

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ФОРМИРОВАНИЯ МАКРОМОДЕЛЕЙ ФРАГМЕНТОВ БОЛЬШИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

В. П. Ватагин, С. Г. Русаков

Обсуждаются проблемы автоматизации формирования макромоделей фрагментов БИС. Показана перспективность подходов, связанных с формированием макромоделей по полным математическим моделям. Изложены особенности алгоритмической реализации возможного подхода синтеза макромоделей, на примерах показана методика его применения.

1. Введение

Макро моделирование — быстро развивающееся направление автоматизации схемотехнического проектирования. Его появление и тенденции развития определяются необходимостью моделирования электрических процессов в схемах высокой сложности. Увеличение сложности моделируемых схем вызвано развитием интегральной технологии и постоянным ростом степени интеграции проектируемых схем. Методы макро моделирования предназначены для разработки макромоделей (ММ), использование которых позволит снизить размерность математических моделей анализируемых схем и обеспечить сокращение вычислительных затрат при расчете характеристик многокомпонентных схем.

Под макро моделью обычно понимают [1—6] упрощенную математическую модель отдельных электронных узлов или фрагментов проектируемых схем, которая в пределах заданной погрешности правильно описывает лишь внешние характеристики объекта, исключая из рассмотрения внутренние процессы. ММ различаются своим целевым назначением. В данной работе будут рассматриваться ММ, предназначенные для дальнейшего использования в схемотехническом моделировании. Конечной целью создания таких ММ является их включение в библиотеку моделей системы автоматизации схемотехнического проектирования. Тем самым на разрабатываемую ММ накладываются все требования, предъявляемые к моделям компонентов [1, 3, 11].

В настоящее время разработаны и эффективно применяются в процессе проектирования разнообразные ММ различных классов схем, например, операционных усилителей [4, 6, 8], логических вентилях [2, 5, 6, 9, 10]. Наиболее успешно используются ММ типовых, конструктивно-законченных микросхем малой и средней степени интеграции (ИС). В этом случае паспортные данные о характеристиках ИС могут быть непосредственно использованы в качестве исходной информации для определения параметров ММ. В результате применения таких ММ обеспечивается возможность расчета на ЭВМ характеристик сложных электронных систем и исключается компонентный уровень описания и моделирования, который в таком случае не является необходимым. Затраты на предварительные экспериментальные исследования быстро оправдываются в связи с дальнейшим многократным применением ММ для расчета систем, состоящих из типовых ИС.

Формирование ММ фрагментов монолитных больших интегральных схем (БИС) требует решения ряда дополнительных проблем. В первую очередь, особенности этой технической задачи связаны с тем, что для вновь проектируемых БИС, как правило, отсутствуют экспериментальные данные о внешних характеристиках фрагментов. Кроме того разнообразие таких фрагментов значительно больше номенклатуры типовых ИС. Фрагменты могут различаться не только принципиальной схемой, но и параметрами его компонентов. Постановка соответствующих экспериментов в таких случаях требует значительных материальных и временных затрат. Следует отметить, что значительное сокращение вычислительных затрат на моделирование при использовании ММ достигается за счет предварительной трудоемкости их разработки. По указанным причинам трудоемкость формирования ММ фрагментов монолитных БИС

может неоправданно возрасти, что в свою очередь ставит под сомнение практическое использование макро моделирования как направления машинного расчета монолитных БИС и СБИС.

Необходимым условием успешного использования ММ при проектировании БИС является возможность их оперативного формирования. Такая возможность определяется степенью автоматизации процесса формирования ММ, т. е. наличием формализованных вычислительных процедур, составляющих базовое алгоритмическое обеспечение для рассматриваемой технической проблемы.

В настоящей статье приведены результаты анализа, проведенного с целью определения математического аппарата для автоматизации формирования ММ (ФММ). Показана связь задачи ФММ с традиционной постановкой проблемы идентификации объектов, указаны ее отличительные особенности. Рассмотрены возможные направления для алгоритмического решения задачи автоматизации ФММ и показана перспективность методов ФММ по исходной полной модели фрагмента. Сформулированы проблемы, требующие дальнейшей проработки.

2. Связь задачи формирования ММ с традиционными задачами теории идентификации

Проблемы макро моделирования имеют много общего с проблемами идентификации объектов в общей теории моделирования и управления. При ФММ необходимо обеспечить выполнение основных этапов идентификации, в том числе:

- выбор структуры ММ (структурная идентификация);
- выбор информационных переменных;
- определение значений параметров ММ (параметрическая идентификация);
- оценка погрешности ММ (оценка степени идентичности исходному объекту).

Теория решения этих задач в настоящее время активно развивается [12—15], в первую очередь, исходя из потребностей построения математических моделей сложных объектов для целей управления. Назначение формируемых моделей в рассматриваемой технической проблеме связано с их применением в проектировании БИС. Этот факт, а также физико-технологические особенности изготовления объекта приводят к ряду специфических особенностей ФММ, как задачи идентификации, которые целесообразно учитывать при макро моделировании фрагментов БИС.

Сформулируем такие особенности, непосредственно влияющие на выбор алгоритмического обеспечения задачи ФММ:

А. Значительная нелинейность характеристик объекта. Наличие нелинейностей существенно усложняет решение задач идентификации. В рассматриваемом случае при-

рода нелинейностей прямо связана с физикой работы исходных компонентов, например, экспоненциальным характером вольт-амперной характеристики р—п перехода. Как правило, столь резкие характеристики не позволяют использовать методы квазилинейного приближения при идентификации.

Б. Соотношение априорной и апостериорной информации отлично от традиционных задач идентификации в управлении. В последнем случае идентификация осуществляется, как правило, по апостериорной информации об измеренных внешних характеристиках объекта, в то время как априорная информация о внутренней структуре и внутренних параметрах объекта крайне ограничена, и тенденция использования исходных физических законов для построения модели обычно неперспективна. При ФММ подобная ситуация возможна, если объектом макро моделирования являются конструктивно законченные ИС малой и средней степени интеграции. В этом случае информация об измерениях входных и выходных характеристик ИС вполне доступна, а данные о внутренних параметрах обычно остаются у разработчика-изготовителя микросхемы. Решение задачи построения ММ методами параметрической идентификации, например, по критерию наилучшего совпадения характеристик ММ с результатами измерений вполне оправдано в таком случае с точки зрения согласования с информационной средой. Однако, если разрабатываются ММ фрагментов вновь проектируемых монолитных БИС, апостериорная информация в виде характеристик фрагмента отсутствует и может быть получена только после изготовления тестовых образцов, т. е. проведения трудоемких и дорогостоящих экспериментов. В то же время при проектировании фрагментов БИС всегда известна его полная принципиальная схема и параметры на компонентном уровне, включающие геометрические размеры компонентов и данные о физической структуре кристалла. Следовательно, доступ к априорной информации в таком случае проще, чем к апостериорной, и использование именно такой информации вполне естественно для ФММ фрагментов БИС.

В. Выбор информационных переменных имеет особенность в связи с целевым применением ММ для проектирования БИС. Результатом процесса проектирования являются первичные геометрические и физические параметры отдельных компонентов, т. е. внутренние параметры фрагментов БИС. Следовательно полученные ММ фрагментов должны сохранять такие параметры в качестве собственных и обеспечивать возможность их варьирования в процессе проектирования. ММ должна сохранять также переменные, характеризующие внешние физические воздействия, например, изменение температуры. Отметим, что если ММ формируется только по внешним характеристикам фрагмента, возможность сохранения исходных параметров и переменных исключается.

Г. Структура ММ, полученная в результате формирования, должна обеспечивать возможность ее непосредственного использования в стандартных программах машинного анализа ИС.

Завершая обсуждение исходных предпосылок задачи формирования ММ фрагментов БИС как задачи идентификации, обратим внимание, что целесообразность максимального использования информации о внутренних параметрах объекта для построения его модели отмечается например, в работе [15], где указано: «К сожалению, получить информационную модель объекта (связь входных выходных переменных) из других имеющихся моделей, на базе которых построен данный объект, в большинстве случаев невозможно, хотя информация, содержащаяся в этих моделях, должна максимально использоваться... В этих моделях содержится богатейшая информация, которая может быть использована для решения таких сложных задач, как выбор информативных переменных, предварительной структуры и параметров системы, методов получения исходной информации и др. ...». Это замечание приведено нами для того, чтобы еще раз подчеркнуть, что такая информация в рассматриваемой технической проблеме макро моделирования БИС имеется, и то, что в настоящее время разработчики ММ используют, как правило, лишь данные о выходных характеристиках с информационной точки зрения необосновано. Поэтому дальнейшее рассмотрение возможных методов автоматического формирования ММ фрагментов будет рассматриваться, в основном, в классе методов построения упрощенных моделей (ММ) по их полным математическим моделям.

3. Методы формирования макромоделей по полным математическим моделям фрагментов

3.1. Полная математическая модель фрагмента схемы задается системой алгебро-дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} F(x, \dot{x}, y, \dot{y}, p) = 0, \\ I_{\pi} = H(x, \dot{x}, y, \dot{y}, p), \end{cases} \quad (1)$$

где $x(t)$ — вектор-функция внутренних переменных ($x(t) \in R^n$, $t \in [0, \infty]$),

$y(t)$ — вектор-функция внешних (полюсных) переменных ($y(t) \in R^l$),

p — вектор параметров ($p \in D_p$),

I_{π} — вектор-функция выходных характеристик,

D_p — область определения параметров, связанная с конструктивно-технологическими ограничениями, $D_p \in R^s$.

При формировании (1) методом узловых потенциалов x и y — вектора потенциалов внутренних и внешних узлов, соответственно, а I_{π} — вектор полюсных токов.

Задача ФММ фрагмента заключается в понижении порядка системы (1), т. е. формировании системы:

$$\begin{cases} S(z, \dot{z}, y, \dot{y}, q) = 0, \\ I_m = T(z, \dot{z}, y, \dot{y}, q), \end{cases} \quad (2)$$

где: $z(t)$ — вектор внутренних переменных ММ ($z(t) \in R^m$), q — вектор параметров ММ ($q \in D_q$, $D_q \in R^k$). Эффективность методов ФММ определяется отношением $\frac{n+l}{m+l}$. Чем выше это отношение, тем выше эффективность ММ, т. е. тем большая экономия вычислительных затрат на этапе использования ММ. Частным случаем (2) является отсутствие вектора z , т. е. $m=0$:

$$I_m = Q(y, \dot{y}, q). \quad (3)$$

Величина E :

$$E = \| I_m(z, \dot{z}, y, \dot{y}, q) - I_n(x, \dot{x}, y, \dot{y}, p) \| \quad (4)$$

определяет количественную оценку погрешности ММ.

Сложность и трудоемкость решения задачи ФММ во многом зависит от области определения вектора переменных y и вектора параметров q . Чем в более широких пределах полюсных напряжений и значений параметров требуется выполнение условия (4), тем больше требуется затрат на ФММ, тем менее эффективной с точки зрения использования становится ММ (увеличивается m). Сужение области определения упрощает задачу ФММ и уменьшает трудоемкость при ее применении за счет потери универсальности. Предельным является линейный случай, т. е. требуется создать ММ, справедливую в окрестности заданной точки (y_0, q_0) линеаризации характеристик — линейную макро модель. Другим важным фактором, влияющим на ФММ, являются требования к частотным свойствам ММ. Расширение диапазона рабочих частот ММ приводит к увеличению размерности ММ и снижению ее эффективности.

Дальнейшее использование ММ в программах анализа схем возможно одним из двух способов. При первом способе в вектор переменных схемы заносится только вектор внешних переменных ММ (y). Тогда процедура обращения к ММ состоит из двух этапов:

- решение первого уравнения системы (2) для нахождения векторов z, \dot{z} ;
- расчет полюсных характеристик I_m при заданных y, \dot{y} и рассчитанных z, \dot{z} .

При выполнении первого этапа часто необходимо знать пре-

дыдущие значения z , поэтому при этом способе использования эти значения приходится помнить внутри ММ, что является с точки зрения организации программ анализа большим неудобством. При втором способе в вектор переменных схемы включаются y и z . В этом случае первое уравнение ММ целиком включается в общую модель схемы. Но тогда ММ должна формироваться в виде:

$$\begin{cases} I_B = S(z, \dot{z}, y, \dot{y}, q) \\ I_M = T(z, \dot{z}, y, \dot{y}, q), \end{cases} \quad (5)$$

и обращение к ней на этапе использования сводится к вычислению I_B и I_M при заданных y, \dot{y}, z, \dot{z} . Второй способ является более удобным и широко используемым, поэтому в дальнейшем будем формировать ММ в виде (5).

Можно выделить три подхода к задаче ФММ по полной модели:

- проведение численного эксперимента с полной моделью (1) с последующей идентификацией ММ по полученным внешним характеристикам;
- упрощение полной модели на физическом (компонентном) уровне;
- формальное преобразование полной модели (1) для понижения ее размерности.

3.2. Первый подход, по существу, сводит задачу ФММ к традиционной задаче идентификации во временной области на наилучшее совпадение выходных характеристик ММ и полной модели по критерию (4). В этом случае вместо данных физического эксперимента используются результаты моделирования полной модели фрагмента. Применение традиционных методов идентификации влечет за собой известные проблемы, характерные для этих методов, к числу которых следует отнести большие затраты на оптимизацию во временной области и выбор тестового входного сигнала или спектра сигналов. Большие затраты обусловлены тем, что обычно фрагменты схемы имеют несколько входов и несколько выходов. Вопрос выбора тестового входного сигнала ФММ стоит очень остро в связи с тем, что ММ может использоваться в широком динамическом диапазоне. Кроме того при таком подходе к ФММ трудно удовлетворить требованию сохранения связи параметров макромоделли с исходными параметрами полной модели. Следовательно, с точки зрения автоматизации ФММ фрагментов БИС этот подход не является перспективным, так как в процессе идентификации априорная информация не используется.

3.3. При втором подходе упрощение полной модели производится на физическом уровне. Исходная принципиальная схема фрагмента упрощается путем исключения компонентов, не оказывающих существенного влияния на функционирование

фрагмента в целом, заменой групп компонентов одним эквивалентным компонентом, идеализацией характеристик некоторых компонентов [6, 19—21]. Оценка значимости влияния того или иного компонента, параметра или целой группы компонентов может проводиться с использованием методов теории расчета чувствительности [20]. Эффективность этого подхода существенно зависит от области определения ММ. Он больше подходит для аналоговых схем, где вариация режима мала. Для переключательных схем в различных режимах функционирования определяющими являются различные группы компонентов, поэтому достичь существенного снижения размерности модели при таком подходе не удастся [21]. Таким образом этот подход не является универсальным, требует высокой схемотехнической квалификации разработчика ММ и трудно формализуем для автоматизации ФММ нелинейных схем.

3.4. Наиболее перспективным с точки зрения автоматизации является третий подход, при котором проводится формальное преобразование полной математической модели фрагмента с целью уменьшения ее размерности при сохранении основных свойств, влияющих на внешние характеристики.

В практически важных случаях для электронных схем ММ (5) можно и удобно представить в несколько измененном виде:

$$\begin{cases} I_{\text{в}} = S_{\text{ст}}(z, y, q) + \frac{\partial S}{\partial z}(z, y, q) \dot{z} + \frac{\partial S}{\partial y}(z, y, q) \dot{y}, \\ I_{\text{м}} = T_{\text{ст}}(z, y, q) + \frac{\partial T}{\partial z}(z, y, q) \dot{z} + \frac{\partial T}{\partial y}(z, y, q) \dot{y} \end{cases}$$

или в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} I_{\text{в}} \\ I_{\text{м}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{\text{ст}} \\ T_{\text{ст}} \end{pmatrix} + C_{\text{эkv}} \begin{pmatrix} \dot{z} \\ \dot{y} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где: $S_{\text{ст}}, T_{\text{ст}}$ — статическая ММ фрагмента, $C_{\text{эkv}}$ — матрица эквивалентных емкостей ММ:

$$C_{\text{эkv}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial S}{\partial z} & \frac{\partial S}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} & \frac{\partial T}{\partial y} \end{pmatrix}.$$

Для случая $m=0$:

$$I_{\text{м}} = Q_{\text{ст}} + C_{\text{эkv}} \dot{y}. \quad (7)$$

Таким образом для создания нелинейной динамической ММ необходимо получить как минимум $(m+l)$ зависимостей, описывающих статическую ММ (статические токи ММ), и $(m+l)^2$ зависимостей для элементов матрицы $C_{\text{эkv}}$. Зависимости для элементов статической матрицы проводимостей получаются дифференцированием зависимостей статической ММ:

$$G_{ст} = \frac{\partial}{\partial \begin{pmatrix} z \\ y \end{pmatrix}} \left(S_{ст}(z, y, q) \right) = \begin{pmatrix} \frac{\partial S}{\partial z} & \frac{\partial S}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} & \frac{\partial T}{\partial y} \end{pmatrix}.$$

Большинство методов ФММ понижением порядка системы (1) базируются на преобразованиях, обеспечивающих сохранение свойств спектра собственных значений, которые определяют динамические характеристики фрагмента. Стратегия выбора спектра собственных значений может быть различной:

- равномерная выборка фиксированного числа собственных значений из всего спектра [6],
- выбор фиксированного числа минимальных собственных значений,
- выбор всех собственных значений, меньших заданного (т. е. формирование ММ с заданными частотными свойствами).

Такие методы развиваются в основном для линейных систем (разработка линейных ММ). Распространение их на случай нелинейных объектов встречает ряд дополнительных трудностей:

- неизвестен характер изменения спектра собственного значения в области определения переменных и параметров (y, q) .
- в связи с нелинейностью характеристик необходимо решать проблему их многомерной аппроксимации.

Сформированная ММ при этих методах в качестве внутренних переменных имеет переменные, не совпадающие с какими-то внутренними переменными полной модели — вектор внутренних переменных ММ является агрегатом вектора внутренних переменных полной модели:

$$z = M \cdot x,$$

где M — матрица, определяющая способ агрегирования, в общем случае зависящая от режима.

Но задача ФММ значительно упрощается, если выбрать матрицу M постоянной и такой, что внутренние переменные ММ будут совпадать с некоторыми внутренними переменными полной модели. В этом случае на разработчика ММ ложится выбор вектора внутренних переменных. Этот выбор он делает на основании знания физических принципов работы данного фрагмента и своего опыта.

На таком упрощении общей задачи ФММ основывается метод свертки полной математической модели [3], который позволяет получить выражения для расчета элементов матрицы эквивалентных емкостей в выражении (6).

4. Метод свертки полной математической модели фрагмента

4.1. Будем формировать ММ в виде (7), где первое слагаемое $Q(y)$ представляет собой статическую модель, определение которой не вызывает принципиальных затруднений. Значения

$Q_{ст}$ могут быть получены в результате расчета статических режимов при вариации вектора внешних переменных y с дальнейшей аппроксимацией вычисленных значений для получения аналитической зависимости [3].

Основная проблема заключается в определении динамической ММ, т. е. в формировании матрицы динамических параметров $S_{экив}(y)$. Для этих целей может быть использована теория возмущения операторов [17, 18] при синтезе низкочастотной аппроксимации исходной динамической модели [3].

Рассмотрим произвольную точку y_0 внешних переменных и определим искомые матрицы для линеаризованной в окрестности этой точки исходной модели (1):

$$F_x \dot{x} + F_x x + F_y \dot{y} + F_y y = 0, \\ I_n = H_x \dot{x} + H_x x + H_y \dot{y} + H_y y, \quad (8)$$

где: $F_x = \frac{\partial F}{\partial x}$, $F_x = \frac{\partial F}{\partial x}$, $F_y = \frac{\partial F}{\partial y}$, $F_y = \frac{\partial F}{\partial y}$,

$$H_x = \frac{\partial H}{\partial x}, H_x = \frac{\partial H}{\partial x}, H_y = \frac{\partial H}{\partial y}, H_y = \frac{\partial H}{\partial y}.$$

В комплексной форме эти уравнения имеют вид:

$$(pF_x + F_x)X(p) + (pF_y + F_y)Y(p) = 0, \quad (9)$$

$$I_n(p) = (pH_x + H_x)X(p) + (pH_y + H_y)Y(p), \quad (10)$$

включающие отображения:

$$X(p) \doteq x(t), Y(p) \doteq y(t), I_n(p) \doteq I_n(t).$$

При исключении внутренних переменных $X(p)$ из (9) и (10) может быть найдена комплексная матрица эквивалентной проводимости $G_{экив}(p)$, связывающая входные и выходные переменные ММ:

$$G_{экив}(p) = [H_y + pH_y] - \\ - [H_x + pH_x] [F_x + pF_x]^{-1} [F_y + pF_y]. \quad (11)$$

Для перехода к виду (7) необходимо аппроксимировать обратную матрицу $[F_x + pF_x]^{-1}$. Низкочастотное приближение ($|p| \rightarrow 0$) матрицы (11) будем искать в виде $G_{экив} = B + pC_{экив}$. Для этого используем разложение в ряд с точностью до линейных членов:

$$(F_x + pF_x)^{-1} = [E - pF_x^{-1}F_x] F_x^{-1} + \dots, \quad (12)$$

где: E — единичная матрица.

Условие применения такого разложения

$$\| pF_x^{-1}F_x \| < 1 \quad (13)$$

дает ограничение частотного диапазона ММ, получаемых рассматриваемым методом.

Подставляя результат разложения в формулу (11) и выделяя свободные члены и коэффициенты при первой степени p , получаем искомые выражения для матрицы B и $C_{\text{экв}}$

$$B = H_y - H_x F_x^{-1} F_y, \quad (14)$$

$$C_{\text{экв}} = H_y - H_x F_x^{-1} F_y - H_x F_x^{-1} [F_y - F_x F_x^{-1} F_y]. \quad (15)$$

Матрица B отображает активную составляющую матрицы проводимостей $G_{\text{экв}}$. Матрица $C_{\text{экв}}$ характеризует реактивную составляющую. Так как формулы (14) и (15) получены исключением внутренних переменных при произвольном y , то в общем случае формула (15) определяет зависящую от режима матрицу полюсных реактивностей (емкостей). Все матрицы, входящие в правую часть (15) являются функциями переменных $x(y)$ и y . С учетом того, что статические коэффициенты влияния $\frac{\partial x}{\partial y}$ определяются выражением $\frac{\partial x}{\partial y} = -F_x^{-1} F_y$, формула (15) может быть представлена в виде:

$$C_{\text{экв}}(y) = \left[H_y + H_x \frac{\partial x}{\partial y} \right] - H_x F_x^{-1} \left[F_x \frac{\partial x}{\partial y} + F_y \right]. \quad (16)$$

Выражение (16) (или (15)) определяет формулу пересчета динамических параметров при переходе от полной модели фрагмента к ММ. Достоинством рассматриваемого метода формирования динамических макромоделей является фактическое сведение к статической задаче и исключение больших временных затрат решения аппроксимационных задач во временной области, свойственных традиционным методам идентификации. Вычисление $C_{\text{экв}}$ осуществляется одновременно с расчетом статических режимов при изменении y в области определения внешних переменных. Ошибка рассматриваемого метода определяется степенью отличия динамических характеристик ММ от полной модели. Для ее качественной оценки следует найти исходную погрешность аппроксимации обратной матрицы $[F_x + pF_x]^{-1}$ степенным рядом p . Такая погрешность определяется выражением:

$$\|O(p^{n+1})\| = \frac{|p|^{n+1} \|F_x^{-1} F_x\|^{n+1}}{1 - |p| \|F_x^{-1} F_x\|}. \quad (17)$$

Использование формулы (15) или (16), полученной аппроксимацией полюсной матрицы реактивностей полиномом первой степени P , приводит к следующей оценке динамической погрешности модели:

$$\|O(p^2)\| = \frac{\|H_x\| \cdot \|F_x^{-1} F_x\|^2 \cdot \|F_y\| |p|^2}{1 - |p| \|F_x^{-1} F_x\|}. \quad (18)$$

Увеличение точности может при необходимости быть достигнуто включением старших членов разложения (12).

ММ, сформированная данным методом, не зависит от формы входного сигнала, т. е. исключается проблема выбора тестового сигнала и ММ является универсальной в этом смысле. Это утверждение иллюстрируется рис. 1. На нем изображена область определения фрагмента, имеющего один вход и один выход. Сплошной линией показана статическая передаточная характеристика этого фрагмента.

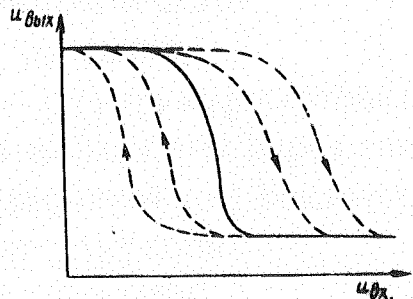


Рис. 1.

По этой траектории происходит движение при малых скоростях нарастания входного сигнала. При увеличении скорости нарастания происходит все большее отклонение от этой траектории. В методе свертки рассчитываются характеристики во всей области определения в отличие от методов с каким-либо тестовым сигналом, когда рассчитываются характеристики на одной или совокупности траекторий.

4.2. Полученные соотношения (15), (16) позволяют для простых фрагментов провести ФММ аналитически или комбинацией аналитических преобразований и численных расчетов.

Для примера рассмотрим ФММ фрагмента, состоящего из двух последовательно соединенных МДП транзисторов. Этот пример является частным случаем задачи ФММ произвольного КМДП логического вентиля. Схема этого фрагмента приведена на рис. 2а.

Требуется рассчитать полюсные емкостные характеристики фрагмента, как многополюсника, изображенного на рис. 2б.

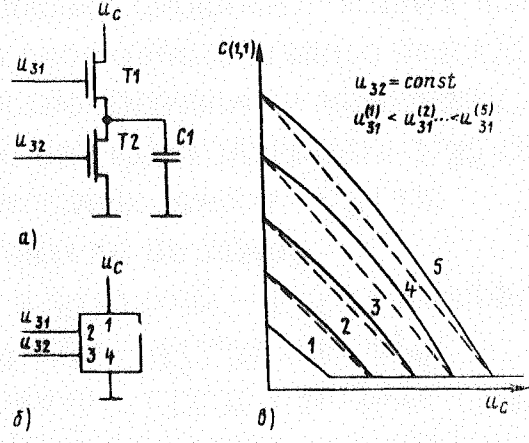


Рис. 2.

F_x		F_y	
$g_{c2} - g_{m1}$	$-g_{c1}$	$-g_{z1}$	g_{z2}
g_{m1}	g_{c1}	g_{z1}	0
0	0	0	0
0	0	0	0
H_x		H_y	
F_x		F_y	
$C_{z11} + C_{zс2}$	0	$-C_{z11}$	$-C_{zс2}$
0	$C_{zс1}$	$-C_{zс1}$	0
$-C_{z11}$	$-C_{zс1}$	$C_{z11} + C_{zс1}$	0
$-C_{zс2}$	0	0	$C_{z12} + C_{zс2}$
H_x		H_y	

Для этого сформируем матрицы полной модели, входящие в (8):

где: g_c, g_b, g_z — проводимости модели МДП-транзистора по стоку, истоку и затвору, соответственно (числовой индекс указывает номер транзистора),

C_{zc}, C_{z1} — емкости модели МДП-транзистора затвор—сток и затвор сток, соответственно.

Как проводимости, так и емкости модели транзистора являются функциями режима [11]. Поэтому проведение всех аналитических преобразований согласно (15), даже используя простейшую модель транзистора, затруднительно. На рис. 2в приведены результаты численного расчета элемента матрицы $C_{эКВ 1,1}$. Из рисунка видно, что зависимость от напряжения можно с достаточной точностью аппроксимировать кусочно-линейной функцией. Точка излома определяется переходом в насыщение вольтамперной характеристики верхнего транзистора и может быть просто определена. А значение емкости при $U_c = 0$ можно рассчитать аналитически по (15). В результате для $C_{эКВ 1,1}$ получаем:

$$C_{эКВ 1,1}(U_{z1}, U_{z2}, U_c = 0) = C_{zс1} + (C_1 + C_{z11} + C_{zс2}) \times \left(\frac{U_{z1} - U_0}{U_{z1} + U_{z2} - 2U_0} \right)^2$$

где:

U_0 — пороговое напряжение.

При усложнении фрагментов и с точки зрения автоматизации ФММ основным вариантом будет численный расчет с дальнейшей аппроксимацией рассчитанных характеристик.

Для целей оптимального проектирования необходимо сохранение в ММ некоторых параметров полной модели. Это требует проведения дополнительных расчетов при варьировании величины этих параметров. Т. к. метод свертки требует небольших вычислительных затрат на одну точку, то эта задача может быть решена. Соответственно на этапе аппроксимации увеличивается размерность задачи.

На рис. 3 показана схема генератора (ГСТ), являющегося типовым фрагментом аналоговых БИС. Будем считать, что конструктивно возможна вариация номинала резистора $R1$. Эта ситуация характерна для БИС, изготавливаемых на основе базового кристалла. Поэтому выберем в качестве параметра ММ величину этого резистора. Областью его определения выберем диапазон от 1 кОм до 10 кОм. Характеристики ММ рассчитывались численно по (15) при различных значениях напряжений (u_1, u_2) и номинала резистора $R1$. Результаты приведены на рис. 4. После аппроксимации рассчитанных характеристик, как функций трех переменных, получаем ММ двухполюсника с одним параметром.

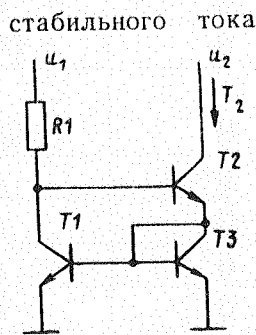


Рис. 3. Схема ГСТ

4.3. Остановимся более подробно на проблеме выбора допол-

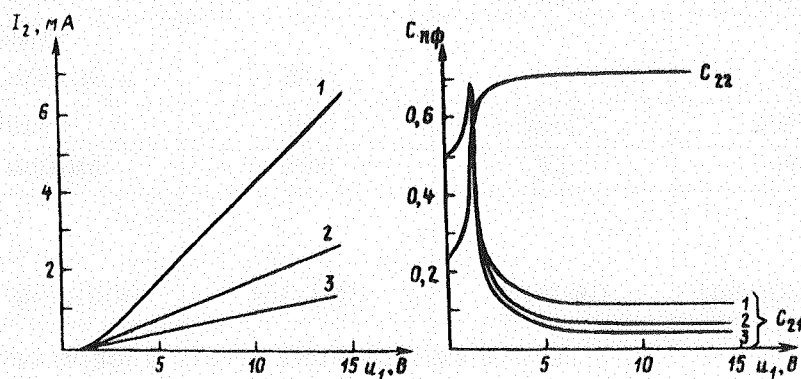


Рис. 4. Характеристики ММ ГСТ (1 — $R1 = 1$ к, 2 — $R1 = 2$ к, 3 — $R1 = 5$ к) и дополнительных внешних переменных. Их введение необходимо в следующих случаях:

- увеличение точности ММ,
 - наличие внутри фрагмента процессов, независящих от входных воздействий.
- Первый случай характерен для простых фрагментов комбина-

дионного типа, когда сформированная ММ без дополнительных переменных не удовлетворяет по точности. Во втором случае ФММ без дополнительных переменных невозможно. Их введение должно снимать неопределенность состояния фрагмента. К таким фрагментам относятся фрагменты с элементами памяти. Каждый элемент памяти будет давать дополнительную переменную. Эту переменную надо выбирать таким образом, чтобы полностью определялось состояние всего элемента памяти во всех режимах. Для простейшего D -триггера (рис. 5) в ка-

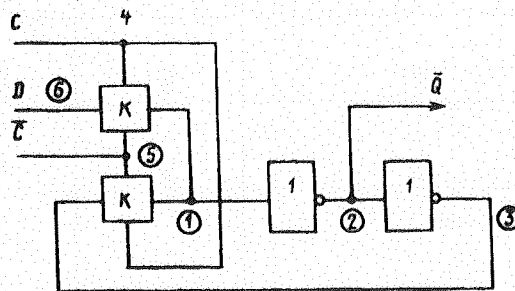


Рис. 5. D -триггер

честве дополнительной переменной необходимо выбрать напряжение узла 1. После введения дополнительных переменных к фрагментам с памятью можно применять методы ФММ.

5. Проблемы аппроксимации характеристик ММ

Одной из основных проблем ФММ нелинейных схем является проблема аппроксимации характеристик ММ. Эта проблема имеет ряд особенностей:

- произвольный вид характеристик,
- высокая размерность,
- аппроксимация функций по ее производным.

Достаточно часто функции имеют особенности, например, типа полюса или пограничного типа. Типичная размерность задачи 3—5. В случае ММ с параметрами увеличивается размерность на число этих параметров. Поэтому применение традиционного аппарата многочленов [22, 23] для аппроксимации не всегда дает решение. Подбор индивидуальных выражений для характеристик очень трудоемок, неточен и противоречит требованиям автоматизации. Следовательно, необходимо выбрать универсальный аппарат, который бы позволил решить данную проблему. Таким аппаратом являются методы сплайн-функций [24—27], которые имеют следующие важные при практическом использовании преимущества:

- устойчивость вычислительного процесса аппроксимации,

- возможность сглаживания данных,
- простота реализации алгоритмов сплайн-аппроксимации на ЭВМ,
- простота представления произвольной макромодели (подпрограммы расчета сплайн-функций и массивы коэффициентов),
- возможность расчета как значений функций, так и производных без дополнительных данных.

Для аппроксимации характеристик, зависящих от одной переменной, необходимо использовать полиномиальные (чаще всего кубические) сплайны, которые характеризуются малыми вычислительными затратами на этапе применения. Опыт их использования показывает улучшение результатов по сравнению с аппроксимацией выражениями, содержащими экспоненты, логарифмы, показательные функции, а также по сравнению с аппроксимацией классическим аппаратом. Для аппроксимации характеристик, зависящих от многих переменных, затраты памяти для полиномиальных сплайнов резко возрастают. При больших размерностях необходимо применять сплайны на основе других функций, например функций Грина [27]. При этом возрастают вычислительные затраты, но существенно экономится память.

Общей задачей при сплайн-аппроксимации является выбор сеток. От этого зависит как объем необходимой памяти, так и вычислительные затраты. Т. е. требуется выбрать сетку таким образом, чтобы минимизировать необходимую память и вычислительные затраты по заданной погрешности аппроксимации. Эта задача полностью не решена. Поэтому автоматизировать весь процесс ФММ не представляется возможным, если не известен вид характеристик ММ. Здесь требуется вмешательство разработчика в интерактивном режиме. По мере разработки соответствующих алгоритмов с необходимыми свойствами все большую часть работы можно будет автоматизировать.

6. Маршрут формирования макромодели по полной модели

На основе предыдущего рассмотрения общей задачи можно выделить основные этапы маршрута ФММ по полной модели:

- 1) сбор информации о фрагменте;
- 2) выбор структуры ММ;
- 3) расчет характеристик ММ;
- 4) аппроксимация полученных характеристик;
- 5) оценка точности ММ.

На первом этапе осуществляется сбор информации о полной модели фрагмента: принципиальная схема, значения ее параметров. На втором этапе выбирается структура ММ: определяется число переменных, число параметров. Число переменных определяется числом входов и выходов, а также структурой,

функциональными особенностями самого фрагмента, например, наличием элементов памяти. В число параметров включаются параметры, оказывающие наибольшее влияние на внешние характеристики фрагмента. Для оценки влияния параметров производится расчет чувствительности внешних характеристик. Следующий этап — третий — является основным. На этом этапе производится численный расчет внешних характеристик фрагмента. В качестве результатов расчета получают характеристики в табличном виде. В силу большой размерности области определения встает задача выбора опорных точек для уменьшения числа расчетов. Для этой цели можно использовать аппарат теории планирования эксперимента [28]. Полученные табличные функции аппроксимируются на четвертом этапе. При этом необходимо стремиться к вычислительной эффективности ММ, т. е. выбор аппроксимирующих функций, числа опорных точек, гладкость аппроксимации производится с учетом минимизации требуемой памяти и уменьшения машинного времени на этапе использования ММ. Последний этап — этап оценки погрешности ММ. Проверяется качественная адекватность разработанной ММ и фрагмента и оценивается количественно погрешность.

Данный маршрут может быть реализован в разных вариантах, отличающихся используемыми техническими средствами и степенью автоматизации. Наиболее быстрые результаты при автоматизации ФММ следует ожидать на этапах 3 и 4. Хотя в настоящий момент на этапе 4 достаточно часто требуется вмешательство разработчика, но интенсивная работа в области сплайн-аппроксимации позволяет надеяться на получение аппарата формальной аппроксимации характеристик произвольного вида. Наиболее сложным с точки зрения автоматизации является второй этап. На этом этапе основную роль играет разработчик, который использует ЭВМ для проведения пробных расчетов, численных оценок. Наиболее подходящий режим работы с ЭВМ в этом случае интерактивный с использованием машинной графики. Этот режим является в настоящий момент основным и для этапа аппроксимации. ФММ требует проведения большого объема вычислений, поэтому для реализации маршрута необходимо использовать высокопроизводительную мини-ЭВМ или мини-ЭВМ среднего класса, связанную с процессором большой производительности, например, совместное использование СМ ЭВМ и ЕС ЭВМ.

7. Заключение

В статье проведен анализ проблемы автоматизации формирования макромоделей фрагментов БИС как задачи идентификации. Показана перспективность подхода, связанного с ФММ по исходной полной математической модели фрагмента. Изло-

женный метод формирования динамических ММ нелинейных цепей учитывает особенности рассматриваемой технической проблемы и имеет ряд достоинств, в том числе:

- обеспечивается формализация понижения порядка модели и, как следствие, возможность автоматизации этого процесса;
- структура получаемой ММ может быть непосредственно использована в системах автоматизации схемотехнического проектирования;
- используется информация об исходной схеме и ее параметрах на компонентном уровне;
- имеется возможность сохранения в наборе параметров формируемой ММ исходных физических и геометрических параметров компонентов, что обеспечивает применение таких ММ при проектировании интегральных структур;
- обеспечивается простота и экономичность с вычислительной точки зрения алгоритмической реализации в сравнении с другими подходами, т. к. параметры формируемой ММ, в том числе и динамические, определяются при решении статической задачи;

Следует обратить внимание на целесообразность развития альтернативных методов ФММ по полным моделям для нелинейных цепей, например, методов агрегирования внутренних переменных. С позиций автоматизации ФММ к числу проблем, требующих решения или дальнейшего алгоритмического развития, можно отнести также:

- формализованный синтез структуры ММ в соответствии с ее целевым назначением и требуемой точностью;
- оценку погрешности формируемой макромоделей для произвольной области ее работоспособности;
- синтез макромоделей для фрагментов с памятью;
- принципы организации иерархического ряда ММ, отличающихся по сложности и точности;
- разработку физико-топологических ММ фрагментов БИС, т. е. ММ, сохраняющих в иерархическом ряде преемственность по исходным параметрам, и принципов многоуровневого проектирования БИС на их основе.

Решение перечисленных проблем и разработка соответствующего программного обеспечения позволит оперативно разрабатывать макромоделей фрагментов БИС. В результате будет обеспечена возможность реального применения ММ при автоматизации проектирования монолитных БИС произвольного класса, выполненных различными технологическими и конструкторскими способами, и достигнуты характерные для ММ сокращения затрат моделирования и сроков проектирования БИС.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Норенков И. П.* Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем. — М.: Высшая школа, 1980. — 311 с.
2. *Ruehli A. E., Rabbat R. B., Hsieh H. Y.* Macromodelling—an approach for analysing large—scale circuits. — CAD, 1978, v. 10, № 2, p. 121—129.
3. *Багалов Б. В., Егоров Ю. Б., Русаков С. Г.* Основы математического моделирования БИС на ЭВМ. — М.: Радио и связь, 1982. — 166 с.
4. *Алексенко А. Г., Зуев И. А.* Макромоделирование ИС операционных усилителей. — Зарубежная радиоэлектроника, 1977, № 8, с. 22—32.
5. *Гринбаум Д. Р., Миллер В. А.* Модели цифровых ИС для машинного проектирования. — Электроника, 1973, № 25, 26; 1974, № 2, 3.
6. Моделирование и оптимизация на ЭВМ радиоэлектронных устройств, под ред. Бененсона З. М. — М.: Радио и связь, 1981. — 271 с.
7. *Boyle S. R., Cohn B. M., Pederson D. O., Solomon J. E.* Macromodelling of integrated circuit—operational amplifiers. — IEEE J., 1974, v. SC—9, № 6, p. 353—363.
8. *Majewski M. L., Sanchez—Siaencio E.* A Nonlinear Large—Scale Macromodel of Operational Amplifiers. — Proceedings of the 1978 International Symposium on Circuits and System. N. Y., 1978.
9. *Rabbat N. B., Ryan W. D., Hossiah S. Q. M. A.* A computer modelling approach for LSI digital structures. — IEEE Trans., 1976, v. ED—22, № 8, p. 523—531.
10. *Фединский А. В.* Макромоделирование фрагментов цифровых схем. — Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 1982, стр. 33—38.
11. *Носов Ю. Р., Петросяц К. О., Шилин В. А.* Математические модели элементов интегральной электроники. — М.: Советское радио, 1976. — 304 с.
12. *Эйкхофф П.* Основы идентификации систем управления. — М.: Мир, 1975. — 683 с.
13. *Грон Д.* Методы идентификации систем. — М.: Мир, 1979. — 302 с.
14. *Сейдж Э. П., Мелса Дж.* Идентификация систем управления. — М.: Мир, 1974. — 246 с.
15. Дисперсионная идентификация. Под ред. *Райбмана И. С.* — М.: Наука, 1981. — 336 с.
16. *Растргин Л. А., Маджаров И. Е.* Введение в идентификацию объектов управления. — М.: Энергия, 1977. — 214 с.
17. *Ланкастер П.* Теория матриц. — М.: Мир, 1978. — 280 с.
18. *Ортсга Дж., Рейнболдт В.* Итерационные методы решения нелинейных систем уравнений со многими неизвестными. — М.: Мир, 1975. — 558 с.
19. *Spence R., Neumann T.* On model Simplification. — Proceedings of the 1978 International Symposium on Circuits and System. N. Y., 1978.
20. *McAfee L. C.* On Using Sensitivities for Systematic Macromodelling. — Proceedings of the 1978 International Symposium on Circuits and Systems. N. Y., 1978, p. 354—358.
21. *Мельник А. С.* Машинная макромодель полупроводниковой схемы. — М.: Изв. ВУЗов СССР. Радиоэлектроника, 1981, т. 24, № 8.
22. *Калиткин Н. И.* Численные методы. — М.: Наука, 1978.
23. *Тиман А. Ф.* Теория приближения функций действительного переменного. — М.: Физматгиз, 1960.
24. *Алберг Дж., Нильсон Э., Уолли Дж.* Теория сплайнов и ее приложения. — М.: Мир, 1977.
25. *Марчук Г. И.* Методы вычислительной математики. — М.: Наука, 1980.
26. *Завьялов Ю. С., Квасов Б. И., Мирошниченко В. Л.* Методы сплайн—функций. — М.: Наука, 1980.
27. *Василенко В. А.* Сплайн—функции: теория, алгоритмы, программы. — Новосибирск: Наука, 1983.
28. *Федоров В. В.* Теория оптимального эксперимента. — М.: Наука, 1971.