\ U_{\text{ВЫХ}}^{M1}(T) &= [U_{\text{ВЫХ}}^1(T) - U_0^0] / [U_1^0 - U_0^0], \end{aligned} \quad (1)$$

где U_0^0 , U_1^0 — напряжения логического нуля и логической единицы эталонного ЭЦУ при температуре 20°C (в качестве эталонного ЭЦУ целесообразно выбирать типовой логический элемент для данной серии ИС).

Реальные выходные напряжения ЭЦУ ($U_{\text{ВЫХ}}^0(T)$, $U_{\text{ВЫХ}}^1(T)$) в соотношениях (1) можно описать следующим образом:

$$U_{\text{ВЫХ}}(T) = \begin{cases} U_{\text{ВЫХ}}^0(T) & \text{при } \Delta U_{\text{ВХ}}(T) \leq U_{\text{П}}^0(T); \\ U_{\text{ВЫХ}}^1(T) & \text{при } U_{\text{ВХ}}(T) \geq U_{\text{П}}^1(T), \end{cases} \quad (2)$$

где $U_{\text{П}}^0$, $U_{\text{П}}^1$ — пороговое напряжение соответственно логического нуля и логической единицы; реальное входное напряжение ЭЦУ $U_{\text{ВХ}}(T)$ рассчитывается по формуле

$$U_{\text{ВХ}}(T) = U_{\text{ВХ}}^M(T)(U_1^0 - U_0^0) + U_0^0. \quad (3)$$

Как следует из соотношения (1) для ТФЛМ, у которой $U_{\text{ВЫХ}}^{M0}(T) = U_0^0$ и $U_{\text{ВЫХ}}^{M1}(T) = U_1^0$, имеем:

$$U_{\text{ВЫХ}}^{M0}(T) = 0, \quad U_{\text{ВЫХ}}^{M1}(T) = 1.$$

При использовании синхронных ТФЛМ в процессе проектирования ЭА величины $U_{\text{ВЫХ}}^{M0}(T)$ и $U_{\text{ВЫХ}}^{M1}(T)$ отличаются от значений 0 и 1. Это отличие обусловлено, во-первых, влиянием температуры T , а во-вторых, особенностью моделируемого ЭЦУ и его отклонением от эталонного устройства. (Как отмечалось выше, для синхронных ТФЛМ с трехзначной логикой от температуры также зависит длительность фронта ($\tau_\phi(T)$). Поэтому зависимости (2), (3) удобно представлять в виде полиномов, построенных на основе известных методов аппроксимации, в частности, на базе метода со сглаживающим дополнением [6]:

$$U(T) = \sum_{s=0}^m a_s T^s; \quad \tau_\phi(T) = \sum_{i=0}^n b_i T^i, \quad (4)$$

где $U(T)$ идентифицирует величины $U_{\text{ВЫХ}}^0(T)$, $U_{\text{ВЫХ}}^1(T)$, $U_{\text{П}}^0(T)$, $U_{\text{П}}^1(T)$; a_s , b_i — численные коэффициенты ($s = 0, m, i = 0, n$).

Например, зависимости типа (4) для логического элемента И — НЕ (К155ЛА8) имеют вид

$$\begin{aligned} U_{\text{ВЫХ}}^0(T) &= 0,0928 - 5,8 \cdot 10^{-4} T; \\ U_{\text{ВЫХ}}^1(T) &= 4,07216 + 6,43 \cdot 10^{-3} T - 5 \cdot 10^{-5} T^2; \\ U_{\text{П}}^0(T) &= 1,5651 - 3,27 \cdot 10^{-3} T + 10^{-5} T^2; \\ U_{\text{П}}^1(T) &= 1,3651 - 3,27 \cdot 10^{-3} T + 10^{-5} T^2; \\ \tau_\phi^0(T) &= 25,62742 - 3,164 \cdot 10^{-2} T + 3,3 \cdot 10^{-4} T^2; \\ \tau_\phi^1(T) &= 41,90582 + 4,07 \cdot 10^{-3} T + 10^{-4} T^2, \end{aligned} \quad (5)$$

где $U_{\text{ВЫХ}}^0(T)$, $U_{\text{ВЫХ}}^1(T)$, $U_{\text{П}}^0(T)$, $U_{\text{П}}^1(T)$ определены в вольтах, а $\tau_\phi^0(T)$, $\tau_\phi^1(T)$ — в наносекундах.

Для асинхронных макромоделей (рис. 2) справедливы все вышеприведенные допущения за исключением равенства нулю задержек сигналов. В таких ТФЛМ, как уже отмечалось выше, дополнительным параметром, зависящим от температуры T , является время задержки. Например, для того же логического элемента И — НЕ (5) имеем (4):

$$\begin{aligned} \tau_3^0(T) &= 23,30194 - 6,531 \cdot 10^{-2} T + 2,7 \cdot 10^{-4} T^2; \\ \tau_3^1(T) &= 12,38579 + 3,869 \cdot 10^{-2} T + 7 \cdot 10^{-5} T^2. \end{aligned}$$

Справедливыми для асинхронных ТФЛМ являются также зависимости (1) — (3).

Как синхронные, так и асинхронные ТФЛМ имеют выходные напряжения, значения которых отличаются от 0 и 1, и, следовательно, вычисление традиционных булевых функций для них затруднено. В связи с этим описание логических свойств таких макромоделей базируется на следующих представлениях:

дизъюнкции —

$$U_{\text{ВЫХ(ИЛИ)}}(T) = \max_{i=1, m} [U_{\text{ВХ}i}(T)]; \quad (6)$$

конъюнкции —

$$U_{\text{ВЫХ(И)}}(T) = \min_{i=1,m} [U_{\text{ВХ}i}(T)]; \quad (7)$$

инверсии дизъюнкции —

$$U_{\text{ВЫХ(ИЛИ-НЕ)}}(T) = [U_{\text{ВЫХ}}^1(T) + U_{\text{ВЫХ}}^0(T)] - U_{\text{ВЫХ(ИЛИ)}}(T); \quad (8)$$

инверсии конъюнкции —

$$U_{\text{ВЫХ(И-НЕ)}}(T) = [U_{\text{ВЫХ}}^1(T) + U_{\text{ВЫХ}}^0(T)] - U_{\text{ВЫХ(И)}}(T). \quad (9)$$

Отметим, что применение совершенной конъюнктивной (СКНФ) и дизъюнктивной (СДНФ) нормальной формы с учетом соотношений (6) — (9) позволяет описать произвольную логическую функцию [2, 3]. Другими словами, для СКНФ имеем:

$$L = \min[\max(l_i, M_{2^n-1-i})], \quad i = \overline{0, 2^n - 1}, \quad (10)$$

где M_i — i -й макстрем функции L с n переменными, l_i — i -е значение моделируемой функции L .

Аналогично (10) для СДНФ можно записать:

$$L = \max[\min(l_i, m_i)], \quad i = \overline{0, 2^n - 1}, \quad (11)$$

где m_i — i -й минтерм функции L .

Выражения (6) — (11) в полной мере решают задачу описания функциональных свойств ЭЦУ при построении ТФЛМ устройств комбинационного типа [3]. Вместе с тем при формировании ТФЛМ ЭЦУ последовательностного типа требуется учитывать значение сигнала на предыдущем временном такте —

$$\begin{aligned} U_{\text{ВЫХ}}^{D0} \Big|_{t=n\Delta t} &= U_{\text{ВЫХ}}^0(T) \Big|_{t=(n-1)\Delta t}; \\ U_{\text{ВЫХ}}^{D1} \Big|_{t=n\Delta t} &= U_{\text{ВЫХ}}^1(T) \Big|_{t=(n-1)\Delta t}, \end{aligned} \quad (12)$$

где Δt — временной шаг (такт моделирования).

Для реализации соотношений (12) в макромоделе необходимо предусмотреть соответствующий элемент задержки на время, равное Δt .

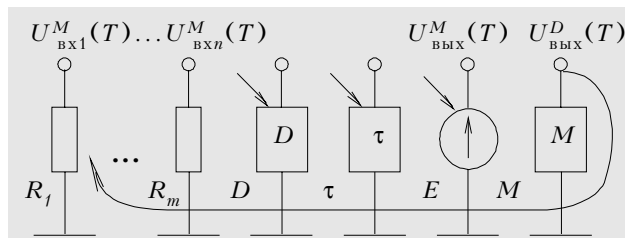


Рис. 3

Рассмотренные выше особенности синхронных и асинхронных ТФЛМ позволяют перейти к описанию структуры предлагаемых макромоделей, которая в общем случае имеет форму, приведенную на рис. 3. В этой макромоделе резисторы $R_1 \dots R_m$ определяют входное сопротивление по входам $1 \dots m$, но т. к. проводится функционально-логический ана-

лиз, то величина этих резисторов не имеет значения и может быть принята произвольным образом. Элемент D моделирует задержку ЭЦУ $\tau_3(T)$, а элемент τ — длительность фронтов сигнала ($\tau_\phi T$). Источник напряжения E предназначен для формирования выходного сигнала (1), (2), а элемент памяти M обеспечивает получение сигнала (12) для ЭЦУ последовательностного типа.

Для синхронных ТФЛМ с двоичной логикой макромоделей рис. 3 содержит элементы $R_1 \dots R_m$, E и элемент M для ЭЦУ последовательностного типа (при моделировании ЭЦУ комбинированного типа элемент M отсутствует). Использование таких макромоделей с трехзначной логикой требует введения элемента τ . Асинхронные ТФЛМ содержат, кроме элементов $R_1 \dots R_m$ и E , также и элемент задержки D , причем при использовании двузначной логики элемент τ не включается в состав макромоделей, в то время как применение трехзначной логики требует подключения элемента формирования фронта сигнала τ . Наличие элемента M в асинхронных макромоделах определяется типом моделируемого ЭЦУ. Элементы D , τ , M могут быть реализованы либо программно, либо в форме элементов электронных схем (R , L , C) в соответствии с их назначением. Выбор формы их реализации определяется конкретным типом СхСАПР, которую планируется использовать. Стрелками указаны направления в макромоделе.

Для иллюстрации предложенного подхода приведем несколько примеров.

Синхронная ТФЛМ с двузначной логикой логического элемента ИЛИ — НЕ содержит резисторы R_1 , R_2 и источник напряжения E , который в силу выражений (1), (2), (6) — (11) описывается следующим соотношением:

$$E = \left\{ \Delta U_0(T) \left(1 - 1[U_n^0(T) - U_{\text{ВХ}}(T)] \right) + \Delta U_1(T) \left(1 - 1[U_{\text{ВХ}}(T) - U_n^1(T)] \right) \right\} / \Delta_0 U, \quad (13)$$

где $\Delta U_0(T) = U_{\text{ВЫХ}}^0(T) - U_0^0$; $\Delta U_1(T) = U_{\text{ВЫХ}}^1(T) - U_0^0$;

$$\Delta U_0(T) = U_0^1 - U_0^0;$$

$$U_{\text{ВХ}}(T) \equiv U_{\text{ИЛИ}}(T) = \max[U_{\text{ВХ}1}(T), U_{\text{ВХ}2}(T)];$$

$1[\cdot]$ — единичная функция.

Аналогичная (13) ТФЛМ для RS-триггера дополнительно имеет в своем составе элемент M , а описание источника E представимо в виде

$$E = \left\{ \Delta U_0(T) 1[U_n^0(T) - U_{\text{ВХ}}(T)] + \Delta U_1(T) 1[U_{\text{ВХ}}(T) - U_n^1(T)] \right\} / \Delta_0 U, \quad (14)$$

где $U_{\text{ВХ}}(T) \equiv U_{RS}(T) = \max\{U_s(T), \min[U_{\text{ВЫХ}}^{MD}(T), \overline{U_R}(T)]\}$;

$$U_s(T) = U_s^M(T) \Delta U_1(T) + U_0^0;$$

$$U_R(T) = U_R^M(T) \Delta U_1(T) + U_0^0;$$

$$\overline{U_R}(T) = U_R^1(T) + U_R^0(T) - U_R(T);$$

$$U_{\text{ВЫХ}}^{MD}(T) = U_{\text{ВЫХ}}^{MD}(T) \Delta U_1(T) + U_0^0$$

(остальные обозначения аналогичны принятым в (13)).

Примером макромоделей, содержащей все элементы формы рис. 3, может служить асинхронная ТФЛМ с трехзначной логикой DV-триггера. При этом ее источник E описывается соотношением (14), а входное напряжение $U_{\text{вх}}(T)$ представимо следующим образом:

$$U_{\text{вх}}(T) \equiv U_{DV}(T) = \max\left\{\min[U_D(T), U_V(T)], \min[U_{\text{вх}}^{MD}(T), \overline{U_V}(T)]\right\} \quad (15)$$

где все обозначения аналогичны принятым в описаниях (13), (14). Соотношения (13)–(15) содержат сигналы $U_{\text{вх}1}(T)$, $U_{\text{вх}2}(T)$, $U_R(T)$, $U_S(T)$, $U_D(T)$, $U_V(T)$, которые подаются на соответствующие входы моделируемых ЭЦУ.

Таким образом, на основе предложенных макромоделей успешно решается как первая задача (ТФЛМ формируются и используются в среде СхСАПР), так и вторая задача (все параметры ТФЛМ зависят от температуры ($U_{\text{вх}}^{M0}(T)$, $U_{\text{вх}}^{M1}(T)$, $U_{\text{п}}^0(T)$, $U_{\text{п}}^1(T)$, $\tau_3(T)$, $\tau_{\text{ф}}(T)$). Кроме того, ТФЛМ компактны по своей структуре, что позволяет моделировать работу цифровых схем большой размерности в процессе проектирования ЭА.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ильин В. Н., Коган В. Л. Разработка и применение программ автоматизации схемотехнического проектирования. — М.: Радио и связь, 1984.
2. Норенков И. П. Комбинированные методы моделирования и анализа в системах автоматизированного проектирования // Приборостроение. — 1983. — Т. 26, № 9. — С. 77–82.
3. Глушков В. М., Капитонова Ю. В., Мищенко А. Т. Логическое проектирование дискретных устройств. — К.: Наукова думка, 1987.
4. Николаенко О. В., Еримичой И. Н. Термофункциональное макро моделирование цифровых электронных устройств для их логического проектирования /Одесск. политехн. ун-т.— Одесса, 1996.— Деп.: в ГНТБ Украины, № 2058-Ук96.
5. Николаенко В. М., Парасочкин В. А., Ткаченко О. В. Термозависимые функционально-логические макро модели цифровых устройств средств связи // Труды III Междунар. науч.-техн. конф. по электросвязи, телевизионному и звуковому вещанию. — Одесса, 1997. — С. 426–429.
6. Николаенко О. В. Метод аппроксимации со сглаживающим дополнением для термофункционального макро моделирования цифровых электронных устройств /Одесск. политехн. ун-т.— Одесса, 1996.— Деп.: в ГНТБ Украины, № 2057-Ук96.

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЦЕНТР НАУЧНОЙ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
(Москва, (095) 198-72-10)

принимает заказы на издания

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЖУРНАЛ
СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ: ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ**

Издается с 1990 г. Главный редактор проф. В. А. Альтов.
Журнал поставил задачу — информировать широкий круг читателей о направлениях новых исследований и разработок, результатах, полученных в области сверхпроводимости, и перспективах практического ее использования в различных областях современной науки и техники, а также о передовом опыте, прогрессивных формах и технологиях, применяемых в области сверхпроводимости как в странах Востока, так и Запада.

Для научных, инженерно-технических работников, аспирантов и студентов.

Цена одного номера 5 ам. долл.

МОНОГРАФИЯ

Зорин Ю. В. СЕРТИФИКАЦИЯ СИСТЕМ КАЧЕСТВА. М., 1996 г., 80 с.

Изложены основы и современные методы разработки и сертификации систем качества. Рассмотрены концептуальные подходы международных стандартов семейства ИСО 9000 в версии 1994 года к решению проблем обеспечения и оценки качества продукции. Охарактеризованы правила применения процедур сертификации систем качества в национальной системе сертификации ГОСТ Р, а также основные этапы подготовки организаций к сертификации.

Для руководителей и специалистов, студентов, аспирантов и преподавателей институтов повышения квалификации кадров и высших учебных заведений.

Цена 3 ам. долл.