



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО
ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
ИМ. АКАДЕМИКА С. И. ВАВИЛОВА

В. Я. ХАРТОВ

АВТОМАТИЗАЦИЯ
ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ЦИФРОВЫХ ПРИБОРОВ И УСТРОЙСТВ

ЗАОЧНЫЙ
ИНСТИТУТ
ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ
ИТР

ЦЕНТРАЛЬНОЕ ПРАВЛЕНИЕ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА
ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
ИМ. АКАДЕМИКА С. И. ВАВИЛОВА

ЗАОЧНЫЙ ИНСТИТУТ

Курсы повышения квалификации ИТР
по автоматизации проектирования
микроэлектронных приборов

В. Я. ХАРТОВ

АВТОМАТИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ПРИБОРОВ И УСТРОЙСТВ

Борису Шварцу

от автора

в знак глубокого уважения
и признательности

4.10.78

В. Я. Харт

Москва

"Машиностроение"

1978



Рецензент - канд. техн. наук С. Е. Жорно.

Редакционно - методический совет: Баталов Б.В., Зарудный Д. И., Казеннов Г. Г., Малышев И. В., Норенков И. П. (научный редактор), Садиков Л. Г. (ответственный за выпуск), Яншин А. А. (председатель).

Хартов В. Я. Автоматизация функционально - логического проектирования цифровых приборов и устройств. - М.: Машиностроение, 1978. - 52 с.

Брошюра посвящена применению ЭВМ при функционально-логическом проектировании цифровых устройств. При этом большое внимание уделено вопросам анализа комбинационных и последовательностных логических схем. Рассмотрены основные математические модели, используемые для оценки функциональной надежности цифровых устройств, и их реализация в системе автоматизированного проектирования. Приведены характеристики входных языков для описания схем и конкретные примеры по подготовке данных и результатам машинного анализа.

Брошюра рассчитана на инженерно-технических работников, занятых проектированием цифровой техники, и студентов вузов соответствующих специальностей.

Табл. 3, ил. 16, список лит. 11 назв.

Выпущена по заказу Заочного института повышения квалификации ИТР ЦП НТО Приборпрома.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие вычислительной техники способствовало появлению ряда новых научно-технических дисциплин, в том числе машинного проектирования. Применение цифровых вычислительных машин (ЦВМ) ускоряет процесс проектирования, повышает качество проекта и снижает материальные затраты при разработке новых изделий. Первоначально автоматизация процесса проектирования состояла в алгоритмизации математического аппарата, развитого применительно к ручному проектированию. Однако использование ЦВМ способствовало дальнейшему развитию математической и методологической основы проектирования, дополнив ее математическими моделями в виде систем алгебраических и дифференциальных уравнений, численными методами решения и т. п.

Рассматривая организацию процесса проектирования ЦВМ, можно отметить его многоуровневую структуру, основанную на иерархическом представлении вычислительной машины. Это вызвано тем, что ЦВМ представляет собой сложную в функциональном отношении систему, исследование которой требует привлечения методов теории массового обслуживания, теории цифровых автоматов и цифровой электроники, теории графов и ряда других. Используемые при этом математические методы анализа, синтеза и оптимизации существенно зависят от уровня описания вычислительной машины и могут отличаться друг от друга. Многоуровневый подход при создании автоматизированной системы проектирования ЦВМ позволяет ввести машинные методы расчета на каждом уровне проектирования независимо друг от друга.

В процессе схемотехнического проектирования вычислительных машин и цифровой аппаратуры можно выделить три уровня: структурный, функционально-логический и схемный. На структурном уровне объектом проектирования и исследования являются сложные устройства, состоящие из арифметических,

запоминающих и буферных устройств, индексных регистров. Предметом проектирования на функционально-логическом уровне являются устройства, представленные в виде совокупности регистров, сумматоров, триггеров, вентилях и функциональных узлов. На схемном уровне проектирования рассматриваются вопросы построения отдельных функциональных узлов устройства, вентилях, триггеров и т. п.

Граница между отдельными уровнями проектирования является условной и зависит от уровня развития микроэлектроники интегральной технологии. Так, например, повышение степени интеграции привело к сближению традиционно разных уровней емного и функционально-логического проектирования. Интегральные схемы средней степени интеграции и большие интегральные схемы, представляющие собой элементную базу устройства, являются довольно сложными в функциональном отношении объектами. Проектирование их требует комплексного использования методов схемного и функционально-логического проектирования. Соответственно изменяются и методы машинного проектирования. В частности, для исследования переходных процессов в сложных логических схемах аппарат анализа электрических процессов в электронной схеме оказывается достаточно сложным. Это требует перехода к более простым математическим моделям элементов и функциональных узлов. Методы последующего анализа зависят от способа описания этих элементов, требуемой точности выполняемого анализа, сложности схем, затрат машинного времени и т. п.

В данной брошюре рассматриваются вопросы, связанные с автоматизацией функционально-логического этапа проектирования. Основными задачами, решаемыми на этом уровне, являются: синтез и минимизация функционально-логических схем; анализ функциональных и принципиальных электрических схем для проверки их функциональной надежности.

Каждая из этих задач представляет собой самостоятельное звено функционально-логического проектирования, располагающее собственным математическим аппаратом исследований. При этом синтез и минимизация составляют верхний уровень функционально-логического проектирования, анализ - нижний уровень, непосредственно предшествующий выпуску конструкторской документации. В рамках данной работы излагаются машинные методы, используемые для анализа функциональных и принципиальных электрических схем. При этом исследуются следующие вопросы: выбор математической модели объекта для выполнения определенного вида анализа; алгоритмы, используемые при

построении программ; вопросы повышения точности анализа при оценке влияния дестабилизирующих факторов; методы проведения машинных исследований в системе автоматизированного проектирования, охватывающего схемный и функционально-логический уровень; вопросы подготовки исходных данных для анализа схем.

I. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О СТРУКТУРЕ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ

Преобразование информации в ЦВМ осуществляется электронными устройствами двух классов: комбинационными схемами и цифровыми автоматами (последовательностными схемами). В комбинационных схемах совокупность выходных сигналов W однозначно определяется входными сигналами X . Особенностью цифрового автомата является то, что выходные сигналы зависят от входных сигналов и внутреннего состояния автомата Y , которое возникло в результате воздействия на автомат входных сигналов в предыдущие моменты времени. При этом следует иметь в виду, что изменение сигналов на входе цифрового устройства происходит в определенные дискретные моменты времени, которые можно обозначить целыми положительными числами: $T=0, 1, 2, \dots, (n-1), n$.

Временной интервал между соседними моментами дискретного времени называется тактом или периодом представления информации.

С учетом сказанного функционирование цифрового устройства для преобразования дискретной информации можно описать системой уравнений:

для комбинационных схем

$$W(n) = F[X(n)], \quad (1)$$

где $X(n) = \{x_1(n), x_2(n), \dots, x_m(n)\}$ - множество входных переменных двоичного типа, относящихся к n -му дискретному моменту времени (или n -му такту работы),

$\{w_1(n), w_2(n), \dots, w_k(n)\}$ - множество выходных переменных двоичного типа, относящихся к n -му дискретному моменту времени;

для цифрового автомата

$$W(n) = F[X(n), Y(n)]; Y(n) = G[X(n-1), Y(n-1)], \quad (2)$$

где $Y(n), Y(n-1)$ - множество внутренних переменных двоичного типа, определяющих состояние автомата в n -м и $(n-1)$ -м тактах работы. Остальные обозначения остаются прежними.

Уравнения (2) показывают, что состояние автомата Y в текущем n -м такте работы определяется функцией входных переменных и внутренних переменных состояния в предыдущем $(n-1)$ -м такте работы. Функционирование цифрового автомата поясняет структурная схема (рис. 1, а). Цифровой автомат состоит из комбинационных схем (КС), запоминающих элементов (ЗЭ) и элементов задержки, представленных в обобщенной схеме отдельным узлом. Соединения между отдельными узлами схемы осуществляются с помощью шин, каждая из которых представляет собой совокупность информационных линий связи. Дискретный ход времени в схеме обеспечивается с помощью коротких синхронизирующих импульсов C , управляющих записью информации в запоминающие элементы, и элементов задержки. Поступление каждого синхроимпульса соответствует моменту времени, определяющему начало такта (рис. 1, б). При этом запоминающие элементы переключаются в соответствии с функциями возбуждения G , которые определяются к моменту поступления синхронизирующего сигнала (к началу n -го интервала времени). В результате на выходах запоминающих элементов устанавливаются новые значения Y . Но так как функции возбуждения зависят от входных переменных X и внутренних переменных Y , может возникнуть опасность повторного переключения запоминающих элементов при изменении значений Y . Чтобы исключить эту возможность, необходимо включить в схему элементы, задерживающие сигналы обратной связи на время, равное длительности синхроимпульса. В этом случае выработанные на n -м интервале времени значения Y не изменятся до наступления следующего $(n+1)$ -го интервала времени.

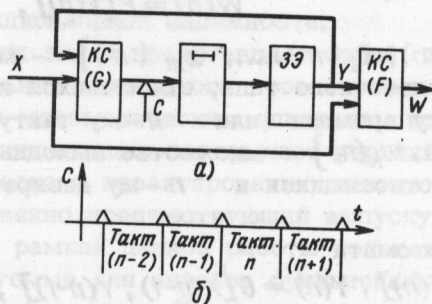


Рис. 1. Обобщенная схема цифрового автомата (а) и временная диаграмма синхронизирующих импульсов (б)

На рис. 2 приведена развернутая структурная схема цифрового устройства, предназначенного для преобразования дискретной информации. Устройство представляет собой совокупность комбинационных схем, элементов задержки и запоминающих элементов. Символами X_1, X_2, \dots, X_m обозначены наборы входных сигналов (входных переменных), поступающие на

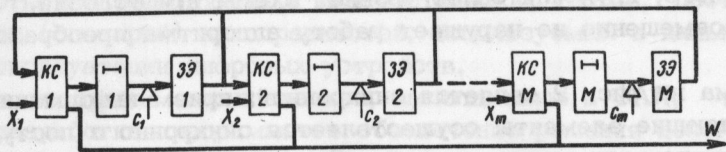


Рис. 2. Структурная схема цифрового устройства

комбинационные схемы от внешних устройств. Кроме внешних сигналов X на входы комбинационных схем по магистрали поступают внутренние сигналы Y с выходов запоминающих элементов. Последовательность работы отдельных частей схемы задается с помощью управляющих (синхронизирующих) сигналов. Каждый из множества управляющих сигналов $c_j \in C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ управляет шиной возбуждения запоминающих элементов j -го уровня, сигналы которой переводят устройство в новое состояние.

При рассмотрении схемы рис. 2 видно, что при наличии нескольких уровней преобразования и хранения информации возможны три способа обработки информации: последовательный, параллельно - последовательный.

При последовательной обработке информации за время одного такта выполняется преобразование информации на одном из уровней. Подобная ситуация возникает; если в преобразовании, выполняемом комбинационной схемой КС, аргументами служат внутренние переменные, определяемые состоянием запоминающих элементов разных уровней. Общее время обработки информации в устройстве (количество тактов) зависит от числа элементарных действий (микроопераций), последовательно выполняемых одно за другим в соответствии с принятым алгоритмом преобразования.

Для параллельной обработки информации характерно одновременное преобразование информации на всех уровнях. В этом случае синхросигналы c_1, c_2, \dots, c_m поступают одновременно и, следовательно, могут быть заменены одним общим сигналом. Так как схемы преобразования информации на каждом уровне отличаются друг от друга, то и время, затрачиваемое на каждое преобразование, различно. Это значит, что интервал

следования синхросигналов следует выбирать, исходя из максимальной продолжительности преобразования.

Наконец, наиболее распространенным является параллельно-последовательный способ обработки информации. В этом случае все время выполнения операции преобразования разбивается на отдельные отрезки. Каждому из них соответствует работа одного, двух или более уровней схемы при условии, что такое совмещение не нарушает работу алгоритма преобразования.

Схема на рис. 2 является синхронной: прием информации в запоминающие элементы осуществляется синхронно с поступлением синхронизирующего сигнала. Соответственно формирование сигналов возбуждения запоминающих элементов должно закончиться к приходу синхронизирующего сигнала. Если прием информации в запоминающие элементы осуществляется несинхронно (шина возбуждения не управляется синхросигналом), то такая схема является асинхронной.

II. АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ

Этап анализа функционально-логических схем цифровых устройств представляет собой самостоятельное звено в системе автоматизированного проектирования (САП), которое в значительной степени обеспечивается машинными средствами, ускоряющими анализ и повышающими его эффективность. При "ручном" проектировании процесс анализа, как правило, переплетается с процессом синтеза цифрового устройства (ЦУ), разработкой функциональных и принципиальных электрических схем и временных диаграмм к ним, проверкой работоспособности опытного изделия. Качество схемотехнического проектирования при этом во многом зависит от квалификации разработчика, заданных сроков проектирования, уровня новизны проекта, сложности схем и т. п. Проверка выпускаемой документации "вручную", выполняемая обычно самим разработчиком, не исключает полностью ошибки, допущенные при проектировании. В конечном счете это приводит к затягиванию сроков проектирования и удорожанию проекта. Автоматизация процедур анализа позволяет более успешно достигать объективной оценки качества спроектированных схем.

Задача анализа функционально-логических схем состоит в определении соответствия функциональных и принципиальных электрических схем заданному закону функционирования; в про-

верке корректности межэлементных связей внутри схемы с учетом требований конкретной системы элементов; в оценке поведения проектируемого ЦУ в реальных условиях; в определении параметров выходных сигналов, границ работоспособности, влияния дестабилизирующих факторов и т. п.; в моделировании методики наладки и контроля схем с помощью тестов, проверке полноты контролирующих и диагностических тестов, построении таблиц (словарей) неисправностей, используемых в дальнейшем при эксплуатации цифровых устройств.

Разнообразие задач анализа, выполняемых в САП, требует при разработке программного обеспечения решения целого ряда вопросов. Сюда относятся разработка входного языка для описания логических схем (функциональных и принципиальных), аппарата синтаксического и семантического контроля описаний, методов преобразования исходных данных к виду, удобному для обработки на ЭВМ. Для исследования и оценки предлагаемых схемных решений необходим комплекс алгоритмов и программ моделирования работы схем при заданных ограничениях.

При автоматизированном проектировании необходимо обеспечить вывод результатов моделирования в форме, удобной для расшифровки и последующей обработки, документирование результатов анализа, ведение архива проектной документации на машинных носителях информации и доступ к нему для внесения изменений и дополнений. Наконец, эффективное применение ЭВМ в САП требует наличия специализированных сервисных программ для оперативной связи разработчика с машиной.

Математические модели и алгоритмы для логического анализа схем

Проектирование логической схемы цифрового устройства осуществляется по заданному алгоритму его работы. Задание алгоритма функционирования сопровождается построением таблиц состояний устройства в разные дискретные моменты времени. Тогда задача проверки логической схемы, синтезированной машинным или "ручным" способом, заключается прежде всего в том, чтобы определить последовательность состояний, принимаемых схемой при подаче на ее входы определенных сигналов.

Для решения этой задачи на ЭВМ необходимо иметь описание логической схемы и программы для моделирования состояний отдельных элементов и узлов схемы. Так как логичес-

кую схему любого цифрового устройства можно представить совокупностью комбинационных и запоминающих элементов, описание схемы можно задать в виде системы логических уравнений:

$$w_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_p; y_1, y_2, \dots, y_k); \quad (3)$$

$$y_j' = g_j(x_1, x_2, \dots, x_p; y_1, y_2, \dots, y_k), \quad (4)$$

где w_i - выходная переменная i -го выхода схемы;
 y_1, y_2, \dots, y_k - переменные состояния схемы;
 x_1, x_2, \dots, x_p - входные переменные; y_j' - внутренняя переменная схемы, используемая для возбуждения j -го элемента памяти; f_i, g_j - логические функции. Все переменные уравнений (3), (4) относятся к одному и тому же моменту дискретного времени.

Чтобы математическая модель схемы соответствовала описанию цифрового автомата, системы уравнений (3), (4) следует дополнить уравнениями связи внутренних переменных y_j' с переменными состояниями y_j :

$$y_j(n) = p[y_j'(n-1)], \quad (5)$$

где параметры n и $(n-1)$ относят соответствующие переменные к n -му и $(n-1)$ -му интервалам времени. Решая уравнения (3), (4) и (5) в определенной последовательности, можно определить состояние схемы для каждого момента времени.

Процедура моделирования схемы для одного такта включает выполнение следующих действий:

1) по уравнениям (3), (4) рассчитываются выходные переменные w_i и переменные y_j' , возбуждающие элементы памяти;

2) по уравнениям (5) рассчитываются переменные состояния y_j . При этом в качестве аргументов функций используются значения переменных y_j' , полученные при решении уравнений (4);

3) повторно решаются уравнения (3) и (4) с новыми значениями переменных y_j ;

4) если значения переменных y_j' на двух последовательных итерациях остаются без изменений, то состояние схемы является устойчивым; в противном случае осуществляется возврат к п. 2.

Задав начальное состояние схемы и указав последовательность входных переменных, можно с помощью описанной про-

253

цедуры рассчитать выходные переменные и переменные состояния схемы для всех последующих моментов времени.

Анализ процедуры моделирования позволяет сделать следующий вывод. Реальным объектом, для которого справедлива подобная модель, служит схема, в которой процессы изменений в комбинационной и запоминающей частях протекают в разное время. Функцию разделения времени при этом выполняют синхронизирующие (тактирующие) сигналы. Подобная математическая

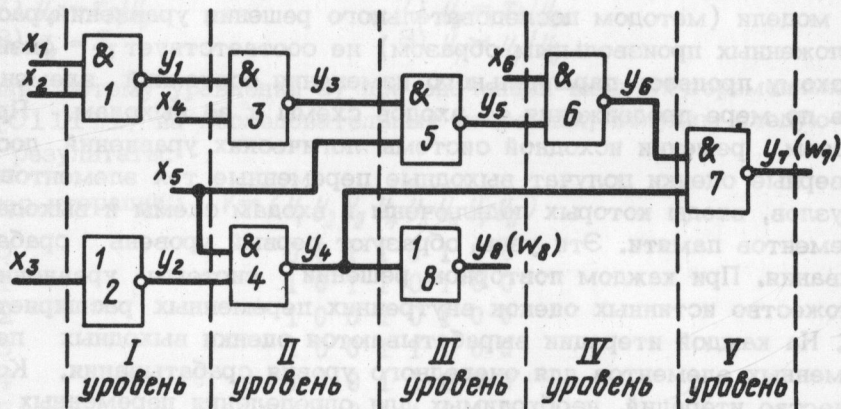


Рис. 3. Комбинационная схема

модель называется также синхронной моделью по аналогии с соответствующим ей физическим объектом: а сам способ моделирования получил название синхронного моделирования. Синхронные модели применимы для логического анализа широкого класса цифровых устройств.

Существуют разные способы решения системы логических уравнений. При задании системы функциями выходных переменных (3), переменных возбуждения узлов памяти (4) и переменных состояния (5) каждое уравнение представляет собой логическую функцию множества переменных, для записи которой используется скобочная форма. Например, для комбинационной схемы (рис. 3) уравнение выходной переменной выглядит следующим образом: $w_7 = (\bar{x}_3/x_5) / (((x_1/x_2)/x_4)/x_5)/x_6$. Скобочная форма записи продиктована необходимостью определения старшинства логических операций над аргументами функции. Способ моделирования, основанный на подобном представлении модели схемы, не дает возможности определить значения внутренних переменных, характеризующих состояние про-

межуточных элементов схемы, ввиду отсутствия их в явном виде среди вычисляемых функций.

Более универсальными являются способы моделирования, основанные на представлении математической модели схемы в виде совокупности уравнений, описывающих поведение отдельных логических элементов и функциональных узлов. Эти уравнения решаются последовательно друг за другом. В общем случае исходная система уравнений не упорядочена. Это ведет к тому, что процесс определения внутренних переменных схемы по ее модели (методом последовательного решения уравнений, расположенных произвольным образом) не соответствует физическому процессу параллельного изменения состояний элементов по мере продвижения от входов схемы к ее выходам. При первом решении исходной системы логических уравнений достоверные оценки получают выходные переменные тех элементов и узлов, входы которых подключены к входам схемы и выходам элементов памяти. Эти узлы образуют первый уровень срабатывания. При каждом повторном решении системы уравнений множество истинных оценок внутренних переменных расширяется. На каждой итерации вырабатываются оценки выходных переменных элементов для очередного уровня срабатывания. Количество итераций, необходимых для определения переменных на выходе комбинационного блока, равно числу элементов, составляющих самую длинную цепь.

Описанный метод моделирования связан с многократным решением системы уравнений, что приводит к нерациональным затратам машинного времени. Поэтому перед выполнением моделирования целесообразно произвести упорядочение исходной системы уравнений по уровням срабатывания элементов схемы. Это означает, что первыми должны быть заданы уравнения элементов первого уровня, затем уравнения элементов второго уровня и т. д. Последними должны быть перечислены уравнения элементов, выходы которых являются выходами комбинационного блока. Упорядоченная таким образом (ранжированная) система уравнений позволяет определить состояние комбинационного блока за одну итерацию при условии, что выходы элементов j -го уровня не связаны с входами элементов того же или более низкого уровня (ранга).

В качестве примера рассмотрим процедуру моделирования комбинационной схемы (см. рис. 3). Ниже дано ее описание в виде совокупности произвольно заданных логических уравнений отдельных элементов а).

а)

Входы: $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$

Система уравнений:

- 1) $y_7 = y_4 / y_6$
- 2) $y_6 = x_6 / y_5$
- 3) $y_5 = x_5 / y_3$
- 4) $y_3 = x_4 / y_1$
- 5) $y_1 = x_1 / x_2$
- 6) $y_8 = \bar{y}_4$
- 7) $y_4 = x_5 / y_2$
- 8) $y_2 = \bar{x}_3$

б)

Входы: $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$

Система уравнений:

- 1) $y_2 = \bar{x}_3$
- 2) $y_1 = x_1 / x_2$
- 3) $y_3 = x_4 / y_1$
- 4) $y_4 = x_5 / y_2$
- 5) $y_5 = x_5 / y_3$
- 6) $y_8 = \bar{y}_4$
- 7) $y_6 = x_6 / y_5$
- 8) $y_7 = y_4 / y_6$

Решая систему уравнений а) при значениях входных переменных $X = (011111)$ на последовательных итерациях, получим следующие результаты:

Номер итерации::	$Y = (y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8)$
0	0 0 1 1 0 1 0 0
1	1 0 1 1 0 1 0 0
2	1 0 0 1 0 1 0 0
3	1 0 0 1 1 1 0 0
4	1 0 0 1 1 0 0 0
5	1 0 0 1 1 0 1 0

Здесь итерация с номером 0 соответствует начальному значению переменных Y . Устойчивые значения выходных переменных схемы получены лишь после пятой итерации.

Упорядочив исходную систему уравнений по уровням срабатывания элементов, получим систему уравнений б). Решение ее уже после первой итерации дает окончательный результат.

Общее количество уравнений, решаемых при моделировании комбинационной схемы, равно произведению количества элементов на число итераций. Нетрудно убедиться, что с возрастанием сложности и объема схемы продолжительность моделирования первым способом резко возрастает по сравнению со вторым.

Дальнейшим развитием второго способа является метод событийного моделирования, при котором каждый раз просматривается не вся схема, а лишь часть ее. Это связано с тем, что не все элементы схемы переключаются при изменении сигналов на ее входах; часть элементов сохраняет свое состояние. Определяя направление, в котором происходит распространение событий, можно исключить из рассмотрения пассивные элементы. Для этого необходимо в ходе моделирования постоянно контролировать все изменения внутренних переменных,

используя это для определения элементов, входы которых воспринимают эти изменения как события. Из этих элементов формируются списки, по которым производится подбор логических уравнений для последующей обработки.

По номеру элемента, указанному в списке, выделяется одно логическое уравнение из всей совокупности уравнений модели. Переменным, расположенным в правой части уравнения, присваиваются их текущие значения, после чего вычисляется значение функции. Найденное значение переменной сравнивается с предшествующим. При изменении переменной определяется новая группа элементов, состояние которых зависит от этой переменной. Из этих элементов формируется новый список.

Описанная процедура повторяется затем для следующего элемента текущего списка и т. д. После обработки одного списка элементов автоматически начинается обработка нового списка. Блок-схема алгоритма событийного моделирования приведена на рис. 4. Начальный список элементов C_1 формируется

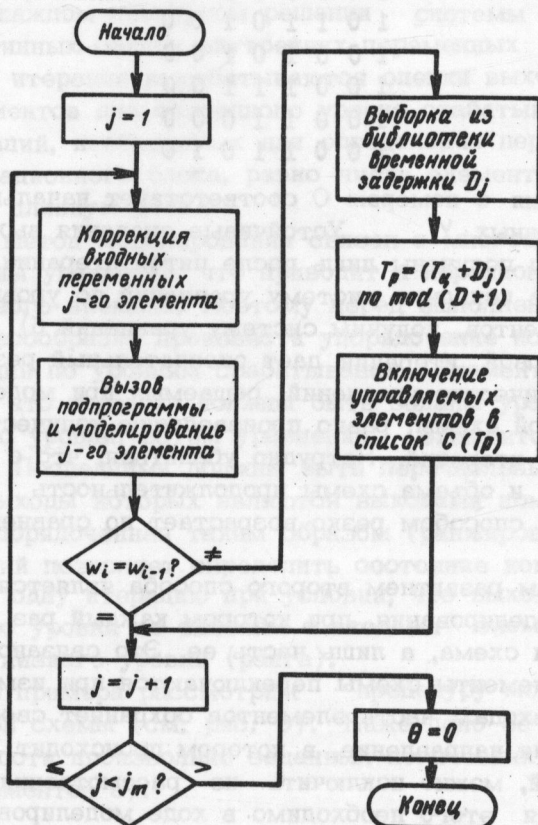


Рис. 4. Блок-схема алгоритма событийного моделирования

с учетом происшедших изменений на входах схемы. При этом подсчитывается количество элементов $j_{m,1}$, включаемых в список. Решению одного логического уравнения модели предшествует выбор j -го элемента списка C_1 и использование его для нахождения логического уравнения, описывающего состояние y_j этого элемента. Если предыдущее значение $y_{j,0}$ совпадает с вновь вычисленным значением $y_{j,1}$, то номера уравнений, зависящих от y_j , включаются в список C_2 . Количество таких уравнений n зависит от числа повторений переменной y_j в правых частях уравнений модели. После обработки всех элементов списка $C_1 (j > j_{m,1})$ осуществляется переход к обработке списка $C_2 (i=2)$ и т. д. В случае, если состояние y_j элемента после моделирования не изменилось, то номера уравнений, зависящих от y_j , в список C_{i+1} не попадут, и, следовательно, последующее моделирование будет продолжаться с использованием усеченной модели схемы.

При таком способе моделирования анализу подвергаются лишь те элементы, которые непосредственно участвуют в передаче сигналов. При изменении входных переменных активный путь, по которому распространяются события, может измениться. В этом случае алгоритмом моделирования обеспечивается автоматическая перестройка модели применительно к новой ситуации.

Сказанное можно пояснить на примере анализа комбинационной схемы (см. рис. 3). При замене набора входных переменных $X_1 = (111010)$ набором $X_2 = (111001)$ изменению подвергаются входные переменные x_5 и x_6 . Тогда в соответствии с описанной процедурой моделирования в первоначальный список моделируемых элементов войдут элементы 6, 4, 5, которые соединены с входами x_6, x_5 . Решив уравнения $y_6 = x_6/y_5, y_4 = x_5/y_2, y_5 = x_5/y_3$, сравниваем вновь вычисленные состояния элементов y_6, y_4, y_5 с предыдущими. По результатам сравнения строим новый список, состоящий из одного элемента 6. Этот процесс продолжаем до тех пор, пока наблюдается изменение состояний. В итоге из общего числа (8) элементов схемы окажутся промоделированными элементы 6, 4, 5, 6, 7, причем один из них с номером 6 был промоделирован дважды.

С увеличением объема анализируемой схемы доля активных элементов в каждом рабочем такте снижается. Эффективность событийного моделирования повышается также с возрастанием длины анализируемого теста. Таким образом, метод событийного моделирования применим в первую очередь для анализа больших схем, у которых объем и длина теста способствуют

эффективному применению описанного способа. Другой областью применения метода событийного моделирования можно назвать исследования с использованием многовариантного анализа схем.

Все сказанное сохраняет свою силу при анализе последовательностных схем. Моделирование этих схем включает два этапа: моделирование комбинационного блока и моделирование элементов – источников сигналов обратной связи.

Источники обратной связи могут быть определены "вручную" при описании схемы либо автоматически при наличии программного блока, решающего задачу поиска обратных связей. При "ручном" способе поиск элементов – источников обратной связи осуществляется путем топологического анализа схемы и иногда оказывается трудоемкой задачей, особенно при анализе больших схем. Эту процедуру можно упростить, если считать все запоминающие элементы потенциально возможными источниками сигналов обратной связи. Тогда на долю составителя описания схемы остается анализ комбинационного блока. Разнообразие схемотехнических решений приводит зачастую к тому, что блок комбинационных логических элементов также содержит кольцевые структуры, которые могут привести к закливанию алгоритма моделирования.

Например, при моделировании комбинационной части схемы на рис. 5 имеет место закливание алгоритма моделирования при определении начального состояния цепи, состоящей из элементов 29, 31, 33, 35, так как выход элемента 35 соединен с входом элемента 29. Устранить закливание можно, исключив, например, элемент 29 из списка элементов комбинацион-

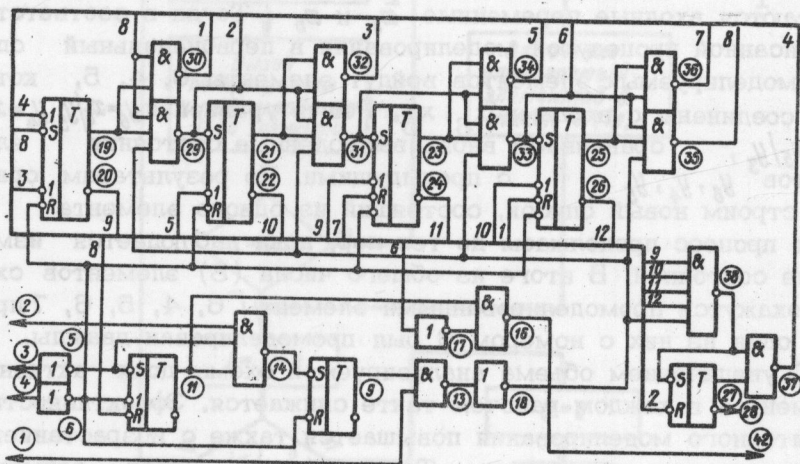


Рис. 5. Функциональная схема блока управления

ного блока и передав его в список элементов - источников обратной связи.

Каждая итерация моделирования последовательностной схемы включает событийное моделирование списков элементов комбинационного блока до тех пор, пока имеет место изменение внутренних переменных. Вслед за этим моделируется список запоминающих элементов (элементов - источников обратной связи) и проверяется устойчивость вычисленного состояния. Если переменные состояния запоминающих элементов совпадают с теми значениями, которые имели место перед выполнением итерации, состояние схемы является устойчивым, так как повторное моделирование лишь подтвердит общую картину состояний. Если значения переменных состояния в начале и конце итерации не совпадают, выполняется новая итерация с новыми значениями переменных.

По результатам моделирования формируется вектор переменных состояния модели, совокупность которых образует матрицу переходов. В отредактированном виде результаты моделирования выводятся на печать в виде временных диаграмм.

Способы отображения функционально-логических схем на входных языках и в ЦВМ

Для машинного анализа логических схем разработан ряд отечественных программ. Основные сведения о программах читатель может найти в литературе, в частности, в работах [2, 5, 10, 11]. Здесь кратко обсуждаются отличительные черты этих программ. Написанные для различных вычислительных машин, с использованием различных математических средств, они, единые по сути, отличаются прежде всего объемом исследуемых схем, скоростью анализа, входным языком описания. Поскольку допустимый объем анализируемых схем и скорость моделирования во многом зависят от технических возможностей используемых вычислительных машин, охарактеризуем программы со стороны входных языков для описания схем.

Нами уже частично рассмотрен вопрос о способах описания логических схем. При этом были установлены две формы описания схем: алгоритмическая с использованием скобочных выражений и автоматная, представленная списком логических функций базовых элементов схемы. Первая удобнее на более высокой ступени функционально-логического этапа проектиро-

вания, вторая - на самой низкой ступени этого этапа, предшествующей этапу конструирования. Принимаемый уровень описания схем в разных программах зависит от сложившихся традиций проектирования, класса исследуемых схем, технических средств и способа построения самой системы автоматизированного проектирования. При этом необходимо отметить, что используя для модели алгоритмическое описание схем, можно в одной модели описать узлы и блоки с разных уровней проектирования. Та форма записи, которая была приведена ранее, описывала комбинационную схему на уровне вентилей. Для того чтобы описать блоки разных уровней (вентили, триггеры, регистры, многозарядные сумматоры, запоминающие устройства), необходимо расширить морфологию и синтаксис языка описания, т. е. перейти к созданию специализированного языка. Такими языками являются языки моделирования ОСС [10], ФОРЭС [5], МОДИС-В [7]. В указанной литературе описаны конструкции языков и способы их использования при описании устройств разной степени детализации. Универсальность и гибкость языковых средств требует определенных навыков и квалификации от персонала, занятого подготовкой схем к моделированию, что затрудняет контакт широкого круга разработчиков с ЭВМ.

Автоматные модели, ориентированные на определенный уровень функционально-логического проектирования, например, уровень принципиальных электрических схем, требуют более простых языковых средств. В частности, для функциональных схем, выполненных на уровне вентилей и триггеров (см. рис. 5), удобно задать модель списком уравнений для каждого узла в отдельности. Автоматная модель наряду с простотой ее описания имеет ряд преимуществ перед моделями, описанными на языках моделирования: однозначное соответствие модели и технической документации; аналогию процессов, протекающих в схеме и на модели, которая позволяет строить диагностические и контролирующие тесты и отработать методику отладки изделия на модели; ускорение анализа путем применения метода событийного моделирования; простой транслятор для перевода описания схемы на внутренний язык машины.

Следует отметить, что алгоритмические модели удобны при разработке устройств; тогда как автоматные модели лучше приспособлены для проверки и всестороннего анализа технической документации.

Как правило, в качестве исходных данных для автоматной модели указываются связи элементов и узлов и выполняемые ими логические функции. Эти данные затем используются для построения машинной модели, которая и является исследуемым

объектом. Связи элементов можно задать, например, с помощью матрицы связности $D = \|d_{ij}\|$. При наличии связи между выходом i -го и входом j -го элементов схемы элемент матрицы d_{ij} принимает значение, равное единице, при отсутствии связи d_{ij} равно нулю. Недостатком такого способа описания является его громоздкость - матрица связности имеет большие размеры и без учета свойства ее разреженности имеем нерациональное использование памяти ЭВМ. Более удобно задавать описание схемы совокупностью описаний отдельных элементов. Описание каждого элемента при этом содержит указатель типа логической функции, номер описываемого элемента, номера элементов, подключенных к входам. Например, для схемы, изображенной на рис. 6, где все

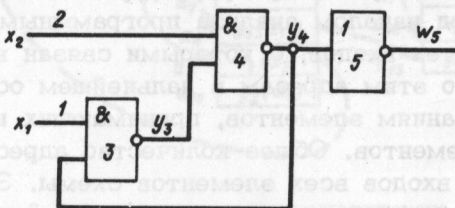


Рис. 6. Функциональная схема

элементы и входы пронумерованы целыми положительными числами, описание элемента 4 выглядит следующим образом: И=НЕ, 4, | 2, 3; где И=НЕ - указатель типа элемента, | - разделитель.

Подобная форма описания схемы, в частности, реализована при подготовке исходных данных для программы анализа ПАЗ [3]. Наконец, описание связей можно задать на специализированном языке типа МОЛК [7], который описывает связь между логическими элементами с указанием соответствующих конструктивных узлов (микросхем) и номеров контактов, объединенных одной сигнальной шиной. Такое описание после проверки и моделирования схемы может служить непосредственно документом при изготовлении изделия, что исключает возможность внесения дополнительных ошибок при переходе от одного способа описания к другому, если этот переход осуществляется "вручную".

Описание схемы в виде матрицы связности дает полную информацию о связях любого элемента: связи входов i -го элемента с остальными элементами устанавливаются при чтении i -го столбца, связи выхода i -го элемента - при

чении i -й строки. При описании схемы списком элементов связи указываются относительно входов каждого элемента. При выполнении моделирования эти связи позволяют выделить из множества переменных те, которые поступают на входы моделируемого узла. Чтобы осуществить передачу вычисленных значений выходных переменных на следующие узлы, нужно дополнить описание схемы информацией о связях выходов элементов с остальными.

Эта информация может быть получена из исходного описания. Действительно, просматривая описание каждого элемента, можно установить, связан ли элемент с моделируемым. Наличие этой связи характеризуется присутствием номера моделируемого элемента среди номеров, характеризующих входные связи. Чтобы не повторять эту процедуру на каждом шаге моделирования, перед началом анализа программным путем определяются адреса тех входов, с которыми связан выход каждого элемента. По этим адресам в дальнейшем осуществляется обращение к описаниям элементов, принимающих информацию от моделируемых элементов. Общее количество адресов — указателей равно сумме входов всех элементов схемы. Это значит, что для хранения такой информации в машине требуется массив ячеек памяти, по объему равный массиву, отводимому для хранения исходного описания.

Для того чтобы не увеличивать объем занимаемой памяти, адреса ячеек — входов распределяются по всему исходному массиву следующим образом. В ячейку, где хранился номер описываемого элемента, записывается адрес одного из входов, связанных с выходом этого элемента общей сигнальной шиной. По адресу этого входа можно выйти к описанию элемента нагрузки. Для того чтобы перейти к описанию следующего элемента нагрузки, в первую из ячеек — входов заносится адрес ячейки второго входа и т.д. В результате адреса ячеек и их содержимое образуют цепь, по которой можно последовательно обойти все элементы, связанные одной сигнальной шиной, начиная с элемента источника и кончая последним нагрузочным элементом.

Для схемы на рис. 6, например, описание списком элементов выглядит следующим образом:

ВХОДЫ	1, 2
СПИСОК ЭЛЕМЕНТОВ	И-НЕ, 4 2, 3
	И-НЕ, 3 1, 4
	НЕ, 5 4
ВЫХОД	5

После ввода в ЭВМ исходных данных числовая информация размещается в ячейках a_1, a_2, \dots, a_{13} (рис. 7). Выход элемента 4 соединен с входами элементов 3 и 5 общей сигнальной шиной. В соответствующих ячейках памяти a_8, a_{13}, a_6 содержится один и тот же номер. Замещая содержимое этих ячеек адресами, получим адресную цепь $\langle a_8 \rangle = a_{13}$,

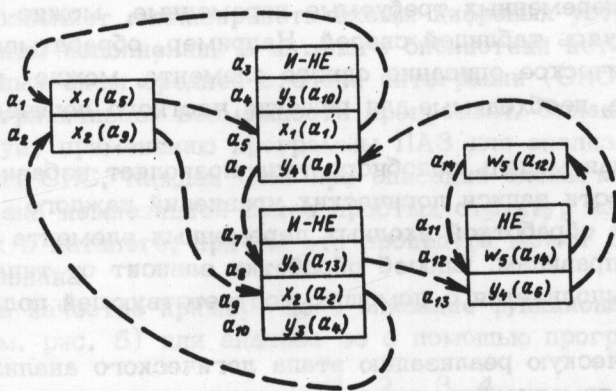


Рис. 7. Размещение структурно-логического описания схемы в памяти машины

$\langle a_{13} \rangle = a_8, \langle a_6 \rangle = a_8$, которая позволяет перейти от описания одного элемента к описанию другого элемента. Изменив последнее звено цепи можно разомкнуть кольцо. Например, заменив содержимое ячейки a_6 на a_2 , можно обратиться к новой адресной цепи, объединяющей другую группу элементов (вход 2 и элемент 4). Таким образом, путем "склейки" отдельных адресных цепей можно организовать списки элементов с различными признаками.

На рис. 8 условно показана цепь, образованная путем "склейки" двух адресных цепей: $\langle a_8 \rangle = a_{13}; \langle a_{13} \rangle = a_6; \langle a_6 \rangle = a_8$ и

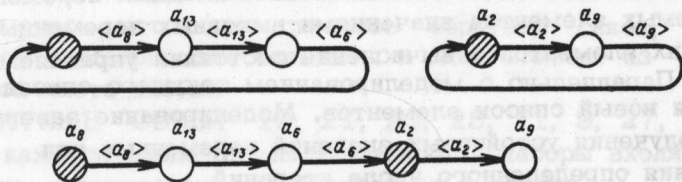


Рис. 8. Адресная цепь списка элементов (заштрихованные кружки — управляющие элементы, незаштрихованные кружки — управляемые элементы,

$\langle a_2 \rangle = a_g$; $\langle a_g \rangle = a_2$. Следуя вдоль нее, можно обработать описания элементов 4, 5, 3, 4. Например, тип элемента легко установить, просматривая массив ячеек с меньшими адресами. При этом код типа элемента должен отличаться от кода адреса.

Наряду со структурно-логической частью в машинную модель схемы входит также массив внутренних и внешних переменных. При наличии соответствия между таблицей связей и массивом переменных требуемые переменные можно отыскать, руководствуясь таблицей связей. Например, обрабатывая структурно-логическое описание одного элемента, можно установить переменные, необходимые для решения частного логического уравнения.

Машинная модель подобного типа позволяет избавиться от необходимости записи логических уравнений каждого элемента, заменив их обработкой входных переменных элемента по определенным правилам. Способ обработки зависит от типа элемента и выполняется с помощью соответствующей подпрограммы.

Практическую реализацию этапа логического анализа ЦУ в системе автоматизированного проектирования рассмотрим на примере использования программы анализа ПАЗ. В программе реализован метод событийного моделирования в сочетании с цепной структурой списков. Описание схемы для моделирования представляет собой набор предложений, каждое из которых описывает один из элементов или функциональных узлов. После ввода исходного описания программа автоматически строит адресные цепи, объединяющие элементы с общей сигнальной шиной. При этом один из элементов группы является управляющим, а остальные – управляемыми. Перед началом моделирования путем "склейки" адресных цепей формируется начальный список элементов, соединенных с входами схемы и выходами запоминающих элементов. Одновременно в массив переменных вводятся начальные значения переменных состояния и внешние переменные. Моделирование заключается в последовательном обходе текущего списка, замене значений входных переменных управляемых элементов значениями выходных переменных управляющих элементов и вычислений состояний управляемых элементов. Параллельно с моделированием текущего списка формируется новый список элементов. Моделирование завершается после получения устойчивых значений переменных или после выполнения определенного числа итераций.

Для каждого типа элементов (узлов) в памяти машины хранится математическая модель, интерпретирующая функциональную зависимость между входными и выходными переменными. Биб-

библиотека моделей программы ПАЗ содержит модели комбинационных логических элементов (И, И=НЕ, ИЛИ, ИЛИ=НЕ, И=ИЛИ=НЕ) и запоминающих элементов разных типов. В нее входят модели асинхронных триггеров с прямым и инверсным управлением, модели синхронных триггеров типа RS, D, DV, T и JK с различной структурой (одноступенчатые и двухступенчатые). Все модели написаны с учетом элементной базы потенциального типа, что позволяет анализировать схемы цифровых устройств в интегральном исполнении. В каталоге библиотеки нет моделей интегральных схем средней степени интеграции (СИС), что несколько ограничивает возможности программы. Однако это не препятствует применению программы ПАЗ для анализа схем, содержащих СИС. Каждая СИС при описании схемы может быть представлена композицией более простых структур из числа, описанных в каталоге, причем эта процедура может быть автоматизирована.

Ниже в качестве примера дано описание функциональной схемы (см. рис. 5) для анализа ее с помощью программы ПАЗ.

ВХОДЫ 1, 2, 3, 4
СПИСОК ЭЛЕМЕНТОВ И УЗЛОВ

HE, 5 3	HE, 18 13	I=HE, 31 29, 18, 21
HE, 6 4	RS, 19, 20 32, 6 37, 35	I=HE, 32 29, 21
RS, 9 6 14	RS, 21, 22 34, 6 29	I=HE; 33 31, 23, 18,
RS, 11 35, 6 5	RS, 23, 24 36, 6, 20 31	I=HE, 34 31, 23
I=HE, 13 1, 9	RS, 25, 26 30, 22, 6 33	I=HE, 35 33, 25, 18
I=HE, 14 2, 5, 11	RS, 27, 28, 29 38	I=HE, 36 25, 33
I=HE, 16 17, 11	I=HE, 29 35, 19, 18	I=HE, 37 27, 38
HE, 17 33	I=HE, 30 19, 35	I=HE, 38 18, 20, 23,
		24, 26

ВЫХОДЫ 16, 28

Структурно-логическое описание схемы дополняется перечнем элементов-источников сигналов обратной связи, куда вошли все запоминающие элементы и один элемент из комбинационной части схемы.

ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ 19, 21, 23, 25, 11, 9, 27, 29

Для каждого входа схемы указываются наборы входных переменных, соответствующие контрольному тесту:

ВХОД 1-0101010101010101; ВХОД 2-1010101010101010;
ВХОД 3-0001111000000000; ВХОД 4-0111100000000000.
Задается ряд директивных констант, определяющих длину тес-

та; режим анализа (логический или временной); количество элементов обратной связи с начальным состоянием, соответствующим логической единице, и т. п.

Указывается список контрольных точек для печати таблиц состояний и временных диаграмм.

По результатам логического анализа печатается таблица состояний заданных элементов (узлов) схемы (табл. 1). По

Таблица 1

Номера контрольных точек	30 - 1111111111001111
	32 - 1111111111110011
	34 - 1111111111111100
	36 - 1111111111111111
	38 - 1111111111011111
	16 - 1111111111111110

ней нетрудно установить, учитывая тип логики, соответствующие уровни напряжений в контрольных точках схемы. В частности, для схем с положительной логикой единица соответствует высокому уровню напряжения, ноль - низкому уровню напряжения; для схем с отрицательной логикой - наоборот. Таблица



Рис. 9. Фрагмент временной диаграммы, построенной с помощью ЦВМ

состояний заданных элементов (узлов) схемы получена по результатам машинного анализа схемы, приведенной на рис. 5.

По желанию пользователя можно оформить результаты логического анализа в виде временных диаграмм сигналов в указанных точках схемы. В качестве примера на рис. 9 приведен фрагмент временных диаграмм, построенных с помощью ЦВМ по результатам логического анализа схемы, приведенной на рис. 5.

III. МЕТОДЫ МАШИННОГО АНАЛИЗА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТНЫХ СХЕМАХ

Одной из важных характеристик, исследуемых в процессе проектирования цифрового устройства, является оценка его функциональной надежности. Под функциональной надежностью понимается устойчивость функционирования схемы в условиях окружающей среды, воспроизводимость функций множеством объектов, выполненных по одной и той же схеме с общей для всех объектов технологией изготовления. Функциональная надежность определяется по ряду показателей: величине динамических параметров разрабатываемого блока, допустимому диапазону изменения факторов внешней среды, вероятности безотказной работы в условиях массового изготовления блока.

Такие оценки могут быть получены в результате комплексного исследования изготовленного блока при климатических и вибрационных воздействиях, в условиях повышенной радиации, при изменении уровней питающих напряжений и других факторов, характеризующих условия эксплуатации. Исследования, проводимые путем натуральных испытаний опытного изделия, позволяют достаточно глубоко оценить качество проекта. Однако при использовании только физического моделирования неизбежны повышенные материальные затраты при доработке схем. Кроме того, учитывая, что процесс проектирования носит итерационный характер, натурные испытания затягивают сроки проектирования. Поэтому взоры проектировщиков все больше обращаются к машинным методам исследования динамических характеристик разрабатываемых схем.

Математические модели для анализа переходных процессов в схемах

Исследование динамики переключательных схем включает проверку устойчивости функционирования при заданных времен-

ных характеристиках элементной базы; определение быстродействия устройства, степени деформации сигналов в процессе их распространения по цепи элементов; обнаружение состязаний и риска сбоя.

При машинном методе исследования для оценки этих характеристик требуются математические модели, которые позволяют воспроизвести картину переходных процессов во всех точках схемы. Эти модели должны учитывать реальные свойства элементов схемы: задержку сигнала при включении и выключении; среднюю задержку распространения сигнала; длительность фронтов.

Вместе с тем математическая модель сложного объекта, каким является последовательностная схема, должна быть по возможности простой, быстро решаемой, удобной для исследования ее с помощью ЭВМ. Таким образом, высокие точность анализа и скорость моделирования — это два противоречивых требования, которыми прежде всего обуславливается тип используемой математической модели. Говоря о скорости моделирования, нельзя не упомянуть и о сложности объекта. Чем сложнее схема, тем больше времени требуется на ее анализ.

При проектировании больших схем последовательностного типа математической моделью для анализа переходных процессов является система временных логических уравнений:

$$w_i(t) = f_i [x_1(t), x_2(t), \dots, x_p(t); y_1(t-l), y_2(t-q), \dots, y_k(t-r)]; \quad (6)$$

$$y_j(t) = g_j [x_1(t), x_2(t), \dots, x_p(t); y_1(t-l), y_2(t-q), \dots, y_k(t-r)], \quad (7)$$

где $w_i(t)$ — выходная переменная i -го выхода схемы для текущего момента времени t ; $y_j(t)$ — внутренняя переменная состояния; $x_1(t), x_2(t), \dots, x_p(t)$ — входные переменные двоичного типа; $x_1(t), x_2(t), \dots, x_p(t) \in \{0,1\}$; $y_1(t-l), y_2(t-q), \dots, y_k(t-r)$ — внутренние переменные двоичного типа, определяемые соответственно для моментов времени $(t-l), (t-q), \dots, (t-r)$; f_i, g_j — логические функции аргументов множества X и Y .

В этой модели изменение переменных w_i, y_j происходит с запаздыванием по отношению к переменным, вызвавшим эти изменения. Действительно, если событие y_j , происшедшее в момент времени $(t-l)$, приводит к изменению переменной состояния, то оно наступит не раньше момента времени t . Такая модель позволяет исследовать схемы, в которых динамические свойства логических элементов представлены задержкой выходного сигнала относительно входного воздействия. Про-

цесс распространения событий в модели в этом случае носит асинхронный характер, поэтому модель такого типа называется асинхронной. Точность переходных процессов, воспроизводимых с помощью асинхронной модели, в значительной степени зависит от того, насколько точно описаны задержки элементов схемы.

Задержки сигналов при переключении элементов зависят от множества факторов: типа элемента, его структуры, направления переключения (из единичного состояния в нулевое или наоборот),

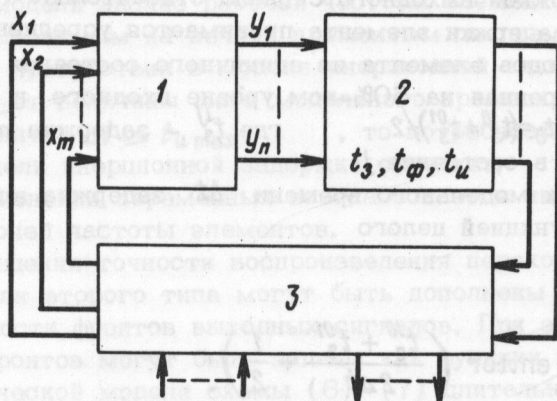


Рис. 10. Структура модели элемента

способа включения элемента в схему, технологического процесса изготовления элемента. Кроме того, на величину задержки существенное влияние оказывают условия эксплуатации схемы. Все это, в конечном счете, обуславливает случайный характер величины задержки.

В асинхронной модели последовательностной схемы задержки всех элементов полагаются кратными некоторой величине Δt , так что модельная задержка каждого элемента определяется соотношением $t_{3M} = t_3 / \Delta t \cong K$, где $K = 1, 2, 3, \dots$, т. е. $t_3 / \Delta t$ округляется до целых чисел.

В результате модель элемента (функционального узла) схемы можно представить графически цепочкой последовательно соединенных блоков, каждый из которых отражает определенные структурно-логические и динамические характеристики (рис.10). Блок 1 реализует логические функции элемента (узла) по значениям входных переменных. Блок 2 осуществляет задержку переменных состояния y_1, y_2, \dots, y_n на время $t_{3M1}, t_{3M2}, \dots, t_{3Mn}$. Блок 3 отражает связи данного элемента со сторо-

ны входов и выходов. Сравнивая модель элемента для анализа переходных процессов с моделью элемента для логического анализа, нетрудно заметить, что отличие заключается в добавлении блока 2, отвечающего за динамические свойства элемента.

Рассмотрим основные варианты (модели трех типов) построения этого блока, его содержание и оказываемое им влияние на глубину анализа последовательностных схем.

Модель первого типа описывает динамические свойства элементов задержкой выходного сигнала относительно входного. В качестве задержки элемента принимается усредненная задержка переходов элемента из единичного состояния в нулевое и обратно, измеренная на 50%-ном уровне входного и выходного сигналов $t_3 = (t_3^{10} + t_3^{01})/2$ где t_3^{ij} - задержка перехода из состояния i в состояние j .

В единицах модельного времени Δt задержка элемента определяется функцией целого

$$t_{3M} = \text{entier} \left(\frac{t_3^{10} + t_3^{01}}{2\Delta t} + \frac{1}{2} \right).$$

Модели элементов описанного типа представляют события в схеме происходящими мгновенно, но с некоторой задержкой относительно входных воздействий. Такие модели позволяют приближенно рассчитать переходные процессы в схеме при наихудших значениях параметров элементов и ориентировочно оценить быстродействие устройства.

Модель второго типа предусматривает отдельное описание задержки при переключении элемента из одного состояния в другое $t_{3M}^{10} = \text{entier}(t_3^{10}/\Delta t + 1/2)$; $t_{3M}^{01} = \text{entier}(t_3^{01}/\Delta t + 1/2)$.

Такие модели дают возможность оценить степень деформации сигналов при прохождении их по цепям. Дело в том, что длительность сигнала, передаваемого по цепи последовательно включенных вентилях, может изменяться. Это связано с тем, что время включения и выключения элементов неодинаково. Уменьшение длительности сигнала может привести к тому, что схема, на которую он поступает, не сработает. При увеличении длительности сигнала больше допустимой возможны ложные срабатывания, что, в конечном счете, также ведет к неправильной работе устройства. Дифференцированная оценка задержки по направлениям переходов повышает точность ана-

лиза, что особенно важно при проектировании быстродействующих схем.

Применение таких моделей для анализа схем может вызвать ситуацию, когда частота изменения переменных на входах какого-либо элемента превысит допустимую для элементов данного типа. На этот случай модели могут быть дополнены описанием инерционной задержки, отражающей инерционные свойства элемента $f_u = 1/f_{\max}$, где f_{\max} - максимальная частота переключения элемента. При отсутствии описания в модели анализ рабочей частоты элементов выполняется по выводимым на печать временным диаграммам. Необходимость присутствия в модели инерционной задержки зависит также от величины шага модельного времени Δt .

Если принять $\Delta t \geq t_{u \max}$, то потребность отображения в модели инерционной задержки отпадает, так как скорость изменения переменных всегда остается ниже предельной рабочей частоты элементов.

Для повышения точности воспроизведения переходных процессов модели второго типа могут быть дополнены описанием длительности фронтов выходных сигналов. При этом длительности фронтов могут быть заданы как функции нагрузки. В математической модели схемы (6), (7) длительности фронтов сигналов не учитываются. Основным временным параметром, используемым при моделировании, является задержка переключения элементов. Однако следует иметь в виду, что длительности фронта выходного сигнала зависит задержка сигнала в управляемой схеме. Поэтому задержки t_3^{10}, t_3^{01} переключения элементов могут быть уточнены

$$(t_3^{10})' = t_3^{10} + \Delta t^{10}; \quad (t_3^{01})' = t_3^{01} + \Delta t^{01},$$

где $(t_3^{10})'$, $(t_3^{01})'$ - уточненные значения задержек; Δt^{10} , Δt^{01} - приращения задержки, обусловленные увеличением или уменьшением длительности фронта входного сигнала по сравнению с номинальной, использованной для оценки t_3^{10}, t_3^{01} .

Вычислив перед началом моделирования длительности фронтов в промежуточных точках схемы, можно затем скорректировать первоначальные оценки задержек. Таким образом, в результатах последующего моделирования будет учтено влияние фронтов на динамику переключения схемы.

Модель третьего типа, называемая факторной моделью, описывает динамические параметры элементов (узлов) с учетом ряда факторов: условий внешней среды, в которых работает устройство; особенностей включения элементов в схеме;

технологических факторов; обуславливающих случайный характер выходных параметров.

Первую группу факторов представляют температура окружающей среды, уровень напряжений источников питания, уровень радиации и т.п. На величину выходных параметров влияют также структурные параметры элемента (узла) в схеме, как-то: коэффициенты объединения по входу и разветвления по выходу. Число факторов, учитываемых в модели, определяется конкретными требованиями, предъявляемыми при проектировании. Следует, однако иметь в виду, что с увеличением количества исследуемых факторов возрастает сложность анализа динамических характеристик элементов. Для целей анализа достаточно учитывать 5 - 6 основных факторов, например: уровень питающих напряжений, уровень радиации, нагрузочную характеристику элементов в схеме, температуру, параметры входных сигналов. Тогда временные задержки элементов определяются как функции заданного набора факторов $t_3^{10} = f_1(Q)$; $t_3^{01} = f_2(Q)$, где Q - набор исследуемых факторов влияния. С учетом технологического разброса параметров элементов приведенные зависимости носят статистический характер.

Методика применения этих моделей в программах анализа та же, что и для моделей второго типа. Решая с помощью моделей третьего типа те же задачи в процессе машинного анализа, мы получаем более глубокую оценку функциональной надежности схем в реальных условиях. Кроме того, статистические факторные модели позволяют выполнить многовариантный анализ схемы со всеми вытекающими из этого возможностями, такими как: статистическая оценка временных параметров устройства, определение вероятности безотказной работы и т. п.

Методы построения математических моделей элементов и функциональных узлов

При разработке математических моделей элементов необходимо решить ряд задач: выбрать тип модели; определить способ исследования элемента для оценки его выходных параметров; составить программу эксперимента, обеспечивающего эффективное исследование при наименьшем объеме испытаний; проанализировать работу элементов в заданных условиях; по результатам анализа построить математическую модель, используемую в дальнейшем при анализе последовательностных схем.

Тип разрабатываемых моделей зависит прежде всего от характера задач, решаемых при анализе последовательностных схем. В предыдущем разделе нами были рассмотрены три типа моделей, отличающихся сложностью и подробностью описания динамики процессов. Общим для этих моделей является установление связи выходных параметров с внутренними и внешними факторами, обуславливающими работу элемента. Под внутренними факторами здесь подразумеваются параметры самого элемента, влияющие на протекание процессов в электрической схеме. Внешние факторы, т. е. параметры внешней среды, влияя на характер этих процессов, также вносят свой вклад в оценки выходных параметров элементов. Таким образом разработка модели элемента сводится к установлению связей выходных параметров с учитываемыми факторами влияния. Характер этих связей может быть различным.

Выходный параметр может быть задан фиксированной величиной для заданной области изменения внешних факторов или функциональной зависимостью в исследуемой области. При задании выходного параметра фиксированной величиной могут быть использованы средние или предельные значения этого параметра. Определение этих величин требует, как правило, статистических исследований. Например, оценки выходных параметров, приводимые в справочной литературе для каждой группы схем, обычно являются предельными оценками, которые получены путем многократных испытаний элементов разных партий.

Функциональные зависимости могут иметь линейный и нелинейный характер. Для получения уравнений связи необходимо проверить влияние каждого исследуемого фактора на выходной параметр отдельно друг от друга и в комплексе с другими факторами.

В каждом случае при разработке модели требуется проанализировать работу элемента в заданном диапазоне изменения влияющих факторов. Такой анализ можно выполнить путем натурных испытаний или методом машинного анализа элемента по его принципиальной электрической схеме. Поскольку в данной работе рассматриваются различные аспекты автоматизированного проектирования, дадим краткую характеристику метода машинного анализа элементов.

Метод машинного анализа основан на представлении электрических процессов, протекающих в электронной схеме, системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} dv_1/dt &= f_1(v_1, v_2, \dots, v_q, t); \\ dv_2/dt &= f_2(v_1, v_2, \dots, v_q, t); \\ \dots\dots\dots \\ dv_q/dt &= f_q(v_1, v_2, \dots, v_q, t). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

В этих уравнениях v_1, v_2, \dots, v_q обозначают переменные состояния. Под переменными состояниями здесь подразумеваются величины, значения которых в некоторой момент времени t характеризуют текущее состояние процесса и служат для определения переменных состояния в последующие моменты времени. При анализе электронных схем переменным v_j соответствуют напряжения на емкостях и токи, протекающие через индуктивности.

Задав величины v_j в начальный момент времени и численно решая систему уравнений, можно определить законы изменения токов и напряжений в схеме во времени. Решение системы уравнений (8) дает общую картину переходных процессов в схеме, из которой можно найти оценки выходных параметров: время задержки, длительность фронта, максимальную частоту переключения и др.

Математическая модель (8) электронной схемы строится по эквивалентной электрической схеме или ее описанию. В существующих универсальных программах анализа электронных схем процесс составления уравнений математической модели полностью автоматизирован.

В настоящее время разработан и успешно освоен промышленностью ряд отечественных программ для анализа переключательных электронных схем: АКИМ, ПАЭС-1, АСАМС-Ф, СПАЭЛ, ПА1, ПА1М, ПА4. Все эти программы являются универсальными, позволяющими выполнять различные виды анализа для различных типов переключательных схем. Программы имеют удобные для пользователей входные языки, на которых производится описание принципиальной или эквивалентной электрической схемы. Примеры описания схем на входных языках для программ АКИМ, ПА1, ПА1М приведены в работе [17]. Там же прилагается полная инструкция по использованию программ анализа ПА1, ПА1М, написанных для ЭВМ "М-220", "БЭСМ-4", "М-222".

Подготовка исходных данных для этих программ включает: состояние формуляра, в котором отображается информация о структуре эквивалентной схемы; задание параметров внутренних компонентов (p - n переходов, резисторов и емкостей); описание режимных параметров, в котором указываются константы для выбора шага интегрирования, шаг вывода на печать токов и напряжений, время расчета начальных условий,

отрезок интегрирования, коэффициенты разветвления подсхем, из которых состоит эквивалентная схема и ряд других; задание параметров входных импульсов и констант, используемых при автоматическом определении значений выходных параметров; написание вспомогательного блока программы, который обеспечивает многовариантный анализ и автоматическую обработку результатов *. Программой предусмотрен также анализ электронной схемы при отключенном вспомогательном блоке.

Через вспомогательный блок разработчик может изменить параметры внутренних компонентов и входных сигналов. Программируя закон изменения этих параметров, например, в зависимости от температуры, можно обеспечить на модели имитацию реальной среды. При этом продолжительность исследования схемы во всем диапазоне температур значительно сокращается по сравнению с физическим экспериментированием. Аналогичные зависимости можно запрограммировать и для других факторов (радиаций, уровня напряжений и т. п.).

Машинный анализ электронных схем позволяет активно вмешиваться в процесс исследований при изучении влияния целой группы факторов. Метод планируемого эксперимента, разработанный применительно к многофакторному анализу, легко реализуем на ЭВМ и позволяет получить интересующие данные при любом сочетании исследуемых факторов. Одновременное варьирование несколькими факторами по определенному плану позволяет сократить объем исследований по сравнению с последовательным однофакторным анализом. Ниже излагается методика многофакторного анализа базовых элементов и функциональных узлов.

Многофакторный анализ начинается с определения области пространства, в котором исследуется модель электронной схемы (8). С этой целью задается набор факторов q_1, q_2, \dots, q_m , влияющих на работу схемы, и диапазон их изменения $(q_{1\max} - q_{1\min}), (q_{2\max} - q_{2\min}), \dots, (q_{m\max} - q_{m\min})$. Тогда любую точку пространства можно представить совокупностью координат, каждая из которых устанавливает определенное значение соответствующего фактора. Например, i -я точка пространства с координатами $(q_{1i}, q_{2i}, \dots, q_{mi})$ характеризуется значениями факторов $q_{1i}, q_{2i}, \dots, q_{mi}$.

* В программе ПА1М вспомогательный блок составляется автоматически по лаконичному описанию задания на языке многовариантного анализа.

От физической системы координат можно перейти к относительной путем соответствующего нормирования. Для этого полагаем нормирующей величиной среднее значение фактора в диапазоне изменения $q_j^0 = (q_{j\max} + q_{j\min}) / 2$. Тогда относительные координаты i -й точки пространства определяются соотношением $x_{ji} = (q_{ji} - q_{j0}) / q_{j0}$. Подставляя в качестве q_{ji} предельные значения j -го фактора, получим граничные значения j -го фактора $x_{j\max} = +1$, $x_{j\min} = -1$. Таким образом, все исследуемое пространство можно представить гиперкубом, плоскости которого отсекают по осям координат отрезки, равные ± 1 . На рис. 11 исследуемое пространство представлено трехмерным

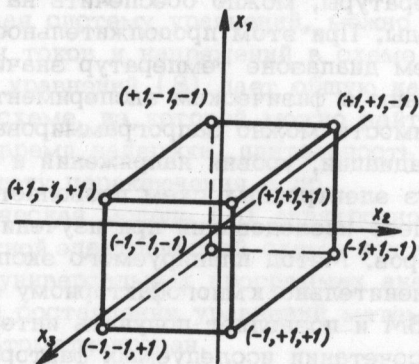


Рис. 11 Куб трехмерного факторного пространства

кубом. Координаты x_1 , x_2 , x_3 соответствуют трем независимым факторам различной природы. Центр куба имеет координаты $(0, 0, 0)$, что соответствует средним значениям каждого фактора. Наиболее удаленными от центра являются точки, расположенные в вершинах куба. Располагаясь на границах области, эти точки позволяют оценить предельные отклонения выходных параметров схемы от среднего значения по каждому из исследуемых факторов. Закон изменения выходных параметров внутри исследуемой области заранее неизвестен. Однако по результатам анализа в отдельных точках пространства можно построить математическую модель, описывающую изменение выходного параметра во всей области.

При разработке такой модели необходимо выбрать в исследуемом пространстве точки, удовлетворяющие следующим требованиям: каждая точка пространства должна быть физически реализуема; набор точек должен удовлетворять типу искомой

модели (линейной или нелинейной); совокупность точек должна обеспечивать минимальный объем исследований; математическая модель должна обеспечить по возможности независимую оценку влияния каждого фактора.

Разброс параметров внутренних компонентов электронных схем вносит неопределенность при оценке выходных параметров в отдельных точках пространства, поэтому уравнения связи выходных параметров с исследуемыми факторами носят статистический характер. Это позволяет использовать при построении модели математический аппарат регрессионного анализа. При этом уравнение связи каждого выходного параметра с исследуемыми факторами $z = f(X)$ можно представить как уравнение регрессии.

Регрессионный анализ базируется здесь на следующих предположениях: результаты наблюдений выходного параметра Z представляют собой независимые, нормально распределенные случайные величины; дисперсии выходного параметра $\sigma^2\{z_v (v=1,2,\dots,N)\}$, полученные в разных точках факторного пространства, равны друг другу (выборочные оценки $S^2\{z_v\}$ однородны). Это значит, что если производить многократные наблюдения за величиной Z при некотором наборе независимых переменных $x_{1l}, x_{2l}, \dots, x_{ml}$, то получим дисперсию $\sigma^2\{z_l\}$, которая не зависит от математического ожидания $M\{z\}$, т. е. не отличается от дисперсии $\sigma^2\{z_k\}$, полученной при подобных наблюдениях с любым другим набором переменных $x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{mk}$.

После проверки этих гипотез по результатам наблюдений строится уравнение регрессии, устанавливающее связь выходного параметра с факторами влияния. Уравнение регрессии в общем виде можно задать алгебраическим полиномом:

$$z(x) = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m b_{ij} x_i x_j; \quad i \leq j; \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, m, \quad (9)$$

где b_0 - постоянная; x_i - независимый фактор; b_i - коэффициент, учитывающий влияние i -го фактора; b_{ij} - коэффициент, учитывающий влияние взаимодействия факторов x_i и x_j ; $z(x)$ - описываемый параметр в пространстве факторов X .

Связь описываемого параметра с переменными факторами X устанавливается путем расчета коэффициентов уравнения регрессии b_0, b_i, b_{ij} . Для определения этих коэффициен-

тов используется метод наименьших квадратов, при котором сумма квадратов отклонений

$$S = \sum_{U=1}^N [z_U - \hat{z}(x)]^2,$$

наблюденных значений z_U от значений $\hat{z}(x)$, рассчитанных по уравнению регрессии, является минимальной.

Условия минимума определяются следующими выражениями:

$$\frac{\partial S}{\partial b_0} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial b_1} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial b_2} = 0.$$

Эти соотношения образуют систему так называемых нормальных уравнений, решение которой позволяет найти оценки коэффициентов уравнения регрессии. Заменяя в уравнении регрессии (9) члены второго порядка порядка линейными и добавив фиктивную переменную $x_0 = 1$, получим:

$$x_1^2 = x_{m+1}; \quad x_2^2 = x_{m+2}, \dots, \quad x_m^2 = x_{2m};$$

$$x_1 x_2 = x_{2m+1}; \quad x_1 x_3 = x_{2m+2}, \dots, \quad x_{m-1} x_m = x_p.$$

В новой системе обозначений искомый полином записывается как однородное линейное уравнение $\hat{z} = b_0 x_0 + b_1 x_1 + \dots + b_p x_p$. Соответствующая система нормальных уравнений имеет вид:

$$b_0(00) + b_1(01) + \dots + b_p(0p) = (0z);$$

$$b_0(10) + b_1(11) + \dots + b_p(1p) = (1z);$$

.....

$$b_0(p0) + b_1(p1) + \dots + b_p(pp) = (pz)$$

или в матричном виде

$$X^T X \cdot B = X^T Z, \tag{10}$$

где X, Z - матрицы наблюдений

$$X = \begin{vmatrix} x_{01} & x_{11} & \dots & x_{p1} \\ x_{02} & x_{12} & \dots & x_{p2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{0N} & x_{1N} & \dots & x_{pN} \end{vmatrix}, \quad Z = \begin{vmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_N \end{vmatrix};$$

$X^T X = \{(ij)\}$, $X^T Z = \{(iz)\}$ - матрицы, с помощью которых записываются нормальные уравнения. Элементы матриц определяются по формулам

$$(ij) = (ji) = \sum_{U=1}^N x_{iU} x_{jU} ;$$

$$(ii) = \sum_{U=1}^N x_{iU}^2 \quad (iz) = \sum_{U=1}^N x_{iU} z_U ,$$

B - матрица - столбец коэффициентов регрессии;

X^T - транспонированная матрица X .

Найдем матрицу $(X^T X)^{-1} = \{(c_{ij})\}$, обратную матрице $X^T X$.

Умножив слева обе части матричного уравнения (10), получим:

$$(X^T X)^{-1} (X^T X) B = B = (X^T X)^{-1} X^T Z . \quad (11)$$

Отсюда следует, что коэффициенты уравнения регрессии определяются выражением

$$b_i = \sum_{j=0}^p c_{ij} (jz) . \quad (12)$$

Из формулы (12) следует, что коэффициенты уравнения регрессии нельзя определить независимо друг от друга. Изменение порядка полинома или исключение из него хотя бы части членов приводит к изменению численных значений всех коэффициентов уравнения регрессии, так как при этом изменяются элементы обратной матрицы $(X^T X)^{-1}$ и число членов в сумме (12). Чтобы получить независимые оценки коэффициентов регрессии, исследуемые точки пространства выбираются так, чтобы привести матрицу коэффициентов нормальных уравнений $X^T X$ к диагональной. В этом случае коэффициенты уравнения регрессии определяются независимо друг от друга: $b_i = c_{ii} (iz)$, где $c_{ii} = 1/(ii)$. Для этого необходимо обеспечить равенство нулю скалярных произведений всех вектор-столбцов матрицы X :

$$\sum_{U=1}^N x_{iU} x_{jU} = 0 ; i \neq j ; i, j = 0, 1, 2, \dots, p.$$

Если для описания выходного параметра выбрана линейная модель, то план эксперимента, обеспечивающий независимую оценку коэффициентов уравнения, определяется точками факторного пространства, расположенными в вершинах гиперкуба. Такой план называется полным факторным экспериментом и включает в себя совокупность из $N = 2^n$ опытов, где n - число

факторов. Полный факторный эксперимент позволяет также получить независимые оценки коэффициентов неполного квадратного уравнения, которые можно привести к линейному путем замены произведений независимых переменных новыми переменными [8].

При аппроксимации результатов анализа квадратичной зависимостью план эксперимента образуется путем добавления к "ядру", представляющему полный факторный эксперимент, набора из $2n$ комбинаций, соответствующих точкам факторного пространства с координатами

$$\begin{pmatrix} \pm \alpha, 0, \dots, 0 \\ 0, \pm \alpha, \dots, 0 \\ \dots \dots \dots \\ 0, 0, \dots, \pm \alpha \end{pmatrix},$$

и одной комбинации для центральной точки пространства с координатами $(0, 0, \dots, 0)$. Значения α выбираются из условия ортогональности модели. Значения α следующие:

n	2	3	4	5
α	1,000	1,215	1,414	1,515

Если предельные значения факторов равны ± 1 , то в отношении квадратичных членов уравнения имеет место нарушение условия ортогональности. Это означает, что оценки коэффициентов b_0, b_{11}, b_{22} и т. д. определены совместно.

Принципы построения математической модели выходных параметров рассмотрим на примере переключательной схемы, выполняющей логические функции ИЛИ (выход 1), ИЛИ-НЕ (выход 2). На рис. 12, а приведена принципиальная электрическая схема узла, а на рис. 13 эквивалентная электрическая схема, используемая для описания схемы в программе анализа электронных схем ПА1. На эквивалентной схеме каждый транзистор представлен сокращенной эквивалентной схемой (см. рис. 12, б*).

Исходными данными для анализа электронной схемы явились: параметры транзисторов - $I_{T3} = 0,1 \text{ фА}$; $I_{TK} = 37 \text{ фА}$;

* Активные составляющие токов: через переходы транзистора учитываются автоматически соответствующим построением подпрограммы транзистора в ПА1.

$C_{БЭО} = 2 \text{ пФ}$; $C_{БК0} = 2,5 \text{ пФ}$; $m_{ТЭ} = 28 \text{ МВ}$; $m_{ТК} = 30 \text{ МВ}$; $\tau = 12 \text{ нс}$;
 $\tau_{И} = 40 \text{ нс}$; $B = 150$; $B_{И} = 0,4$; $r_{Б} = 100 \text{ Ом}$; $r_{К'} = 15 \text{ Ом}$;
 $R_{У.Э} = R_{У.К} = 1 \text{ МОм}$;

значения остальных параметров схемы - $C_1 = C_2 = C_3 = 5 \text{ пФ}$;
 $C_{Н} = 2 \text{ пФ}$; $R_1 = R_4 = 160 \text{ Ом}$; $R_2 = 630 \text{ Ом}$.

Указанные здесь параметры транзисторов соответствуют математической модели транзистора, описанной в работе [1].

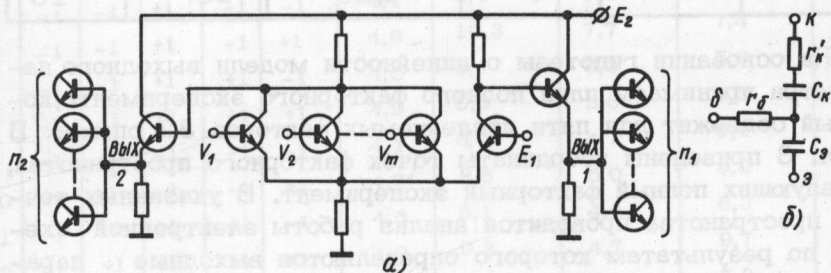


Рис. 12. Принципиальная схема (а) функционального узла и сокращенная схема (б) транзистора

Для многофакторного анализа в качестве независимых факторов используем: x_1 - коэффициент разветвления по выходу n ; x_2 - напряжение источника питания E_2 ; x_3 - коэффициент объединения по входу p ; x_4 - величина нагрузочной емкости $C_{Н}$; x_5 - длительность фронта нарастания (спада) входного сигнала.

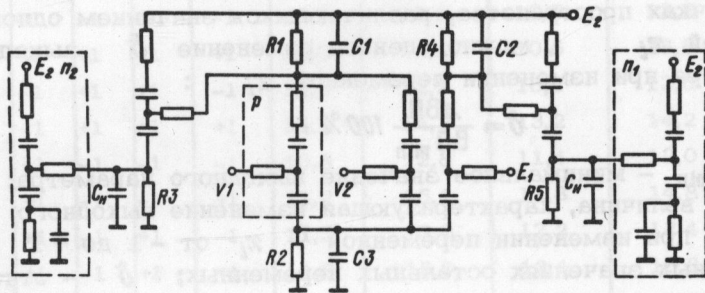


Рис. 13. Эквивалентная схема функционального узла

В табл. 2 приведены физические величины, установленные для верхнего (+1), нижнего (-1) и среднего уровней, по каждому фактору в отдельности.

Уровень	Варьируемый фактор				
	n	p	E_2, B	t_{ϕ}, HC	$C_H, пФ$
-1	1	1	3,75	3	5
0	4	3	5,00	9	10
+1	7	5	6,25	15	15

На основании гипотезы о линейности модели выходного параметра принимаем план полного факторного эксперимента, который содержит для пяти исследуемых факторов 32 опыта. В табл. 3 приведены координаты точек факторного пространства, образующих полный факторный эксперимент. В указанных точках пространства проводится анализ работы электронной схемы, по результатам которого определяются выходные параметры сигналов на выходах "ИЛИ", "ИЛИ-НЕ".

Если задачей анализа является сбор данных для статистической модели, то в процессе многофакторного анализа следует предусмотреть автоматическую перестройку параметров внутренних компонентов электронной схемы в соответствии с нормальным законом распределения.

Результаты анализа, полученные с помощью ЭВМ "М-222", приведены в правой части таблицы. В ней указаны задержки выходных сигналов относительно начальной точки нарастания (спада) входного сигнала. Сравнивая результаты анализа в двух точках пространства, различающихся значением одной переменной x_i , можно оценить изменение δ выходного параметра при изменении переменной x_i :

$$\delta = \frac{\Delta ВП}{ВП_{\min}} 100\%,$$

где $ВП_{\min}$ - минимальное значение выходного параметра; $\Delta ВП$ - величина, характеризующая изменение выходного параметра при изменении переменной x_i от -1 до +1 и неизменных значениях остальных переменных; δ - относительное изменение выходного параметра.

Множество таких оценок, полученных в различных областях исследуемого пространства при изменении одной и той же переменной x_i , позволяет судить о степени и устойчивости влияния переменной x_i на выходной параметр, характере связи переменной x_i с выходным параметром, доминирующих факторах влияния. Например, по результатам сравнения задержек t_3^{01} на выходе "ИЛИ" в точках

Таблица 3

№ опыта	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	Выход "ИЛИ"		Выход "ИЛИ-НЕ"	
						t ₃ ⁰¹	t ₃ ¹⁰	t ₃ ⁰¹	t ₃ ¹⁰
1	-1	-1	-1	-1	-1	3,8	4,9	4,5	4,3
2	-1	-1	-1	-1	+1	4,5	7,4	4,9	7,6
3	-1	-1	-1	+1	-1	4,4	4,6	4,3	4,6
4	-1	-1	-1	+1	+1	4,7	7,6	4,6	7,9
5	-1	-1	+1	-1	-1	4,1	8,1	7,1	4,4
6	-1	-1	+1	-1	+1	4,6	10,3	7,7	7,4
7	-1	-1	+1	+1	-1	4,5	5,1	5,3	5,0
8	-1	-1	+1	+1	+1	4,9	6,9	5,6	8,0
9	-1	+1	-1	-1	-1	4,1	6,1	4,7	6,0
10	-1	+1	-1	-1	+1	4,7	8,8	5,0	9,0
11	-1	+1	-1	+1	-1	4,5	6,1	4,4	6,3
12	-1	+1	-1	+1	+1	4,9	9,2	4,7	9,7
13	-1	+1	+1	-1	-1	4,3	8,6	7,1	5,8
14	-1	+1	+1	-1	-1	4,7	11,0	7,4	9,0
15	-1	+1	+1	+1	-1	4,6	6,4	5,4	6,3
16	-1	+1	+1	+1	+1	5,0	9,6	5,7	9,7
17	+1	-1	-1	-1	-1	10,5	12,0	11,2	11,2
18	+1	-1	-1	-1	+1	11,0	13,8	11,8	13,4
19	+1	-1	-1	+1	-1	11,3	12,2	12,0	11,6
20	+1	-1	-1	+1	+1	11,7	14,1	12,3	13,6
21	+1	-1	+1	-1	-1	10,7	12,5	10,5	12,2
22	+1	-1	+1	-1	+1	11,3	14,4	10,5	13,8
23	+1	-1	+1	+1	-1	11,3	12,2	13,1	12,6
24	+1	-1	+1	+1	+1	11,7	14,2	13,2	14,2
25	+1	+1	-1	-1	-1	10,8	12,8	11,4	12,0
26	+1	+1	-1	-1	+1	11,2	15,1	11,8	14,8
27	+1	+1	-1	+1	-1	11,5	13,0	12,2	12,4
28	+1	+1	-1	+1	+1	11,8	15,6	12,4	15,3
29	+1	+1	+1	-1	-1	11,0	13,3	10,5	12,7
30	+1	+1	+1	-1	+1	11,4	15,5	11,0	14,8
31	+1	+1	+1	+1	-1	11,5	13,0	13,1	13,2
32	+1	+1	+1	+1	+1	11,8	15,8	13,2	15,7

пространства 2-1, 4-3, 6-5, 8-7 и т. д. можно построить поле отклонений величины δ_3^{01} при изменении коэффициента нагрузки n . На рис. 14 показано рассеяние отклонений δ_3^0 для четырех факторов (x_1, x_2, x_3, x_4). Каждая величина $\delta_{3j}^{01}(x_i)$ характеризуется собственной частотой ее повторения ρ в реализованной серии опытов. При этом общее число ρ по каждой переменной x_i равно $N/2$, где N - число опытов.

Уровень значимых отклонений можно ориентировочно определить, считая априорно одинаковой степень влияния каждого фактора и их взаимодействий. Для линейной модели выходного параметра с пятью независимыми переменными число членов уравнения регрессии равно 16 (произведения $x_i x_j$

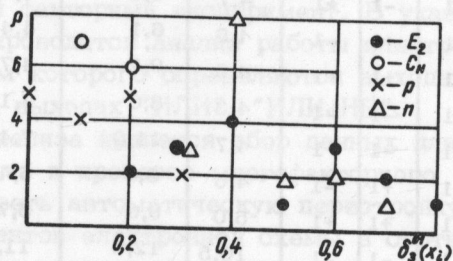


Рис. 14. Поле рассеяния отклонений $\delta_3^{01}(x_i)$ на выходе "ИЛИ"

рассматриваются так же как линейные члены). Тогда, задав допустимое отклонение выходного параметра от расчетной величины, можно приближенно оценить величину отклонения, обусловленную действием одного фактора (или взаимодействия факторов). Приняв полученную оценку за уровень значимых отклонений, можно проверить разброс фактических отклонений относительно этого уровня. В нашем примере подобный анализ позволяет сделать вывод о незначительном влиянии фактора x_3 . Что касается оценки влияния остальных факторов, то все они оказались значимы. При этом некоторые отклонения характеризуются большей устойчивостью (числом повторений), другие - меньшей. Это косвенно указывает на линейную зависимость описываемого параметра от переменной x_i в той области пространства, для которой устойчивость отклонений высока.

Если линейная модель не удовлетворяет в полной мере результатам анализа, то при расчете коэффициентов уравнения регрессии следует руководствоваться нелинейной моделью.

При этом исходное уравнение регрессии описывается полиномом второй степени, из которого исключаются некоторые члены (в нашем случае члены с переменной x_3). План эксперимента для построения нелинейной модели увеличивается по сравнению с полным факторным экспериментом в общем случае на $(2n+1)$ опытов, где n — число исследуемых факторов. При уменьшении числа членов уравнения регрессии можно построить сокращенный план — матрицу эксперимента (подробнее см. в работе [8]).

В результате расчета коэффициентов полиномов, описывающих выходные параметры схемы (см. рис. 12), были получены следующие уравнения:

$$\begin{aligned}
 t_3^{0i}(\text{или}) &= 8,00 + 3,38n + 0,09E_2 + 0,23c_H + 0,21t_\Phi - \\
 &\quad - 0,05n^2 + 0,006nE_2 + 0,06nc_H - 0,01nt_\Phi - \\
 &\quad - 0,02E_2c_H - 0,04c_Ht_\Phi - 0,05t_\Phi^2; \\
 t_3^{10}(\text{или}) &= 10,16 + 3,09n + 0,62E_2 + 0,41p - 0,27c_H + \\
 &\quad + 1,21t_\Phi + 0,04n^2 - 0,07nE_2 - 0,28np + \\
 &\quad + 0,33nc_H - 0,11nt_\Phi + 0,04E_2^2 - 0,02E_2p + 0,13E_2c_H + \\
 &\quad + 0,13E_2t_\Phi + 0,04p^2 - 0,37pc_H - 0,04pt_\Phi + \\
 &\quad + 0,39c_H^2 + 0,07c_Ht_\Phi + 0,14t_\Phi^2; \\
 t_3^{0i}(\text{или-HE}) &= 8,44 + 3,2n + 0,04E_2 + 0,42p + 0,2c_H + \\
 &\quad + 0,16t_\Phi + 0,25n^2 + 0,02nE_2 - 0,44np + \\
 &\quad + 0,66nc_H - 0,02nt_\Phi + 0,35E_2^2 - 0,02E_2p - \\
 &\quad - 0,006E_2t_\Phi - 0,3p^2 + 0,04pc_H - 0,02pt_\Phi - \\
 &\quad - 0,45c_H^2 - 0,04c_Ht_\Phi + 0,4t_\Phi^2; \\
 t_3^{10}(\text{или-HE}) &= 10,00 + 3,19n + 0,66E_2 + 0,24c_H + \\
 &\quad + 1,36t_\Phi - 0,003n^2 - 0,13nE_2 - 0,009nc_H - \\
 &\quad - 0,25nt_\Phi + 0,05E_2^2 + 0,04E_2c_H + 0,1E_2t_\Phi - \\
 &\quad - 0,003c_H^2 + 0,03c_Ht_\Phi + 0,1t_\Phi^2.
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Аналогичные уравнения могут быть получены и для других выходных параметров электронной схемы.

Погрешность отклонения результатов анализа от предсказанных по уравнению регрессии в экспериментальных точках пространства мала и лишь в отдельных случаях достигла 15%.

Проверка значимости членов уравнений выполняется известными методами регрессионного анализа. Используя их, можно исключить из уравнений статистически малозначимые члены. В работе [9] приведена программа, позволяющая выполнить расчет коэффициентов уравнения регрессии и их статистическую оценку.

После исключения малозначимых членов из уравнений (13) система уравнений приводится к виду

$$t_3^{01} \text{ (ИЛИ)} = 7,99 + 3,38n + 0,09E_2 + 0,23c_n + 0,21t_\phi + 0,06nc_n - 0,04c_n t_\phi - 0,09t_\phi^2 ;$$

$$t_3^{10} \text{ (ИЛИ)} = 10,22 + 3,09n + 0,62E_2 + 0,41p - 0,27c_n + 1,21t_\phi - 0,28np + 0,33nc_n - 0,37pc_n + 0,39c_n^2 ;$$

$$t_3^{01} \text{ (ИЛИ-НЕ)} = 8,65 + 3,2n + 0,42p + 0,2c_n - 0,44np + 0,66nc_n ;$$

$$t_3^{10} \text{ (ИЛИ-НЕ)} = 10,11 + 3,19n + 0,66E_2 + 0,24c_n + 1,36t_\phi - 0,13nE_2 - 0,25nt_\phi + 0,1E_2t_\phi$$

Оценка найденных уравнений регрессии производится известными методами регрессионного анализа. При этом подсчитываются коэффициенты множественной корреляции и проверяется их значимость по критерию Фишера. Подробные сведения о статистической оценке уравнений регрессии можно найти в работах [8, 9].

Алгоритмы машинного анализа переходных процессов в логических схемах

Из уравнений асинхронной модели схемы (6), (7) следует, что для вычисления текущих значений выходных переменных и переменных состояния необходимы данные о внутренних переменных в предшествующие моменты времени $(t-l)$, $(t-q)$, ..., $(t-r)$. Это приводит к необходимости организации множества массивов внутренних переменных Π , отображающих состояние схемы в предшествующие дискретные моменты времени $(t-1)$, $(t-2)$, ..., $(t-D)$

$$\Pi = \{ \Pi_{t-1}, \Pi_{t-2}, \Pi_{t-3}, \dots, \Pi_{t-D} \} .$$

Количество таких массивов определяется максимальным временем D , на которое отстают значения внутренних переменных, используемые при расчете текущих состояний элементов (узлов) схемы. Это время в свою очередь зависит от времени реак-

ции элементов на входные воздействия и выражается в единицах модельного времени.

Тогда для определения текущих значений входных переменных элемента необходимо по временному параметру каждой переменной выбрать соответствующий массив внутренних переменных и затем, используя таблицу соответствия входных связей элемента с массивом переменных, вызвать из массива нужные переменные. После этого процедура решения логических уравнений выполняется обычным образом.

При таком подходе решение полной системы уравнений производится для каждого момента времени: t , $t+1$, $t+2$. Очевидно, что такой способ моделирования требует значительных затрат машинного времени.

Наиболее приемлемым является способ, при котором для текущего момента времени организуется список тех элементов и узлов схемы, которые возбуждаются в данный момент времени. Это позволяет из всей совокупности элементов схемы отобрать ту часть, которая в данный момент является активной. Количество частных логических уравнений, решаемых для этих элементов, значительно меньше общего числа уравнений. Тогда работа моделирующей программы сводится к составлению для каждого момента времени списка узлов, возбуждаемых в одно и то же время, и последующему моделированию элементов этих списков.

Таким образом, в процессе моделирования должны быть решены следующие задачи: заполнение списков активными элементами, т. е. элементами, входные переменные которых изменяются в соответствующий момент времени; передача информации о вычисленных состояниях элементов на входы элементов других списков, обрабатываемых позже.

Рассмотрим подробнее решение этих задач. На основании данных об изменениях внешних сигналов перед началом моделирования составляется список элементов, соединенных с активными входами схемы. Затем из этого списка выбираются один за другим элементы, для которых производится решение частных логических уравнений (моделирование элементов). Если в результате моделирования состояние элемента не изменилось, то входные переменные управляемых элементов также останутся прежними. При изменении состояния прототипированного элемента информация об этом поступит на входы управляемых элементов лишь спустя некоторое время, равное задержке управляющего элемента l . Следовательно, управ-

ляемые элементы, возбуждаемые в момент времени $(t+l)$, должны быть занесены в список, формируемый для момента $(t+l)$.

В общем случае задержки моделируемых элементов находятся в пределах от $t_{3 \min}$ до $t_{3 \max}$. Это приводит к тому, что управляемые ими элементы окажутся в разных списках. Таким образом, параллельно с моделированием текущего списка производится формирование новых списков, обрабатываемых в последующие моменты времени. С наступлением момента $(t+l)$ входные переменные указанных управляемых элементов изменяются так, что между значениями выходных переменных управляющего элемента и входных переменных управляемых элементов устанавливается полное соответствие. После этого возобновляется процедура моделирования.

Из предыдущего обсуждения следует, что каждый список элементов связывается с определенным интервалом модельного времени, обозначаемым положительным целым числом: $T=0, 1, 2, 3, \dots, t, t+1, \dots, t+D, t+D+1$. Вместе с тем для целей моделирования достаточно хранить в памяти машины лишь списки, относящиеся к интервалу времени длиной $(D+1)$. При этом обеспечивается преемственность между внутренними переменными, рассчитанными по уравнениям (7), и переменными, являющимися аргументами уравнений (6), (7). Следствием этого является то, что на месте списка, обработанного в момент времени t , можно формировать новый список элементов для момента времени $(t+D+1)$. Таким образом, количество списков, формируемых в памяти машины, остается неизменным, равным $(D+1)$, но принадлежность их к временной шкале определяется ходом модельного времени. Это позволяет организовать адресацию списков по циклически изменяющемуся параметру $T_{\text{ц}}$, принимающему последовательно значения: $T_{\text{ц}} = 0, 1, 2, 3, \dots, D, 0, 1, \dots, D, 0, 1, \dots$. Тем самым процедура построения списков и собственно моделирования становится итерационной. Модельное время T при этом изменяется синхронно с циклическим $T_{\text{ц}}$.

Моделирование продолжается до тех пор, пока на отрезке времени, равном D , имеются списки возбуждаемых элементов. Отсутствие их свидетельствует о постоянстве значений внутренних переменных и, следовательно, об устойчивости состояния схемы.

С учетом сказанного алгоритм асинхронного моделирования может быть представлен как итерация следующих действий:

- 1) $T = T + 1$;

2) если модельное время T превышает допустимое для перехода схемы из одного состояния в другое, то моделирование может быть прекращено, иначе выполняется переход к пункту 3);

3) $T_{\Pi} = T$ по модулю $(D + 1)$;

4) проверяется содержимое списка $C(T_{\Pi})$. При наличии элементов в списке производится их обработка в соответствии с процедурой "ОБРАБОТКА СПИСКА" и затем переход к п. 1. В противном случае вырабатывается признак отсутствия изменений в массиве переменных для текущего момента времени, запоминаемый в накопителе θ ;

5) проверяется содержимое накопителя θ . Если накопленная сумма признаков равна D , то моделирование текущего такта прекращается и организуется вызов входных переменных для моделирования следующего такта контрольного теста, иначе выполняется переход к п. 1.

Процедура "ОБРАБОТКА СПИСКА" включает следующие действия:

1) выбирается первый элемент списка ($j=1$);

2) производится коррекция входных переменных j -го элемента;

3) вычисляется логическая функция j -го элемента;

4) новое значение выходной переменной элемента сравнивается с предыдущим значением. Если состояние элемента не изменилось, то выполняется переход к п. 7;

5) при изменении состояния j -го элемента вычисляется время T_p появления значения выходной переменной на входах управляемых элементов $T_p = (T + D_j)$ по модулю $(D + 1)$;

6) управляемые элементы включаются в список $C(T_p)$;

7) $j = j + 1$;

8) если j не превышает длину текущего списка элементов, то выполняется переход к п. 2, иначе обработка списка завершается гашением накопителя θ

Блок-схемы алгоритмов, поясняющие их работу, приведены на рис. 15, 16. По результатам моделирования для каждого момента времени формируется вектор состояния модели, совокупность таких векторов используется для построения временных диаграмм.

Эффективность алгоритмов асинхронного моделирования можно продемонстрировать на примере. При моделировании схемы (см. рис. 5) с использованием моделей элементов первого типа (см. с. 28) на отрезке времени из 50 тактов было смоделировано 890 элементов. Для сравнения была произведена оценка алгоритма для логического анализа методом событийно-

го моделирования. На том же отрезке времени количество про-
 моделированных элементов оказалось равным 2815, что втрое
 превышает первый результат. Таким образом, алгоритмы асинх-
 ронного моделирования оказались более эффективными и, сле-
 довательно, лучше приспособленными для временного анализа
 последовательных схем.

Ж Ж Ж

В заключение необходимо отметить, что методы анализа,
 рассмотренные в работе, не являются единственно возможными

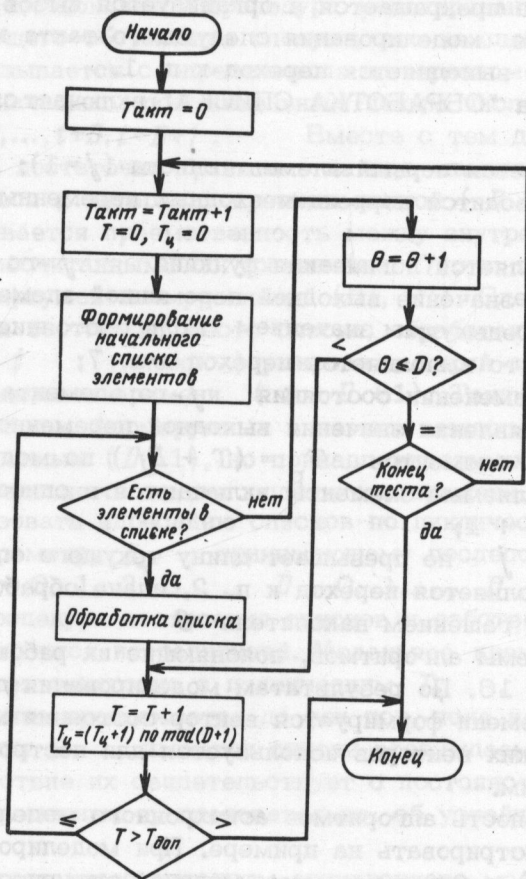


Рис. 15. Блок-схема алгоритма анализа переходного про-
 цесса

методами исследования переключательных схем. Следует упомянуть, по крайней мере, еще два способа, которые применимы для целей анализа.

Первый из них характеризуется использованием троичных функций при вычислении переменных состояния элементов. При этом значения входных и выходных переменных определяются на множестве $\{0, 1/2, 1\}$, где значение $1/2$ используется для представления переменных во время переходного процесса. Троичное моделирование, используемое для обнаружения ложных срабатываний, позволяет сократить время анализа, но не дает возможности определить параметры ложных сигналов. Описание метода троичного моделирования и примеры моделирования логических схем можно найти в работе [6].

Второй способ основан на представлении математических моделей элементов в виде системы дифференциальных уравнений

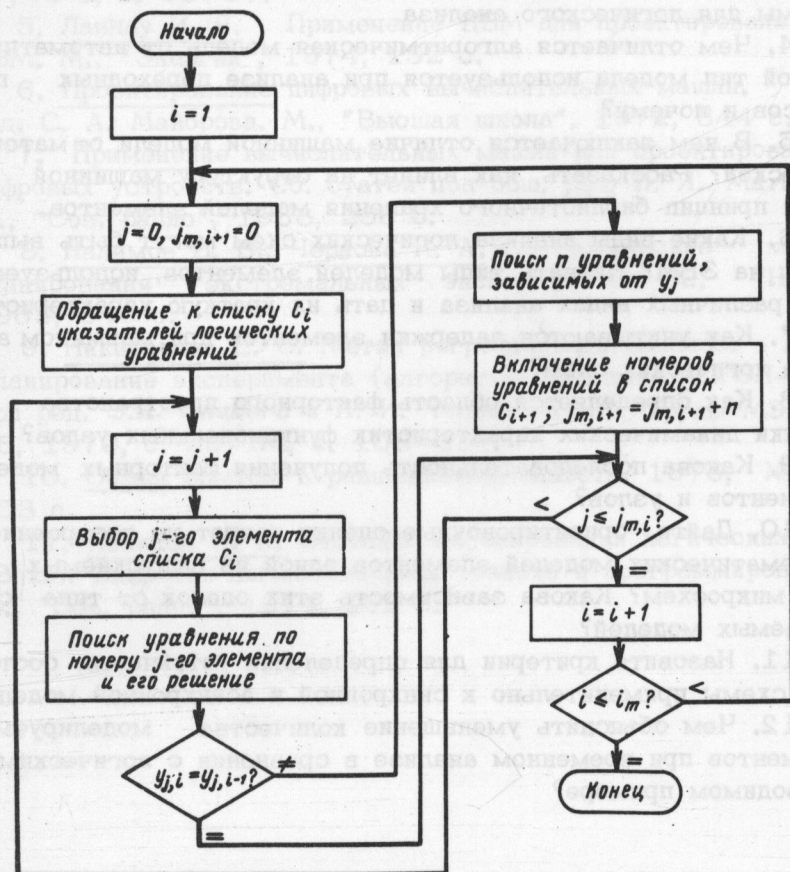


Рис. 16. Блок-схема алгоритма "ОБРАБОТКА СПИСКА"

в форме, используемой при машинном анализе электронных схем. При этом с целью уменьшения сложности исследуемой модели схемы в качестве математических моделей элементов используются их упрощенные модели. Сведения о структуре этих моделей читатель может получить в работе [4].

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Перечислить основные задачи, решаемые на этапе анализа функциональных и принципиальных электрических схем.
2. Чем отличается функционирование комбинационной схемы и цифрового автомата?
3. Составить алгоритм моделирования последовательностной схемы для логического анализа.
4. Чем отличается алгоритмическая модель от автоматной? Какой тип модели используется при анализе переходных процессов и почему?
5. В чем заключается отличие машинной модели от математической? Рассказать, как влияет на структуру машинной модели принцип библиотечного хранения моделей элементов.
6. Какие виды анализа логических схем могут быть выполнены на ЭВМ? Назвать типы моделей элементов, используемых при различных видах анализа и дать их краткую характеристику.
7. Как учитываются задержки элементов при машинном анализе логических схем?
8. Как определяется область факторного пространства для оценки динамических характеристик функциональных узлов?
9. Какова последовательность получения факторных моделей элементов и узлов?
10. Дайте ориентировочные оценки затрат на построение математических моделей элементов одной из выпускаемых серий микросхем? Какова зависимость этих оценок от типа создаваемых моделей?
11. Назовите критерии для определения устойчивых состояний схемы применительно к синхронной и асинхронной модели.
12. Чем объяснить уменьшение количества моделируемых элементов при временном анализе в сравнении с логическим в приводимом примере?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов Б. В., Белов Б. И., Норенков И. П. Машинный расчет элементов ЭВМ. М., "Высшая школа", 1976, 336 с.
2. Бабаян Б. А., Плоткин А. Л. Комплексное мелкоблочное моделирование проектируемых вычислительных машин. М., ИТМ и ВТ, 1972, 23 с.
3. Белов Б. И., Хартов В. Я. Событийное моделирование процессов в переключательных схемах. Материалы семинара "Машинные методы проектирования электронных схем". М., МДНТП, 1975, с. 110-113.
4. Гринбаум И., Миллер В. Модели цифровых ИС для машинного проектирования. "Электроника" (русс. пер.), М., "Мир", 1973, т. 46, № 25, с. 46-52; № 26, с. 63-69; 1974, т. 47, № 5, с. 55-59.
5. Ландау И. Я. Применение ЦВМ для проектирования ЦВМ. М., "Энергия", 1974, 152 с.
6. Проектирование цифровых вычислительных машин. Под ред. С. А. Майорова. М., "Высшая школа", 1972, 344 с.
7. Применение вычислительных машин для проектирования цифровых устройств. Сб. статей под общ. ред. Н. Я. Матюхина. М., "Сов. радио", 1968, 256 с.
8. Налимов В. В., Чернова Н. А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М., "Наука", 1965, 340 с.
9. Никифорова Е. С. Метод регрессивного анализа. - В сб.: Планирование эксперимента (алгоритмы на языке АЛГОЛ-60). Под ред. Э.К. Лецкого и Н. И. Челнокова. М., Труды МЭИ. вып. 76, 1970, с. 23-34, с. 108-117.
10. Обмен опытом в радиопромышленности. 1975, № 6, 158 с.
11. Поляков А. К. Системы моделирования логических схем. - В кн.: Цифровая вычислительная техника и программирование. М., "Сов. радио", 1974, 192 с.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	3
I. Основные сведения о структуре цифровых устройств	5
II. Анализ функционально-логических схем	8
Математические модели и алгоритмы для логического анализа схем	9
Способы отображения функционально-логических схем на входных языках и в ЦВМ	17
III. Методы машинного анализа переходных процессов в последовательностных схемах	25
Математические модели для анализа переходных процессов в схемах	25
Методы построения математических моделей элементов и функциональных узлов	30
Алгоритмы машинного анализа переходных процессов в логических схемах	44
Вопросы для самопроверки	50
Список литературы	51

2530

Вячеслав Яковлевич ХАРТОВ

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ПРИБОРОВ И УСТРОЙСТВ**

Редактор Л. И. Фрид
Технический редактор И. В. Пушина
Корректор Л. А. Ягупьева

Подписано в печать 10.5.78 г.	Т-09616
Формат 60x90 1/16	Бумага офсетная № 2
Уч.-изд. л. 3,25	Усл. печ. л. 3,25
Тираж 3000 экз.	Зак. 2580 Бесплатно

Издательство "Машиностроение", 107885,
Москва Б-78 1-й Басманный пер., 3

Московская типография № 9 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.

Москва, Волочаевская ул., д. 40.

Бесплатно