ПРОБЛЕМЫ АГРЕГИРОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ ПРИ РЕШЕНИ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

И.В. Прасол, В.В. Семенец
Харьковский национальный университет радиоэлектроники
Кафедра БМЭ ХНУРЭ, пр. Ленина 14, г. Харьков, 61166, Украина
Тел.: (057) 702-1364, E-mail: prasol_iv@mail.ru

***Annotation* – The problems of models reduction by aggregation for electrical analysis large analog electronic circuit with CAD are given in these materials.**

***Key words* – model aggregation, electrical analysis, analog electronic circuit, CAD.**

Противоречивость требований достаточной точности и минимальной размерности математической модели (ММ) на практике часто приводит к необходимости упрощения модели в ущерб ее точности. Поэтому совершенствование методов упрощения моделей представляет одну из основных задач любой прикладной области.

Особую остроту приобретают эти вопросы при моделировании изделий радиоэлектроники и микроэлектроники, что связано с устойчивой тенденцией роста их уровня сложности и степени интеграции. Совокупность методов понижения размерностей моделей компонентов и целых функциональных узлов (ФУ) составляет отдельное направление в машинном проектировании электронных схем (ЭС), которое получило название макромоделирование или агрегирование моделей.

Целью агрегирования является снижение вычислительных затрат на проектирование при сохранении приемлемой с практической точки зрения точности. Под агрегированной моделью (макромоделью) ЭС обычно понимают упрощенную ММ, обладающую меньшими вычислительными затратами при ее реализации, чем модель, полученная путем объединения ММ компонентов этой схемы, и представленную в форме, удобной для использования в САПР [1]. Существует две основные причины необходимости разработки и применения макромоделей. Первая из них связана с внедрением в практику схемотехнического проектирования устройств электронной аппаратуры интегральных микросхем (ИМС). Вторая причина кроется в росте сложности электронных систем, расчет которых необходимо выполнять без разделения их на субсистемы. Именно в этом случае более оправданным и отвечающем действительности использование термина ”агрегирование моделей”.

Различаю два основных класса агрегированных моделей (АММ) – фазовые (электрические) и факторные. Последние используются при моделировании цифровых ИМС и представляют собой логические выражения и функции выходных параметров от входных и внешних. Электрические АММ связывают между собой такие фазовые переменные, как токи и напряжения и предназначены для анализа ЭС на схемотехническом уровне.

Переход к АММ понижает размерность анализируемой системы и повышает быстродействие программ схемотехнического проектирования, что позволяет значительно увеличить сложность исследуемых устройств, не изменив существенно точность моделирования. Экспериментальные данные свидетельствуют о снижении примерно на порядок времени вычислений и уменьшение в несколько раз затрат оперативной памяти ЭВМ при моделировании схем на макроуровне.

Макромоделирование может быть использовано на любом уровне моделирования ЭС – компонентном, уровне ФУ (подсхем) и устройства в целом. В первом случае объектом макромоделирования выступают интегральные компоненты, во втором – типовые фрагменты. Последний подход обеспечивает максимальное снижение размерности решаемой задачи, но труднее всего реализуется практически.

Для анализа ЭС с использованием АММ разработаны специальные программы, отличающиеся наличием библиотек АММ и средств их обеспечения. Тем не менее, с АММ могут работать и обычные программы, допускающие введение моделей пользователя.

В настоящее время разработан ряд макромоделей различных ИМС, но их применение не позволяет организовать сквозное проектирование и широкое внедрение на этапе схемотехнического проектирования. Основной задачей макромоделирования остается оперативное построение и эффективное использование АММ.

Задача макромоделирования во многом подобна задачи идентификации объектов, решаемой в теории моделирования и управления, которая в настоящее время интенсивно развивается. Однако область применения АММ и особенности объекта идентификации обуславливает ряд специфических особенностей формирования АММ, которые заключаются в следующем:

- существенная нелинейность свойств объекта, которая не позволяет применять методы квазилинейного приближения;
- наличие достаточной априорной информации об объекте (его структура, параметры элементов и т.д.), которую целесообразно использовать;
- необходимость сохранения в модели ряда параметров объекта (например, при параметрической оптимизации);
- структура модели должна обеспечивать возможность ее применения в САПР.

Существующие методы макромоделирования можно условно разделить на две большие группы – эвристические и формальные.

С помощью эвристических методов получено основное число известных макромоделей [2]. Однако, они требуют высокой квалификации разработчика, большого объема теоретических и экспериментальных исследований со значительными материальными и временными затратами и не поддаются автоматизации. Их преимущества проявляются при построении АММ типовых ИМС, поскольку предварительные затраты быстро оправдывают себя в связи с возможностью многократного применения.

Систематизируется макромоделирование в рамках алгебраического метода на основе синтеза алгоритма функционирования (АФ) ЭС. АФ представляет собой математический объект

$$A[\check{\theta}, \check{\theta}_\Lambda, \check{M}, \check{N}, \check{F}, \check{G}_A], \tag{1}$$

где $\check{M}$, $\check{N}$ - множества символов операций и отношений, которые образуют соответственно множества операций и отношений $\check{F}_м$ и $\check{F}_N$ над переменными $\check{\theta}$ и $\check{\theta}_\Lambda$;

$\check{F}$ - множество операторов алгоритма;

$\check{G}_A$ - граф АФ.

Тогда АММ представляется в виде (1), причем

$$A[\check{\theta}, \check{\theta}_\Lambda, \check{M}, \check{N}, \check{F}, \check{G}_A] \sim F_{имс}(\theta_{вх}, \theta_{вн}, \theta_{вых}) = 0,$$

где $\theta_{вх}, \theta_{вн}, \theta_{вых}$ - векторы входных, внутренних и выходных переменных ИМС соответственно, а символ ~ обозначает эквивалентность в определенном смысле [2] АФ и ММ ИМС $F_{имс}$ (.)=0.

Достоинством алгебраического метода является возможность его применения для макромоделирования аналоговых, цифровых и цифро-аналоговых ИМС.

Формальные методы допускают возможность автоматизации макромоделирования и базируются на методах аппроксимации, выделения доминирующих параметров, редукции и агрегирования переменных [2]. Наиболее перспективны методы построения АММ по полным ММ (ПММ), потому что главная теоретическая задача макромоделирования заключается в создании методики макромоделирования, позволяющей формально получить макромодель по полной модели. Решение этой задачи традиционными методами идентификации приводит к большим вычислительным затратам и проблеме выбора тестовых входных сигналов, т.к. моделируемые устройства обычно представляют собой многомерные системы. Кроме того, в этом случае затруднительно сохранить связь между параметрами АММ и ПММ. Поэтому наиболее целесообразно формальное преобразование ПММ, понижающее его размерность при сохранении ряда наперед заданных внешних характеристик.

В классе таких методов наиболее известен подход для автоматического формирования АММ, использующий аппарат метода многополюсных подсхем. Суть его заключается в следующем.

АММ ФУ формируется по его ПММ

$$\begin{cases} F(x, \dot{x}, y, \dot{y}, p) = 0, \\ I_п = H(x, \dot{x}, y, \dot{y}), \end{cases} \tag{2}$$

в виде системы уравнений

$$\begin{cases} I_в = S(z, \dot{z}, y, \dot{y}, q), \\ I_м = T(z, \dot{z}, y, \dot{y}, q), \end{cases} \tag{3}$$

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

$y(t) \in R^l$ - вектор-функция полюсных переменных;

p, q - векторы параметров ПММ и АММ соответственно;

$I_п, I_м$ - вектор-функции выходных характеристик ПММ и АММ соответственно;

$I_в$ - вектор-функция внутренних характеристик АММ.

Эффективность макромоделирования оценивается отношением $(n+l)/(m+l)$, а точность – величиной

$$E = \left\| I_м(z, \dot{z}, y, \dot{y}, q) - I_п(x, \dot{x}, y, \dot{y}, p) \right\|. \tag{4}$$

На практике АММ (3) представляется в виде

$$\begin{bmatrix} I_в \\ I_м \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{ст} \\ T_{ст} \end{bmatrix} + C_{экв} \cdot \begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{y} \end{bmatrix}, \tag{5}$$

где $S_{ст}, T_{ст}$ - статическая АММ ФУ; $C_{экв}$ - матрица эквивалентных емкостей АММ

$$C_{экв} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial S}{\partial \dot{z}} & \dfrac{\partial S}{\partial \dot{y}} \\ \dfrac{\partial T}{\partial \dot{z}} & \dfrac{\partial T}{\partial \dot{y}} \end{bmatrix}. \tag{6}$$

Для $m = 0$:

$$I_м = Q_{ст} + Q_{экв} \cdot \dot{y}. \tag{7}$$

Элементы статической матрицы проводимостей определяется путем дифференцирования

$$G_{ст} = \frac{\partial}{\partial \begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix}} \cdot \begin{bmatrix} S_{ст}(z, y, q) \\ T_{ст}(z, y, q) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial S}{\partial z} & \dfrac{\partial S}{\partial y} \\ \dfrac{\partial T}{\partial z} & \dfrac{\partial T}{\partial y} \end{bmatrix}. \tag{8}$$

В статическом нелинейном случае $Q_{ст}$ зависит от режима, поэтому для получения вектор-функции

$I_м = Q_{ст}(y)$ внутренние переменные $x_{ст}$ исключаются из уравнений вход-выход (2) путем решения системы трансцендентных уравнений $F(x, y) = 0$ для набора значений внешних переменных y. Функция $Q_{ст}(y)$ затем аппроксимируется или хранится в табличном виде.

При развитой системе полюсов ФУ это приводит к проблеме выбора наборов внешних переменных, значительным затратам машинного времени, большим объемом хранимой информации и погрешностям аппроксимации или интерполяции.

Для определения динамических параметров можно использовать теорию возмущения операторов. Зафиксировав значение внешних переменных, исходная модель линеаризуется в окрестности точки y_0:

$$\begin{cases} F_{\dot{x}} \cdot \dot{x} + F_x \cdot x + F_{\dot{y}} \cdot \dot{y} + F_y \cdot y = 0, \\ I_n = H_{\dot{x}} \cdot \dot{x} + H_x \cdot x + H_{\dot{y}} \cdot \dot{y} + H_y \cdot y, \end{cases} \quad (9)$$

где

$$F_{\dot{x}} = \frac{\partial F}{\partial \dot{x}},\ F_x = \frac{\partial F}{\partial x},\ F_{\dot{y}} = \frac{\partial F}{\partial \dot{y}},\ F_y = \frac{\partial F}{\partial y},$$

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

Затем к уравнениям (9) применяется преобразование Лапласа:

$$\begin{cases} (pF_{\dot{x}} + F_x) \cdot X(p) + (pF_{\dot{y}} + F_y) \cdot Y(p) = 0, \\ I_n(p) = (pH_{\dot{x}} + H_x) \cdot X(p) + (pH_{\dot{y}} + H_y) \cdot Y(p), \end{cases} \quad (10)$$

где $X(p) \div x(t),\ Y(p) \div y(t),\ I_n(p) \div y_n(t).$

Низкочастотное приближение комплексной матрицы эквивалентной проводимости

$$\begin{gathered} G_{экв}(p) = [H_y + pH_{\dot{y}}] - \\ -[H_x + pH_{\dot{x}}] \cdot [F_x + pF_{\dot{x}}]^{-1} \cdot [F_y + pF_{\dot{y}}], \end{gathered} \quad (11)$$

полученной исключением внутренних переменных $X(p)$ из (1.10), ищется в виде

$$G_{экв} = B + p \cdot C_{экв}, \quad (12)$$

где $B = H_y - H_x \cdot F_x^{-1} \cdot F_y;$

$$\begin{gathered} C_{экв} = [H_{\dot{y}} + H_{\dot{x}} \frac{\partial x}{\partial y}] - \\ - H_x \cdot F_x^{-1} \cdot [F_{\dot{x}} \frac{\partial x}{\partial y} + F_{\dot{y}}], \end{gathered} \quad (13)$$

$$\frac{\partial x}{\partial y} = -F_x^{-1} \cdot F_y.$$

Здесь матрица $C_{экв}$ характеризует реактивную составляющую $G_{экв}$ и зависит от внешних переменных.

К основным достоинствам подхода можно отнести фактическое сведение динамической задачи к статической и возможность априорной оценки динамической погрешности АММ, а его недостатками являются:

- необходимость соблюдения условия относительной безынерционности внутренних переменных;
- ограниченная область адекватности АММ;
- увеличение размерности аппроксимационных задач в случае сохранения в АММ параметров ПММ.

Кроме того, использование старших членов разложения в ряд обратной матрицы $[F_x + pF_{\dot{x}}]^{-1}$ и учет соответствующих сомножителей в (11) с целью повышения точности АММ затрудняет ее практическое использование.

В связи с этим возникает необходимость введения в АММ части внутренних переменных ПММ [3;4].

Для решения разнообразных практических задач схемотехнического проектирования ЭС необходим набор макромоделей, отличающихся сложностью, точностью и положением области адекватности. Эти АММ образуют иерархический ряд. Модели первого уровня отражают функциональные особенности, второго – основные характеристики и параметры ЭС. Третий уровень образуют АММ, моделирующие дополнительные характеристики, а АММ четвертого уровня приближаются к ПММ. При этом

$$\|\varPhi_i - F\| < \varepsilon_i, \quad A_i \subset A_{i+1}, \quad (14)$$

где A_i - область адекватности АММ $\varPhi_i$ i-го уровня, F обозначает ПММ, а ε_i - априори заданная оценка несовпадения моделей.

Для формирования гомоморфного рядов АММ устанавливается связь между структурой и функциональными возможностями АММ. Структура модели описывается с помощью направленного структурного графа $G_a = \{u_i, u_j, l_k^a\}$, где u_i, u_j - номера начальной и конечной вершин, инцидентных дуге l_k^a $(k = \overline{1, L})$, соответственно; L - количество ветвей графа схемы замещения АММ.

Структурные свойства АММ исследуются в рамках алгебраической системы $(\widetilde{G}, \widetilde{F}_{MG}, \widetilde{F}_{NG})$, где $\widetilde{G}$ - носитель системы; $\widetilde{F}_{MG}, \widetilde{F}_{NG}$ - ее сигнатура. Считается, что каждое множество $\widetilde{F}_{NG}$ и $\widetilde{F}_{MG}$ состоит из одного элемента, а именно – отношение равенства и бинарной операции прямой суммы на графах из $\widetilde{G}$ соответственно. Бинарная операция прямой суммы на графах определяется следующим образом:

$$G_a \oplus G_b = G_c = \left\{ (u_i, u_j, l_k^c) \right\}, \qquad (15)$$

где

$$(u_i, u_j, l_k^c) = \begin{cases} (u_i, u_j, l_\phi) \; при \quad l_k^a = l_k^b, \\ (u_i, u_j, l_k^a) \; при \quad l_k^a = l_\phi; l_k^b = l_\phi, \\ (u_i, u_j, l_k^b) \; при \quad l_k^b \neq l_\phi; l_k^a = l_\phi, \\ (u_i, u_j, l_k^a)(u_i, u_j, l_k^b) \; при \quad l_k^a \neq l_k^b \neq l_\phi, \end{cases}$$

$\oplus$ - символ бинарной операции,

а l_ϕ обозначает отсутствующую дугу графа.

Бинарная операция $\oplus$ индуцирует на множестве $\widetilde{G}$ структуру коммутативной (абелевой) группы и позволяет менять или оставлять неизменными множества дуг и вершин на графах макромоделей.

Каждому графу сопоставляется структурно-групповая формула

$$G_a = G_{a1} \oplus G_{a2} \oplus \ldots \oplus G_{a\rho}, \qquad G_{ai} \in \check{G}_{обр} (i = \overline{1, \rho}), \qquad (16)$$

где $\check{G}_{обр}$ множество образующих;

ρ - число образующих.

Группе образующих, определяемых с помощью циклических групп, ставится в соответствие некоторое определенное свойство объекта, отображаемое АММ.

В результате по набору свойств моделируемого ФУ синтезируется гомоморфный ряд АММ.

Этот подход требует наличия наиболее универсальной АММ, обладающей совокупностью всех отображаемых свойств объекта, получить которую обычно труднее всего. Кроме того, сложно установить правила перехода между уровнями при соблюдении условия (14), необходимость отыскания которых и составляет суть рассматриваемой проблемы. Синтез иерархического ряда АММ с помощью структурно-групповой формулы (16) также затруднен при их автоматизированном формировании по ПММ, когда явная связь между образующими и отображающими свойствами отсутствует.

Таким образом, на основе выше приведенного можно сделать следующие выводы.

Подавляющее большинство известных методов макромоделирования носят эвристический характер, требуют высокой квалификации разработчика и большого объема предварительных исследований. Они ориентированы на построение макромодели (это относится в основном к моделям ИМС) минимальной размерности, что приводит к возникновению проблем синтеза иерархического ряда, сложностям автоматизации процесса и ограниченной адекватности моделей. Среди формальных методов макромоделирования наиболее перспективны методы агрегирования полных математических моделей на уровне моделей компонентов, т.к. именно в этом случае обеспечивается возможность организации сквозного проектирования и достаточная степень оперативности процесса. Применение автоматизированных методов редукции ПММ влечет за собой рост размерности получаемой модели, но дает возможность формировать АММ с предсказуемой заранее погрешностью и областью адекватности в пространстве внешних параметров на этапе, непосредственно предшествующему их использованию. Так как процесс машинного анализа ЭС сводится к последовательному исследованию частных режимов функционирования устройства, при использовании формальных методов редукции ПММ нет необходимости в формировании универсальной макромодели. Это дает возможность включать в маршрут проектирования конкретной ЭС этап автоматизированного синтеза ее АММ, ориентированной на конкретные условия применения. Что в свою очередь повышает эффективность использования самой интегрированной САПР электронной аппаратуры.

[1] Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования.- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана,2002.- 336 с.

[2] Макромоделирование интегральных микросхем / В.Ф. Бардаченко, Ю.Н. Басов, Ю.В. Королев, И.А. Ющенко; Под ред. Ю.В. Королева. -Киев: Техніка, 1989.-118 с.

[3] Прасол И.В., Семенец В.В. Редукция модели при частотном анализе схем // Радиоэлектроника и информатика, № 1(1). -Харьков, ХТУРЭ.-1997.- С.95-96.

[4] Прасол И.В., Семенец В.В., Сова А.В. Оценочный критерий выделения существенных реактивностей схемы для построения частотных макромоделей// Радиоэлектроника и информатика, № 1(2). -Харьков, ХТУРЭ.-1998.- С.19-20.

[5] D. Ramaswamy, J. White. Automatic Generation of Small-Signal Dynamic Macromodels from 3-D Simulation, in Technical Procedings of the Forth International Conference on Modeling and Simulationof Microsystems, 2001.

[6] A. Varga. Model reduction software in the SLICOT library. In Applied and Computational Control,Signals and Circuits, (Ed.: B.N. Datta), Kluwer Academic Publishers, Boston, 2001, 2, 239-282.

[7] P. Krysl, S. Lall, J. E. Marsden. Dimensional model reduction in non-linear finite element dynamics of solids and structures, Int. J. Numer. Methods Eng. 2001, 51, 479-504.