

УДК 004.94:621.3

Т.Н. Зайченко

## ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ В СИСТЕМЕ МАРС

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

### Введение

Средства вычислительной техники являются неотъемлемой составной частью современных радиоэлектронных и электротехнических устройств и систем. Различают два подхода к моделированию радиоэлектронных устройств: физический, предполагающий построение модели с использованием законов Кирхгофа, и информационный, связанный с исследованием процессов на уровне преобразования сигналов без применения законов Кирхгофа. В связи с высокой степенью интеграции цифровых устройств (ЦУ) решение задач их исследования базируется на концепции информационного моделирования. К моделям информационного уровня относятся таблицы переключений, функциональные, алгоритмические и программные модели. В настоящей работе представлена концепция информационного функционального моделирования ЦУ в системе МАРС (Моделирование и Автоматический Расчет Систем) [1–3] (разработка кафедры теоретических основ электротехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), версия для операционных систем *Windows NT, 98, 2000, XP*).

### 1. Модели цифровых элементов

Концепция информационного моделирования ЦУ, разрабатываемая в настоящей работе, предполагает:

- реализацию двоичного логического моделирования ЦУ [4, с. 182–196];
- использование языка принципиальных электрических схем для формализованного представления ЦУ;
- использование языка структурных схем при формировании входных сигналов ЦУ;
- реализация логического моделирования без изменения вычислительного ядра системы МАРС.

Последнее требование связано с общей направленностью выполняемых работ на решение задачи функционального проектирования электротехнических устройств и систем. При этом метод компонентных цепей (КЦ) Е.А. Арайса и В.М. Дмитриева [1] и универсальное ядро системы МАРС позволили решить задачу моделирования непрерывной силовой части электротехнических устройств и систем различной физической природы на физическом уровне [2]. В этой связи разрабатываемый подход к моделированию управляющей подсистемы на логическом уровне не должен затрагивать эффективное вычислительное ядро системы МАРС.

Простейшими ЦУ являются устройства комбинационного типа, выходные сигналы которых в любой момент времени однозначно определяются значениями входных сигналов в тот же момент времени. Более сложным классом ЦУ являются последовательностные устройства, обладающие памятью. Их выходные сигналы в течение текущего такта определяются значениями входных сигналов в течение этого и предыдущих тактов. Математические модели ЦУ, осуществляющих логические преобразования в координатах вход-выход, описываются логическими уравнениями:

$$x_{выхj} = f_j(x_{вх1}, x_{вх2}, \dots, x_{вхn_{вх}}), j = \overline{1, n_{вых}}, \quad (1)$$

для цифровых элементов комбинационного типа и

$$x_{выхj} = f_j(x_{вх1}, x_{вх2}, \dots, x_{вхi}, x_{выхj}^-), \quad (2)$$

для ЦУ последовательностного типа, где  $x_{выхj}$ ,  $j = \overline{1, n_{вых}}$  – выходные сигналы;  $x_{вхi}$ ,  $i = \overline{1, n_{вх}}$  – входные сигналы,  $x_{выхj}^-$  – состояние ЦУ в предыдущий момент времени.

Модели цифровых элементов информационного уровня обладают спецификой математического и топологического аспектов. Особенность математического аспекта моделей ЦУ связана с логическим типом вход-выходных переменных ЦУ и логическим типом функции, реализуемой ЦУ. Особенность топологического аспекта заключается в векторном типе вход-выходных связей некоторых ЦУ (сумматоров, компараторов, запоминающих устройств, регистров). Решение задачи информационного моделирования ЦУ в системе МАРС потребовало исследования способов реализации математических моделей (1) и (2) в виде вычислительных моделей компонентов с учетом указанной специфики.

Математическая модель компонента в методе КЦ и системе моделирования МАРС – это уравнение либо система уравнений относительно вещественных переменных  $V_i$ , действующих на связях компонентов [1–3], здесь  $i = 1, n_{вх} + n_{вых}$ .

$$V_{выхj} = F_{jt} \left( f_{jt} \left( F_{jt}^{-1} (V_{вх1}), F_{jt}^{-1} (V_{вх2}), \dots, F_{jt}^{-1} (V_{вхn_{вх}}), F_{jt}^{-1} (V_{вхj}^-) \right) \right),$$

где  $F_{jt}$  – функция преобразования логической переменной в вещественную;  $F_{jt}^{-1}$  – обратное преобразование вещественной переменной в логическую.

Реализация данного подхода связана с выполнением в модели компонента дополнительных операций, таких как преобразование вещественных значений входных переменных связей в логические, вычисление булевой функции  $f_{jt}$  относительно преобразованных в логические вещественных переменных входных связей и обратное преобразование результата в вещественную переменную, значение которой и является правой частью линейного уравнения модели компонента и значением переменной выходной связи. Предложенный способ алгебраизации логических уравнений показал свою работоспособность при моделировании ЦУ как комбинационного, так и последовательностного типа, имеющих формализованное представление в виде КЦ без обратных связей. Однако компьютерные модели ЦУ с обратными связями, а также аналого-цифровых устройств (управляемых инверторов) оказались неадекватными.

Действительно, решение линеаризованной (методом Ньютона) и алгебраизованной (методами Эйлера, трапеций и т.п.) модели КЦ в системе МАРС осуществляется методами линейной алгебры [1; 3, с. 24–28].

Задача обеспечения инвариантности вычислительного ядра системы МАРС для логического моделирования ЦУ может быть решена путем приведения модели ЦУ к стандартному типу модели компонента. В настоящей работе это обеспечивается введением алгебраических аналогий для логических переменных и базовых логических функций.

Для переменных связей логических элементов выбраны аналогии переменных связей вида:  $V_j = 1$  – уровень логической единицы,  $V_j = 0$  – уровень логического нуля. Выбор аналогий математических моделей производился в классе линейных и нелинейных моделей компонентов. Естественный подход к выбору алгебраического аналога логической математической модели ЦУ связан с представлением математических моделей (1) и (2) в виде линейного уравнения относительно переменной выходной связи компонента и переменной правой частью, реализующей логическую функцию  $f_{jt}$  вида

В процессе решения значение переменной выходной связи логического элемента на  $j$ -ом шаге решения вычисляется через значения переменных входных связей на предыдущем ( $j-1$ )-ом шаге:

$$V_{выхj}(t_j) = f_{jt} \left( V_{вх1}(t_{j-1}), V_{вх2}(t_{j-1}), \dots, V_{вхn_{вх}}(t_{j-1}) \right).$$

Поэтому при изменении входных переменных связей наблюдается ошибка в расчете выходной переменной. Погрешности в области фронтов сигналов управления незначительны при моделировании ЦУ, а при моделировании в составе силовых преобразователей с импульсным регулированием приводят к неверному решению.

Второй исследованный подход заключался в выборе алгебраической функции  $f_{jt}^*$ , позволяющей при установленной выше аналогии переменных связей описать логику функционирования элемента  $f_{jt}$  в классе алгебраических функций  $f_{jt}^*$  относительно всех вход-выходных переменных связей (табл. 1). Предложенный способ алгебраизации оказался пригодным при моделировании КЦ с обратными связями.

Следующий этап разработки компьютерных моделей компонентов ЦУ в системе МАРС был связан с оптимизацией вычислительных моделей компонентов за счет упрощения математических моделей  $f_{jt}^*$  цифровых элементов.

В качестве окончательного варианта выбраны алгебро-логические модели  $f_{ал}$  в классе линейных относительно вход-выходных переменных (для компонента И) и нелинейных относительно выходной переменной (для компонентов ИЛИ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ, исключающее ИЛИ, 2И-ИЛИ-НЕ) уравнений (см. табл. 1).

В зависимости от решаемой задачи моделирование ЦУ может быть выполнено в режиме статического анализа в случае постоянных входных воздействий либо в режиме динамического анализа при изменяющихся входных сигналах.

Таблица 1

Математические модели компонентов-логических элементов

Компонент	Математическая модель компонента	
	в классе алгебраических моделей $f_n$	в классе алгебро-логических моделей $f_{ал}$
НЕ	$V_{вых1} - (1 - V_{вх1}) = 0$	$V_{вых1} - (1 - V_{вх1}) = 0$
И	$V_{вых1} - V_{вх1}V_{вх2} = 0$	$V_{вых1} - F_{л}(F_{л}^{-1}(V_{вх1})F_{л}^{-1}(V_{вх2})) = 0$
ИЛИ	$V_{вых1} - (V_{вх1} + V_{вх2} - V_{вх1}V_{вх2}) = 0$	$V_{вых1} - F_{л}(F_{л}^{-1}(V_{вх1}) + F_{л}^{-1}(V_{вх2})) = 0$
И-НЕ	$V_{вых1} - (1 - V_{вх1}V_{вх2}) = 0$	$V_{вых1} - F_{л}(F_{л}^{-1}(V_{вх1})F_{л}^{-1}(V_{вх2})) = 0$
ИЛИ-НЕ	$V_{вых1} - (1 - (V_{вх1} + V_{вх2} - V_{вх1}V_{вх2})) = 0$	$V_{вых1} - F_{л}(F_{л}^{-1}(V_{вх1}) + F_{л}^{-1}(V_{вх2})) = 0$
2И-ИЛИ-НЕ	$V_{вых1} - (1 - V_{вх1}V_{вх2} - V_{вх3}V_{вх4} + V_{вх1}V_{вх2}V_{вх3}V_{вх4}) = 0$	$V_{вых1} - F_{л}((F_{л}^{-1}(V_{вх1})F_{л}^{-1}(V_{вх2})) + (F_{л}^{-1}(V_{вх3}) + F_{л}^{-1}(V_{вх4}))) = 0$

2. Базовый набор комбинационных компонентов

Базовый набор компонентов системы МАРС, предназначенных для моделирования комбинационных ЦУ, представлен на рис. 1. Он включает компоненты логических элементов, универсальную логическую функцию и полусумматор. Модель полусумматора также реализована в классе нелинейных функций относительно выходной переменной на базе алгебро-логической математической модели. Условные графические обозначения (УГО) компонентов выбраны в соответствии с УГО

соответствующих цифровых элементов на схеме электрической принципиальной. Компонент универсальная логическая функция имеет произвольное число входных связей и позволяет пользователю выбрать требуемую логическую функцию из шести возможных (см. рис. 1, 2).

Разработанные модели комбинационных элементов позволяют использовать при формализованном представлении КЦ ЦУ аппарат принципиальных схем. В результате модели более сложных ЦУ, в том числе последовательного типа, могут быть построены как макромоделли на основании их схем замещения.

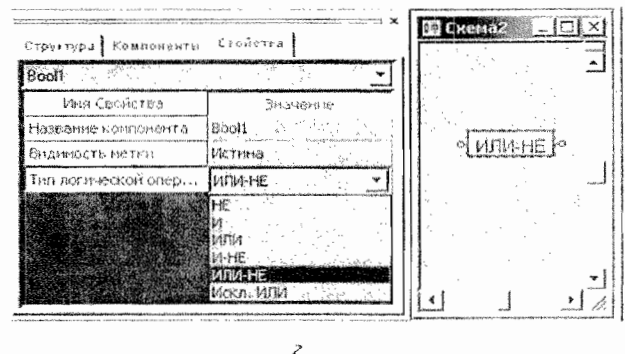
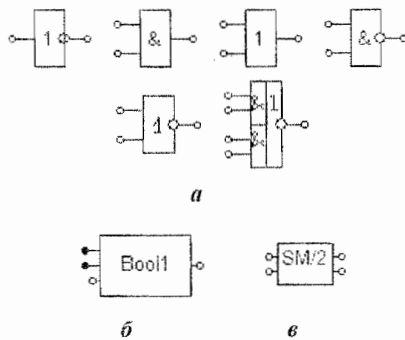


Рис. 1. Компоненты логические элементы (а), универсальная логическая функция (б), полусумматор (в) и окно выбора типа универсальной логической функции (г)

### 3. Триггерные устройства

Реализованный в настоящей работе раздел триггерных устройств библиотеки моделей компонентов системы МАРС включает RS-, JK-, D- и T-триггеры (рис. 2).

Были исследованы способы построения вычислительных моделей триггеров: на базе таблиц состояний и эквивалентных схем замещения, основанные на технологиях программирования (таблиц состояний с учетом контроля

фронтов тактовых импульсов) и схемотехнического моделирования соответственно. Более универсальным оказался второй способ, обеспечивающий моделирование КЦ ЦУ с обратными связями. В результате модели RS-триггеров построены на базе эквивалентных схем из компонентов, реализующих логические операции ИЛИ и НЕ, а модели JK-, D- и T-триггеров – на основе моделей RS-триггеров (рис. 3).

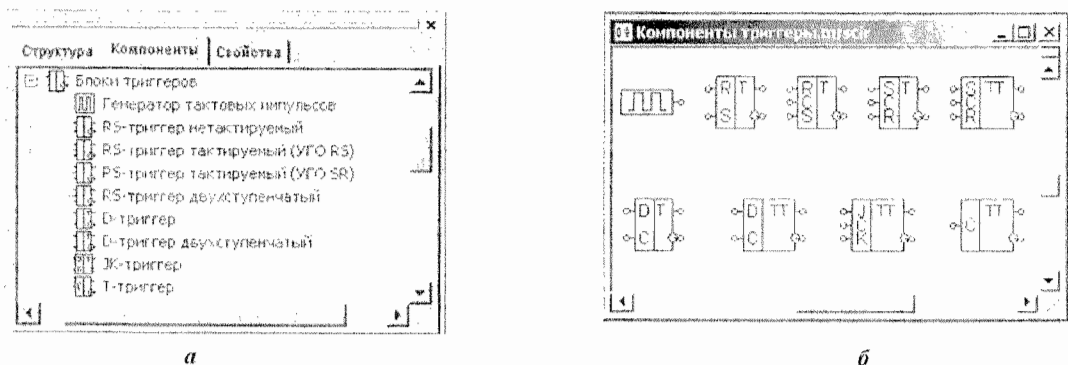


Рис. 2. Компоненты триггеры: раздел библиотеки моделей (а) и УГО компонентов (слева направо и сверху вниз) (б)

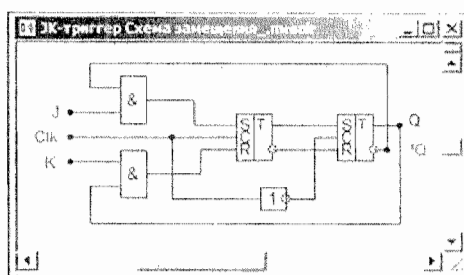


Рис. 3. Пример макромодели

Следует отметить, что представленный набор компонентов комбинационных элементов и триггеров позволяет реализовать моделирование ЦУ на уровне эквивалентных схем замещения (см. рис. 3), что может быть полезно в задачах моделирования учебного характера.

### 4. Компоненты для организации вычислительного эксперимента

Основными компонентами, обеспечивающими проведение вычислительного эксперимента по исследованию ЦУ, являются компоненты-источники воздействий и компоненты-измерители. В качестве источников сигналов обычно используются генераторы тактовых импульсов. Импульсные последовательности могут быть получены путем суммирования

сигналов нескольких тактовых генераторов с помощью компонентов структурных схем сумматоров.

Регистрация и визуализация результатов расчетов обычно осуществляется измерительными приборами и компонентом-графического представления результатов (компонентом-графиком) соответственно. Для удобства организации вычислительного эксперимента, в системе МАРС реализованы компоненты, обеспечивающие контроль за ходом выполнения вычислительного эксперимента (рис. 4, а): визуализацию параметров моделирования (текущего времени, шагов решения), задание начальных условий, реализация паузы и завершение вычислительного эксперимента и т.п.

Для исследования ЦУ реализованы компоненты световой индикатор, пауза (рис. 4, б, в)

и компонент-измеритель потенциальной переменной. Компонент световой индикатор (аналогичный индикатору в системе *Electronics WorkBench*) удобен при исследовании схем с логическими элементами. Цвета индикатора, соответствующие уровням логического нуля и единицы, задаются пользователем в окне задания параметров (рис. 4, з). Компонент измеритель визуализирует значение переменной связи в окне своего УГО. Компонент пауза двойным нажатием мышью на его УГО приостанавливает процесс решения модели и возобновляет его.

### 5. Примеры моделирования цифровых устройств

Представленные ниже примеры моделирования подтверждают доведение предложенной методики логического моделирования ЦУ до уровня программной реализации, адекватность разработанных компьютерных моделей ЦУ, а также демонстрируют возможности системы MAPS в области моделирования ЦУ.

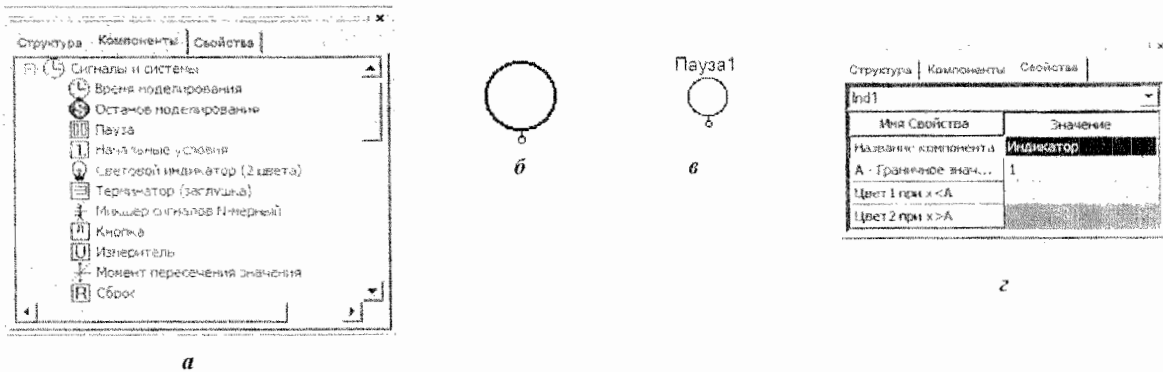


Рис. 4. Компоненты для организации вычислительного эксперимента: окно раздела библиотеки компонентов (а), световой индикатор (б), пауза (в), окно задания параметров светового индикатора (г)

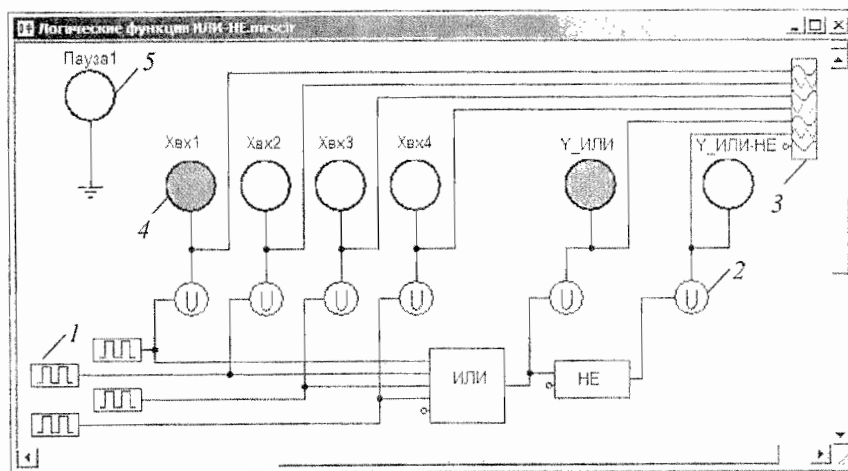


Рис. 5. Моделирование логических функций

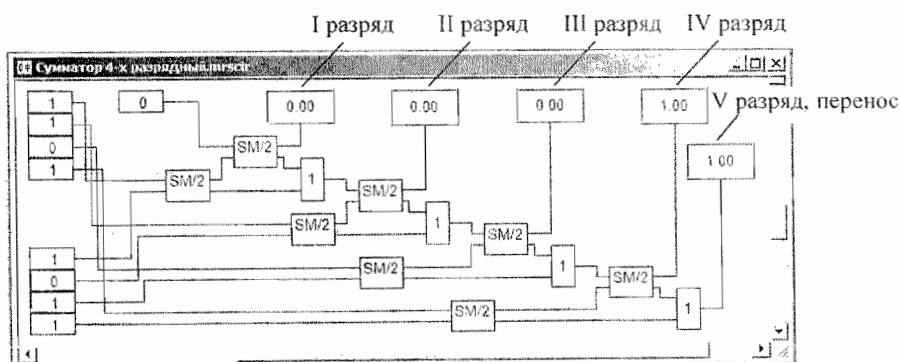


Рис. 6. Моделирование четырехразрядного сумматора

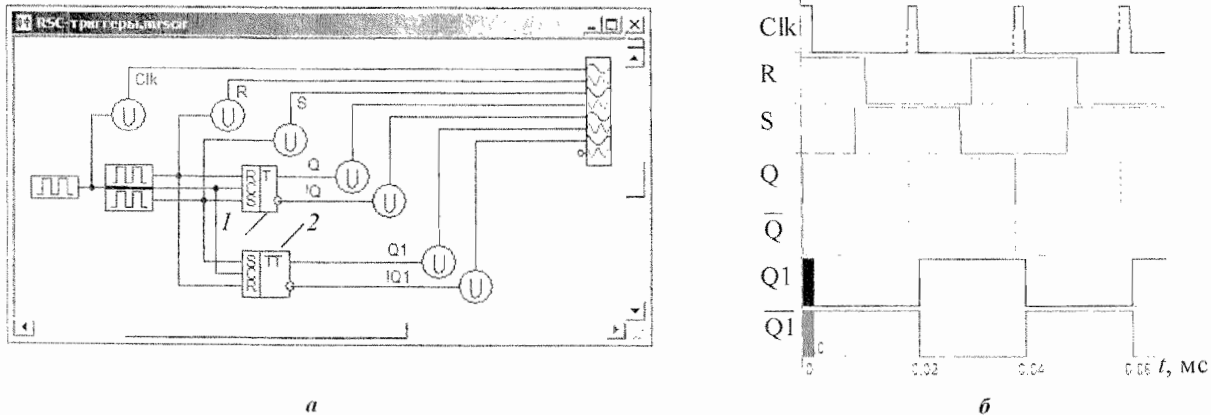


Рис. 7. Компонентная цель (а) и результаты моделирования (б) одноступенчатого и двухступенчатого RS-триггеров

**Пример 1. Моделирование логических функций.** На рис. 5 представлен фрагмент вычислительного эксперимента в системе MAPS, целью которого является моделирование логической операции ИЛИ-НЕ. Законы изменения входных переменных во времени устанавливаются генераторами тактовых импульсов 1. Для регистрации результатов расчетов используются измерители сигнал-переменных 2, а для их визуализации помимо стандартного компонента графического представления результатов 3 используются световые индикаторы 4. Задержка процесса решения модели КЦ производится с помощью компонента пауза 5.

**Пример 2. Моделирование двоичного сумматора.** На рис. 6 представлен пример моделирования работы двоичного сумматора. Модель сумматора реализована на полусумматорах SM/2 и логических элементах ИЛИ. Для задания двоичного числа используются четыре компонента-константы. Аналогичным образом с помощью компонента константа инициализируется перенос сумматора младшего разряда. Результат сложения – четырехразрядная сумма и перенос – визуализируется на панелях измерительных компонентов. Представленный фрагмент вычислительного эксперимента соответствует сложению двух четырехразрядных двоичных чисел 1101 и 1011. Результатом моделирования является четырехразрядное число 1000 и перенос.

**Пример 3. Моделирование последовательности ЦУ.** На рис. 7 представлен пример моделирования триггеров: одноступенчатого 1 и двухступенчатого 2 RS-триггеров. Результаты моделирования во временной области представлены в виде импульсных последовательностей логических уровней тактового Clk,

входных R (сброс), S (установка) и выходных Q, Q1,  $\overline{Q}$ ,  $\overline{Q1}$  сигналов.

На рис. 8 приведен пример моделирования JK-триггера. Здесь для формирования входных импульсных последовательностей в соответствии с примером, заимствованным в [5, с. 49], используются генераторы тактовых импульсов и сумматоры.

Рассчитанные временные диаграммы импульсных последовательностей логических уровней тактового Clk, входных J, K и выходных Q,  $\overline{Q}$  сигналов соответствуют логике работы JK-триггера и диаграммам, приведенным в [5, с. 49]. При этом результаты, полученные при расчете JK-триггера, представленного одним компонентом (см. рис. 8, а) и схемой замещения (см. рис. 8, б), совпадают, что еще раз подтверждает корректность разработанных моделей ЦУ.

## Заключение

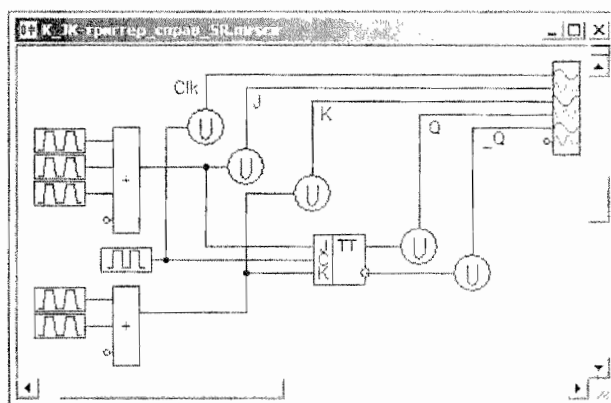
В работе предложен подход к решению задачи информационного моделирования цифровых устройств во временной области в рамках метода компонентных цепей и универсальной системы автоматизированного моделирования MAPS.

Исследованы и выбраны аналогии математических моделей ЦУ в форме алгебрологических моделей. Разработана библиотека моделей компонентов ЦУ и компонентов, обеспечивающих организацию вычислительного эксперимента.

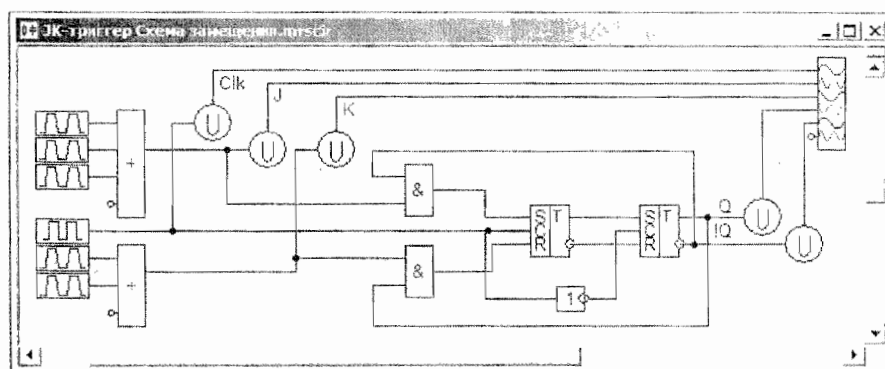
Проведенные исследования делают возможным решение комплексной задачи автоматизированного моделирования управляемых электротехнических устройств и систем.

Разработанные инструментальные средства могут использоваться в учебном процессе для организации виртуальных лабораторных работ

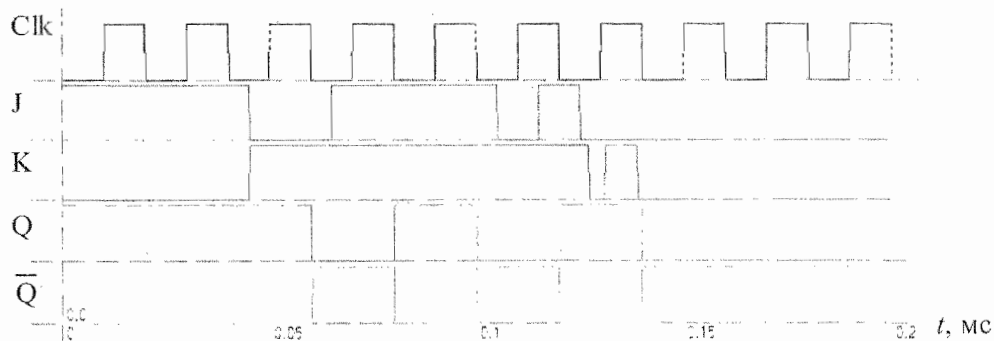
по электротехнике и электронике, цифровой технике и другим смежным дисциплинам.



а



б



в

Рис. 8. Компонентная цепь (а), схема замещения (б) и результаты моделирования (в) JK-триггера

## Литература

1. Арайс Е.А., Дмитриев В.М. Моделирование неоднородных цепей и систем на ЭВМ. М., 1982.
2. Дмитриев В.М., Зайченко Т.Н., Гарганеев А.Г. и др. Автоматизация функционального проектирования электромеханических систем и устройств преобразовательной техники. Томск, 2000.
3. Дмитриев В.М., Шутенков А.В., Ганджа Т.В. Архитектура универсального вычислительного ядра для реализации виртуальных лабораторий // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. 2004. № 2.
4. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств / О.В. Алексеев, А.А. Головков, И.Ю. Пивоваров и др. / Под ред. О.В. Алексеева. М., 2000.
5. Цифровые интегральные микросхемы: Справочник / П.П. Мальцев, Н.С. Долидзе, М.И. Критенко и др. М., 1994.