

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 621.372.011.072 : 681.3.06

В. В. ЕФИМЕНКО, А. С. ЗАГОРУЙКО, Ю. А. СТУКАЛИН
(Новосибирск)

О РЕАЛИЗАЦИИ РЕЛАКСАЦИОННОГО МЕТОДА СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА МДН БИС НА ЕС ЭВМ

В комплексах программ схемотехнического анализа динамика анализируемых схем обычно представляется «жесткой» системой обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка (ОДУ), не разрешенных относительно производных. Порядок системы уравнений при модифицированном узловом методе примерно равен количеству узлов схемы. Общепринято использовать для решения подобных ОДУ неявный метод интегрирования с переменным шагом и порядком, который требует на каждом временном шаге решения порождаемой системы нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ) того же порядка. Последнее связано с решением системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

Рост степени интеграции в микроэлектронике вызывает значительное увеличение размеров анализируемых схем и, следовательно, размерности решаемых систем уравнений. Трудности использования комплексов программ схемотехнического анализа при проектировании БИС связаны с тем, что время анализа и требуемая оперативная память ЭВМ растут быстрее, чем размерность схем. Машинное время анализа схемы состоит из двух основных компонент: 1) времени формирования вектора правой части и матрицы коэффициентов для систем линейных уравнений по библиотечным моделям элементов и топологии схемы и 2) времени решения СЛАУ. Большая часть требуемой памяти предназначена для хранения матрицы коэффициентов СЛАУ и результатов анализа схемы. Первая временная компонента определяется точностью представления вольт-амперных характеристик элементов схемы библиотечными моделями комплекса программ схемотехнического анализа, поэтому предпринимаемые в последнее время попытки повысить эффективность программных комплексов анализа БИС и линеаризовать зависимость машинного времени и требуемой памяти от размерности схем связаны со второй временной компонентой, т. е. с решением СЛАУ, СНАУ, ОДУ.

Большие интегральные схемы отличаются двумя важными особенностями — каждый узел схемы связан с малым числом других узлов схемы (свойство разреженности) и большая доля узловых потенциалов значительную часть времени анализа находится в неизменном состоянии (свойство латентности). Эти особенности БИС накладывают специфические ограничения на системы уравнений.

Первоначально для повышения эффективности программ анализа было использовано свойство разреженности при решении СЛАУ. Предполагается, что вся схема в целом анализируется в каждой временной

точке, СНАУ решается методом Ньютона, СЛАУ имеет размерность, равную размерности ОДУ, и матрица коэффициентов СЛАУ содержит большое количество нулевых элементов. Анализ затрат машинного времени и машинной памяти для различных методов учета разреженности при решении СЛАУ в комплексах программ схемотехнического анализа приведен в [1, 2].

Следующий шаг основан на использовании многоуровневого ньютоновского алгоритма для решения СНАУ. Исходная схема (соответственно СНАУ) разбивается на подсхемы (подсистемы СНАУ). Решая эти и некоторые вспомогательные СНАУ, описывающие взаимосвязь подсхем, находим решение для исходной СНАУ. Об особенностях реализации многоуровневого ньютоновского алгоритма и его эффективности при машинном анализе электронных схем сообщается в [3].

В последнее время получило распространение направление повышения эффективности программных комплексов анализа БИС, связанное с учетом специфики ОДУ, которые описывают динамику определенных классов схем. К этому направлению относятся релаксационный метод анализа, ориентированный на МДП БИС. Он заключается в разбиении большой исходной БИС на упорядоченное множество малых подсхем, последовательном анализе этих подсхем и получении результатов расчета переходного процесса в БИС по результатам анализа всех ее подсхем. В данной работе сообщается об особенностях программной реализации этого метода на ЕС ЭВМ, приводятся результаты численных экспериментов, делаются выводы об области применения и эффективности созданного комплекса программ.

При модифицированном методе узловых потенциалов все узловые напряжения измеряются относительно некоторого опорного узла («земли»), потенциал которого считается равным нулю. Зависимыми узлами схемы являются связанные непосредственно с источником напряжения точки соединения ее элементов (естественно, «земля» — зависимый узел). Независимые узлы — все остальные узлы схемы. В другой классификации независимые узлы — это внутренние узлы схемы, зависимые — внешние.

Для современных программ анализа БИС характерно использование понятия подсхем в основном как средства иерархического описания схемы в виде соединения многополюсников, представляющих отдельные ее части (подсхемы) и в меньшей степени как способа расчета больших схем по частям.

Под разбиением исходной схемы на подсхемы подразумевается установление соответствия между узлами всей схемы и подсхемами, на которые она разбивается.

Из всего многообразия способов разбиения множества независимых узлов схемы на подмножества узлов подсхем выберем два, для которых выполняются следующие ограничения:

1. Подмножества элементов схем, входящих в любую подсхему, не пересекаются, и подмножество узлов любой подсхемы содержит хотя бы один узел, не входящий в другую подсхему. Такое разбиение назовем разбиением без перекрытия.

2. Для подсхем, подмножества узлов которых пересекаются, необходимо и пересечение подмножеств элементов этих подсхем. Назовем его разбиением с перекрытием.

Разбиение без перекрытия используется при иерархическом описании схем, а также при их расчете методами, подобными [3]. Причем узлы, принадлежащие к упомянутой выше непересекающейся части узлов подсхемы, называют внутренними и независимыми узлами подсхемы; узлы, принадлежащие к подмножеству пересечений подмножества узлов подсхемы с подмножествами узлов других подсхем, называют пограничными внешними узлами подсхемы. Пограничные узлы на одном этапе расчета рассматриваются как зависимые, на другом этапе — как

независимые. Для такого разбиения множество всех внутренних узлов подсхем и множество всех пограничных узлов не пересекаются.

Разбиение с перекрытием используется при расчете релаксационным методом [4]. В этом случае для каждой подсхемы определяют подмножества независимых и зависимых узлов подсхемы. Элементы, общие для двух или более подсхем, называют пограничными. Узлы, определяющие пограничные элементы, в смысле зависимости (независимости) подобны пограничным узлам при разбиении без перекрытия. Статус зависимости этих узлов может существенно меняться при переходе от расчета данной подсхемы к расчету другой смежной схемы. Он зависит еще от количества пограничных элементов между этими подсхемами. Например, в простейшем случае наличия между подсхемами одного пограничного двухполюсника из двух узлов, определяющих этот элемент, каждый узел будет иметь противоположное понятие при рассмотрении двух подсхем с этим пограничным элементом.

Когда число пограничных элементов между двумя подсхемами значительно (т. е. глубина перекрытия подсхем большая), возникают коллизии в определении статуса зависимости узлов, описывающих пограничные элементы. Некоторые из них приводят к ухудшению сходимости релаксационного метода для линейных и биполярных схем [5].

Очевидно, что разбиение с перекрытием, которое требуется для функционирования релаксационного метода анализа, является неудобным для пользователя методом представления схем. Поэтому нами используется более привычный метод представления схем путем разбиения их на подсхемы без перекрытия, а необходимое перекрытие подсхем реализуется программно.

Оно осуществляется на основе списка узлов для каждой подсхемы и списка элементов всей схемы с указанием узлов их подсоединений. Выделяются элементы схемы, принадлежащие данной подсхеме, т. е. те элементы, хотя бы один узел которых относится к узлам данной подсхемы. Множество элементов подсхемы разбивается на два непересекающихся множества: множество внутренних элементов подсхемы, состоящее из элементов, все узлы которых принадлежат узлам данной подсхемы, множество пограничных элементов, образуемое остальными элементами подсхемы. Узлы пограничных элементов, не входящие в предварительно определенные узлы подсхемы, образуют внешние узлы построенной таким образом новой подсхемы с перекрытием.

Если считать все узлы вновь сформированной подсхемы предварительно заданными и снова повторить процесс выделения пограничных элементов, то мы тем самым сформируем новую подсхему с большим перекрытием. Поскольку процесс осуществляется программно, то это означает, что глубину перекрытия можно менять в процессе анализа. Увеличение глубины перекрытия полезно при анализе биполярных схем [6].

По библиотечным моделям элементов можно сформировать ОДУ, СНАУ, СЛАУ для каждой подсхемы с перекрытием. Независимыми узлами подсхемы (независимыми переменными систем уравнений) будут те узлы, которые были отнесены к данной подсхеме при ее задании. Все внешние узлы подсхемы соответствуют зависимым переменным.

Разбиение анализируемой схемы на подсхемы реализовано в комплексе программ схемотехнического анализа БИС на основе релаксационного метода (КСАБРМ) в двух вариантах.

В первом варианте задается соответствие между узлами схемы и номерами подсхем, на которые она разбивается, и порядок анализа подсхем, определяемый номером подсхемы.

Во втором варианте описание исходной схемы реализуется через логические подсхемы из библиотеки элементов КСАБРМ, которые, в свою очередь, могут содержать логические подсхемы из этой же библиотеки. По данной информации с использованием понятий входа и выхода логического элемента определяется порядок анализа подсхем.

По аналоговым моделям логических элементов из библиотеки КСАБРМ формируется аналоговое описание переходной схемы, т. е. информации первого варианта.

В обоих вариантах анализируемая схема задается в стандарте программного комплекса МДС-84 [7]. Выявление внутренних и пограничных элементов для каждой подсхемы, формирование описания схемы через подсхемы, на которые она разбита, производится программами редактирования КСАБРМ.

Для удобства дальнейшего изложения определим некоторые понятия. Вычисление независимых переменных подсхемы при заданных значениях ее внешних (зависимых) переменных назовем анализом подсхемы. Согласно алгоритму релаксационного метода интервал времени, в течение которого необходимо анализировать данную схему, разбивается на подынтервалы релаксации (ПР). Определим релаксационную итерацию (РИ) как однократный анализ всех подсхем в заданном порядке на ПР. Анализ всех подсхем на ПР будет закончен, если для каждой подсхемы отличие результатов для последовательных РИ станет меньше установленной меры сходимости, т. е. отличие кривых решения на интервале ПР для последовательности итераций станет меньше заданного порога.

В предположении, что возбуждение в схеме задается кусочно-линейными источниками напряжения, в КСАБРМ ПР определяется как временной подынтервал, на котором производные по времени от источников возбуждения остаются постоянными.

Подынтервал анализа подсхемы на первой РИ совпадает с ПР для всех подсхем. На последующих РИ он убывает и определяется для каждой подсхемы как объединение временных подынтервалов внутри ПР, на которых кривые входных воздействий на подсхему от других подсхем и независимых переменных подсхемы при предыдущих РИ отличались более, чем допускал критерий сходимости РИ. Если длина подынтервала анализа подсхемы на текущей РИ уменьшается до нуля, то, естественно, анализ подсхемы на ПР считается завершенным. Для анализа схемы необходимо выполнить РИ на всех ПР.

Формирование начальных условий и интегрирование ОДУ при анализе подсхем проводятся подобно традиционным комплексам программ анализа [7]. Узловые потенциалы внешних узлов подсхем аппроксимируются по значениям, которые получены при анализе той подсхемы, где они являются независимыми узловыми потенциалами. Значения переменных в последних временных точках ПР используются для вычисления начальных значений переменных на следующем временном ПР.

Анализ подсхем связан с решением ОДУ, СНАУ, СЛАУ. Для решения СЛАУ реализован метод Гаусса. В отличие от МДС-84 при решении СЛАУ разреженность учитывается в варианте проверок, что связано с малыми размерностями СЛАУ для подсхем [1]. Для решения СНАУ использован алгоритм Ньютона — Рафсона.

Метод решения ОДУ для подсхем в КСАБРМ невязный с переменным шагом, как и в МДС-84. Изменения связаны с определением интервала интегрирования и начального шага.

Начальный шаг интегрирования схемы задается по ее РС-характеристике и меньше начального шага для любой из подсхем. Завышение начального шага при использованном методе интегрирования приводит к потере точности анализа, занижение — к дополнительным временным шагам интегрирования, т. е. увеличению времени анализа. Известно, что для сохранения устойчивости процесса интегрирования в комплексах программ анализа схем реализуется эмпирическое ограничение увеличения шага не более четырехкратного для последовательных временных точек. На основании проведенных численных экспериментов для МДП БИС реализована процедура выбора в качестве начального шага интегрирования для подсхемы на текущей РИ величины, учитывающей характер учетверения начального шага в данной подсхеме на пред-

Таблица 1

Комплекс анализа	Количество подсем в схеме (кол-во инверторов в подсхеме × кол-во подсем)				
	18 3 × 12 + 1 × 6	15 4 × 15	12 4 × 6 + 6 × 6	10 6 × 10	6 10 × 6
	Время анализа на ЕС-1045, с				
КСАБРМ-0	252	227	224	225	249
КСАБРМ-Д	340	335	305	314	318
МДС-84-И	759				
МДС-84-Г	365				

Таблица 2

Комплекс программ анализа переходных процессов	Количество инверторов в схеме		
	60	120	150
	Время анализа, мин		
МДС-84-Г	6,08	25,48	60,67
МДС-84-И	12,65	79,38	262,73
КСАБРМ-0	3,76	8,43	12,9
КСАБРМ-Д	5,23	11,17	17,22
ДНИ	10,58	36,42	76,44

дущей РИ в непрерывной последовательности временных точек с четырехкратным увеличением шага.

Анализ эффективности КСАБРМ проводился на МДЦ-схемах, состоящих из цепочек последовательно соединенных инверторов. Они различаются только количеством инверторов в схемах и подсхемах, не различаясь в характере обратных связей.

В табл. 1 приведено машинное время расчета различными программными комплексами переходного процесса схемы, состоящей из 60 последовательно соединенных инверторов при воздействии на нее импульсом, имеющим трапециевидную форму с крутыми фронтами. Каждый инвертор состоит из двух транзисторов. Вся схема из 120 транзисторов была разбита на 18, 15, 12, 10, 6 подсем. Количество инверторов в подсхеме определяется в табл. 1 числом, которое стоит перед знаком ×, после знака × приведено число, равное количеству таких подсем, знак + показывает, что схема разбита на две группы подсем: описание первой находится перед знаком +, второй — после. Сравнению подлежали данные расчета четырьмя комплексами программ: КСАБРМ-Д — вариант КСАБРМ с записью результатов анализа подсем на дисковую память, КСАБРМ-0 — то же, но весь обмен данными идет только через оперативную память, МДС-84-И — вариант МДС-84, использующий для решения разреженных СЛАУ алгоритм косвенной индексации, МДС-84-Г — с генерацией таблиц индексов и с интерпретатором на Ассемблере программы решения СЛАУ для этой схемы.

Как видно из табл. 1, для КСАБРМ зависимость машинного времени анализа схемы от размеров подсем имеет слабо выраженный минимум. В подсхему выгодно включать от 4 до 6 инверторов, при этом получается примерно трехкратная экономия времени по сравнению с МДС-84-И. Для комплекса КСАБРМ-Д экономия времени меньше, но размер анализируемой схемы для него ограничен практически только объемом внешней (дисковой) памяти. С увеличением размера схем относительный выигрыш в затратах машинного времени на анализ схем комплексами КСАБРМ-0 и КСАБРМ-Д растет по сравнению с пакетом МДС-84. Этот факт подтверждается в табл. 2, где приведены данные затрат машинного времени для расчета переходного процесса схем из 60, 120, 180 инверторов, разбитых соответственно на 10, 20, 30 подсем. Размер каждой подсхемы (6 инверторов) по данным табл. 1 близок к оптимальному.

В табл. 2 под именем ДНИ обозначен комплекс программ анализа схем с использованием двухуровневого ньютоновского алгоритма для решения СНАУ [3].

При проведении численных экспериментов по выявлению свойств КСАБРМ, кроме вышеприведенных характеристик эффективности его

использования, выявлены и некоторые качественные оценки, в частности, связанные со способами разбиения схемы на подсхемы и очередностью анализа подсхем. В зависимости от разбиения варьируется количество пограничных элементов подсхем, которые являются как бы дополнительными элементами схемы. Их появление можно отнести к недостаткам релаксационного метода. Уменьшение количества пограничных элементов за счет увеличения размеров подсхем малоэффективно в связи с возникновением разреженности в СЛАУ для подсхем. Более приемлемо разделять схему таким образом, чтобы узлы, относящиеся к разным подсхемам, были связаны минимальным количеством элементов.

Крайне желательно, чтобы между подсхемами была минимальная связь по току, оптимальная связь подсхем — управление, например, через затвор транзистора. Иногда в связи с этим эффективнее, особенно для схем с биполярными элементами, пойти на увеличение глубины перекрытия подсхем. Хотя возрастание числа пограничных элементов и числа независимых переменных в подсхемах приводит к увеличению затрат машинного времени и памяти для анализа подсхем, но за счет ускорения сходимости РИ (уменьшения количества РИ) при анализе биполярных и линейных схем отмечается рост эффективности комплексов программ анализа БИС. Аналогичный результат отмечен в [5].

Время анализа при помощи КСАБРМ существенно зависит от наличия цепей обратных связей в схеме. В КСАБРМ последовательность анализируемых подсхем в РИ задается до начала анализа схемы пользователем или программно. При анализе количество итераций может определяться какой-нибудь группой подсхем, которые образуют цепь обратной связи. Желательно объединить эти подсхемы в одну и тем самым избавиться от обратной связи, так как она внутри подсхемы не влияет на скорость сходимости релаксационного итеративного процесса. Разумным представляется и введение внутреннего (относительно основного релаксационного цикла) цикла итераций по каждой последовательности подсхем, образующих цепь обратной связи. Это позволит уменьшить количество релаксационных итераций и избежать анализа подсхем, чьи входы являются выходами подсхем, образующих цепь обратной связи. Перспективность этого направления совершенствования релаксационного метода для решения ОДУ подтверждается в [8]. Дальнейшие исследования, по-видимому, должны быть связаны с получением условий эффективного применения дополнительного итеративного цикла.

Суммируя вышесказанное, можно отметить, что использование релаксационного метода решения ОДУ в программном комплексе схемотехнического анализа БИС (КСАБРМ) определило его эффективность по затратам машинного времени и оперативной памяти по сравнению с традиционными методами на группе МДП-схем. Выявлены особенности схем, существенно влияющие на эффективность КСАБРМ, указаны возможные направления устранения нежелательных явлений, приводящих к понижению эффективности программного комплекса. Получены предварительные результаты по использованию КСАБРМ для анализа схем с биполярными элементами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефименко В. В., Загоруйко А. С., Стукалин Ю. А. Об эффективности учета разреженности матриц при анализе схем на ЭВМ // Автометрия.— 1978.— № 4.
2. Стукалин Ю. А. Использование комбинированного метода решения линейных алгебраических уравнений при анализе схем на ЭВМ // Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ: Тез. конф.— Новосибирск: ИАП СО АН СССР, 1979.
3. Ефименко В. В., Стукалин Ю. А. Использование двухуровневого ньютоновского алгоритма при машинном анализе электронных схем // Автометрия.— 1986.— № 1.
4. Lelarasmee E., Ruehli A. E., Sangiovanni-Vincentelli A. The waveform relaxation

- method for time domain analysis of large-scale integrated circuits // *IEEE Trans. on CAD of IC and Syst.*— 1982.— 1, N 3.— P. 131.
5. Mokari-Bolhassan M. E., Smart D., Trick T. N. A new robust relaxation technique for VLSI circuit simulation // *Digest of Technical Papers of IEEE Inter. Conf. on CAD, ICCAD-85*. Nov. 18—21, Santa Clara, Calif.— Washington: IEEE Computer Society Press, 1985.— P. 26.
 6. Marong G., Sangiovanni-Vincentelli A. Waveform relaxation and dynamic partitioning for the transient simulation of large-scale bipolar circuits // *Ibid.*— P. 32.
 7. Безносков Г. П., Ефименко В. В., Загоруйко А. С., Стукалин Ю. А. Пакет программ

УДК 62.072 : 681.3

В. С. ЛОПАТИЦ, И. Е. МЕДВЕДКОВА, В. Е. МЕЖОВ
(Воронеж)

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ПАКЕТА ИЕРАРХИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИАМ

Унифицированные интерактивные комплексы автоматизации проектирования изделий электронной и вычислительной техники типа «Кулон-4» позволяют осуществлять разработку схем различной сложности. Такие системы должны включать пакеты прикладных программ автоматизации всех этапов проектирования.

Программы поддержки функционально-логического, схемотехнического и топологического проектирования для комплексов этого класса уже разработаны [1, 2]. В настоящее время созданы лингвистические средства (входной язык) и пакет программ иерархического алгоритмического моделирования (ПРИАМ), который осуществляет поведенческое моделирование вычислительных систем.

Характерной чертой разработанного входного языка является возможность **иерархического** описания проекта, т. е. для моделирования проекта вычислительной системы на любом уровне абстракции (поведенческом, регистровом, логическом) используется единый метод ее описания.

Определим основные понятия, используемые при описании проекта. Проект вычислительной системы представляется как совокупность «черных ящиков», называемых **компонентами**, соединенных между собой линиями связи (в дальнейшем они будут называться **линиями**). Описание поведения «черного ящика» называется **моделью**.

Для моделирования проекта системы требуется язык, который давал бы возможность задавать: структуру проекта в целом; модели, т. е. поведение компонентов проекта; управление процессом моделирования.

В пакете ПРИАМ описание структуры проекта и алгоритма функционирования компонентов, из которых он состоит, разделено. При этом преследовались следующие цели:

- достижение большей наглядности, что сокращает затраты на подготовку исходной информации и внесение изменений;
- обеспечение возможности раздельной трансляции описания структуры и поведения, что даст значительный выигрыш как на этапе трансляции в случае внесения изменений в исходную информацию, так и при последующей программной обработке данных;
- раздельное описание структуры, позволяющее проводить автома-

© 1990 Лопатиц В. С., Медведкова И. Е., Межов В. Е.