

ОСОБЕННОСТИ АГРЕГИРОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ИХ ПАРАМЕТРОВ

К.т.н. И.В. Прасол, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

В работе рассматриваются некоторые особенности агрегирования математических моделей аналоговых электронных схем при оптимизации их параметров в САПР. Сформулирован ряд специфических требований к агрегированным моделям, которые строятся по полной математической модели схемы на уровне компонентов. Предложена универсальная структура агрегированной модели для решения задач параметрического синтеза.

У статті розглянуті деякі особливості агрегованих математичних моделей аналогових електронних схем при оптимізації їх параметрів у САПР. Сформульовані специфічні вимоги до агрегованих моделям, які отримані за повними математичними моделями схем на рівні компонентів. Запропоновано універсальну структуру агрегованої моделі для вирішення задач параметричного синтезу.

Some features of the aggregation of mathematical models of analog electronic circuits to optimize their parameters in CAD are considered. A number of specific requirements for aggregated models that are based on a full mathematical model of the circuit at the component level is formulated. A universal structure of the aggregated model for solving the problems of parametric synthesis is offered.

Введение

Параметрическая оптимизация электронных схем (ЭС) представляет собой наиболее трудоёмкий этап схемотехнического проектирования. Так как качество функционирования радиоэлектронной аппаратуры в большинстве случаев описывается множеством противоречивых критериев, а поверхность отклика функции цели может иметь несколько экстремумов, то задача нахождения оптимальных значений параметров схемы носит многокритериальный и многоэкстремальный характер. Кроме того, в общем случае целевая функция не имеет аналитического выражения и определяется на каждом шаге оптимизационной процедуры численным образом путём решения системы соответствующих уравнений, описывающих электрические процессы в объекте проектирования. Поэтому процесс оптимизации, состоящий из ряда последовательных шагов, на каждом из которых оценивается значения целевой функции и функций-ограничений и на этой основе принимается решение об изменении набора управляемых параметров, характеризуется значительными потерями на поиск, определяемые числом обращений к математической модели схемы.

Решение проблемы трудоёмкости возможно по трём не исключаящим друг друга направлениям. Первое заключается в совершенствовании методов и алгоритмов оптимизации с целью сокращения количества шагов, приводящих к оптимальному решению. Так, метод контрольных

точек, используя функциональную блочность ЭС, позволяет оптимизировать устройство в целом на уровне оптимизации функциональных блоков. Для этого рассчитываются характеристики блоков в контрольных точках и формируется соответствующие функции цели. Процесс основан на последовательном улучшении характеристик функциональных блоков. Наиболее просто осуществляется декомпозиция сепарабельных целевых функций. По некоторым оценкам применение метода контрольных точек улучшает быстродействие подсистемы оптимизации на 20 — 80%. Ряд алгоритмов, повышающих эффективность оптимизационных процедур, описан в работе [1] и других. В другом направлении задача решается совершенствованием методов анализа, которое движется по пути комбинирования различных методов интегрирования дифференциальных уравнений, раздельного интегрирования переменных, имеющих различные скорости сходимости решения, организации вычислительного процесса по подсхемам [2;3].

Эти подходы повышают эффективность анализа и поиска оптимального варианта ЭС, но оказываются недостаточными для оптимизации сложных схем по их полным математическим моделям (ПММ). Поэтому они обычно лишь дополняют методы снижения размерности решаемых задач, базирующиеся на моделировании компонентов схемы и целых функциональных узлов на макроуровне. Макромоделирование или агрегирование моделей составляет основу развития методов третьего направления [4;5]. Наиболее широко используется агрегированные модели (АМ) при оптимизации БИС.

В настоящее время разработаны адаптивные алгоритмы анализа, основанные на пространственном и временном комбинировании упрощенных моделей (макромоделей). При этом предполагается, что схемы состоят из типовых фрагментов, макромодели которых заранее построены и образуют иерархический ряд. Для реализации комбинирования АМ необходимы алгоритмы оперативного контроля адекватности АМ и их смены при нарушении условий адекватности, а также определённость и ограниченность области адекватности (ОА) имеющихся в наличии АМ. Тогда процесс анализа начинается с выбора наиболее экономичных АМ и сопровождается проверкой принадлежности вектора Q внешних переменных фрагментов области адекватности АМ. Замена АМ более сложными осуществляется при нарушении условий $F(Q) \geq 0$, где $F(Q)=0$ — аппроксимация границы ОА. Таким образом удаётся минимизировать затраты времени счёта одного варианта ЭС.

1. Постановка задачи

Адаптивное макромоделирование, являясь мощ-

ным средством повышения эффективности процедуры параметрической оптимизации, не решает самой задачи построения АМ. С другой стороны, ограниченность числа иерархических уравнений макромоделей (обычно их три) не позволяет достаточно точно согласовать фактическую и требуемую ОА, что обычно приводит к избытку точности применяемых моделей. Например, если низкочастотная модель ОУ адекватна оригиналу вплоть до частоты доминантного полюса скорректированного усилителя, а разработчика интересует поведение всего устройства на низших частотах, то такая модель будет обладать запасом сложности и точности. Это отрицательно сказывается на вычислительной эффективности блока анализа. В связи с этим возникает задача оперативного формирования АМ отдельных функциональных узлов (ФУ)[6;7] для процедур оптимизации, настроенной на специфические условия её использования, одно из решений которой рассмотрено ниже.

2. Требования к упрощенным моделям, предназначенным для решения задач параметрической оптимизации схем

Возможность замены ПММ упрощенной моделью при оптимизации параметров ЭС обуславливается отсутствием необходимости использовать для вычисления значений функций цели все компоненты вектора решения ПММ. Чаще всего оптимизируется небольшая группа параметров и характеристик, в расчёте которых участвует лишь незначительная часть всех независимых переменных. Например, при оптимизации переходной импульсной характеристики сложной нелинейной схемы с одним входом и одним выходом по частному критерию минимальной длительности фронтов выходного сигнала используется только две переменные, в то время как размерность ПММ значительно выше.

Кроме того, анализируя матрицу чувствительности с элементами $\nabla f_{ji} = \partial f_j / \partial x_i$, где f_j и x_i — j-й критерий оптимальности и варьируемый параметр i-го элемента схемы соответственно, можно отметить, что при многокритериальной оптимизации влияние параметров элементов на характер и величину изменения критериев оптимальности является разнообразным. В одних случаях даже значительное изменение параметров некоторых элементов приводит к незначительному улучшению характеристик, в других — носит противоречивый характер. Таким образом, одновременное варьирование параметрами всех элементов, а, следовательно, и анализ схемы с применением ПММ будет неэффективным.

Эти обстоятельства позволяют переходить при решении задач оптимизации от ПММ к адаптивным АМ, построенным с учётом достаточности варьирования только существенно влияющими параметрами схемных элементов. Выбор этих параметров осуществляет разработчик, опираясь на опыт и интуицию, или по результатам анализа функций чувствительности.

Непосредственно применять существующие методы и способы агрегирования не всегда удаётся. В первую очередь это связано с этим, что значение целевой функции определяется на основе информации о части внутренних и внешних переменных схемы, а АМ обычно отражает только внешние характеристики моделируемого объекта. Помимо этого, требуется обеспечить возмож-

ность целенаправленного изменения характеристик АМ путём варьирования её параметрами. Поясним это на следующем примере.

Пусть оптимизируются характеристики ЭС, линеаризованной в некоторой области средних частот. Её ПММ описывается уравнениями

$$A \cdot X = B, \quad (1)$$

где A — матрица модели схемы;
 X — вектор фазовых переменных;
 B — вектор входных воздействий.

Для такой схемы макромоделю может быть получена в виде

$$Y = C \cdot (A_{kk} - A_{ke} \cdot A_{ee}^{-1} \cdot A_{ek})^{-1} \cdot (B_k - A_{ke} \cdot A_{ee}^{-1} \cdot B_e), \quad (2)$$

где Y — вектор выходных характеристик вида

$$y_i = \sum_{i=1}^n k_i x_i;$$

k_i — постоянные коэффициенты, $x_i \in X_k$;

C — матрица преобразования, устанавливающая связь между переменными X_k и характеристиками Y ;

$A_{kk}, A_{kl}, A_{lk}, A_{ll}, B_k, B_l$ — блоки исходных матрицы A и вектора B , соответствующие разбиению вектора X на подмножества X_k и X_l следующим образом: $X = [X_k^t, X_l^t]^t$. Здесь X_l — множество переменных ПММ, не участвующих в формировании функции качества. Модель (2) при $\dim X_l \neq 0$ имеет размер-

ность ниже, чем ПММ, и позволяет легко вычислить значения целевой функции. Тем не менее, остаётся открытым вопрос об управлении параметрами АМ. Любые изменения элементов исходной матрицы требуют повторения матричных операций по расчёту компонентов вектора Y , а также обращения матрицы $(A_{kk} - A_{kl} \cdot A_{ll}^{-1} \cdot A_{lk})$, что делает проблематичным повышение вычислительной эффективности за счёт такого подхода даже при снижении размерности модели схемы.

Обобщая сказанное, сформулируем следующие специфические требования к упрощенным моделям, предназначенным для решения задач параметрической оптимизации ЭС.

1. Критерии оптимальности схемы должны определяться только в пространстве фазовых переменных УМ. Это значит, что при построении УМ состав и число переменных модели выбирается исходя из необходимости обеспечения компромисса между минимальной сложностью, возможностью вычисления всех целевых функций и допустимой погрешностью анализа.

2. Необходимо явное соответствие варьируемых схемных параметров и параметров УМ, исключающее трудоёмкие вычислительные операции по их пересчёту. Очевидно, в рассмотренном выше примере явного соответствия между параметрами нет, т.к. связь между ними устанавливается при помощи сложных матричных вычислений.

3. ОА УМ должна задаваться в пространстве внешних переменных, расширенном варьируемыми параметрами схемных элементов, т.е. необходима адекватность упрощенной модели ПММ не только по отношению к внешним переменным, но и вариациям параметров управляемых элементов.

4. Область допустимых значений, определённая в пространстве внешних и управляемых параметров, должна включаться в ОА УМ. Поэтому не допустима ситуация, когда в процессе поисковой оптимизации варьируемые параметры принимают такие значения, для которых при некоторых наборах внешних переменных погрешность УМ выходит за границы допустимых значений. Т.к. обычно варьируют наиболее существенными параметрами, удовлетворить это требование в широком диапазоне значений управляемых параметров не всегда удастся.

5. Точность УМ должна обеспечить заданную точность оптимизации в целом.

6. Форма представления УМ должна быть удобной для непосредственного использования в программах оптимизации.

7. Оперативность процесса агрегирования и его максимальная автоматизация с минимальными затратами машинного времени. Это то главное условие, при котором возможна практическая реализация методов агрегирования в программах схемотехнической оптимизации ЭС. Действительно, если традиционно макромоделью заменяют типовой фрагмент или стандартный ФУ (например, микросхему), применение которых характерно для широкого класса ЭС, то автоматизация синтеза упрощенных моделей очень желательна, но не имеет обязательного характера. Даже значительные временные затраты на подготовку УМ оправдывают себя при их многократной эксплуатации. По-другому обстоит дело в рассматриваемом случае. Даже типовые фрагменты могут иметь различные УМ, вид и размерность которых определяются принятыми правилами предпочтения варианта объекта, составом управляемых параметров, режимами функционирования проектируемых устройств. Кроме того, диапазоны изменения внешних и варьируемых параметров меняются при переходе от одной схемы к другой. В этих условиях инженерные методы неприемлемы (за исключением ситуации, когда нет альтернативы из-за чрезвычайной сложности ПММ), а суммарные затраты времени на макрооптимизацию и построение УМ не должны быть больше, чем в случае использования ПММ.

На основе этих требований можно сформулировать ряд задач, решение которых обеспечивает решение проблемы оперативного формирования электрических УМ для процедур параметрической оптимизации.

1. Разработка метода автоматизированного синтеза УМ с априори заданной ОА.

2. Определение допустимой погрешности УМ по требованиям к точности нахождения оптимальной реализации синтезируемой схемы.

3. Нахождение соответствующей аппроксимации фактической ОА и проверка на включение в неё заданной ОА.

3. Универсальная структура упрощенной модели

Исходя из сформулированных выше требований к АМ можно предложить универсальную структуру анало-

гового ФУ, изображенную на рис. 1. Она соответствует представлению исходной схемы и УМ в виде безынерционного многополюсника БМ с несколькими группами сторон и набором свободных полюсов. Группы сторон в свою очередь образуют следующие многополюсники: ИМ – инерционный; НМ – нелинейный; МУ – управляемый. К числу свободных полюсов относят входы системы и внутренние узлы схемы, потенциалы которых являются аргументами целевых функций.

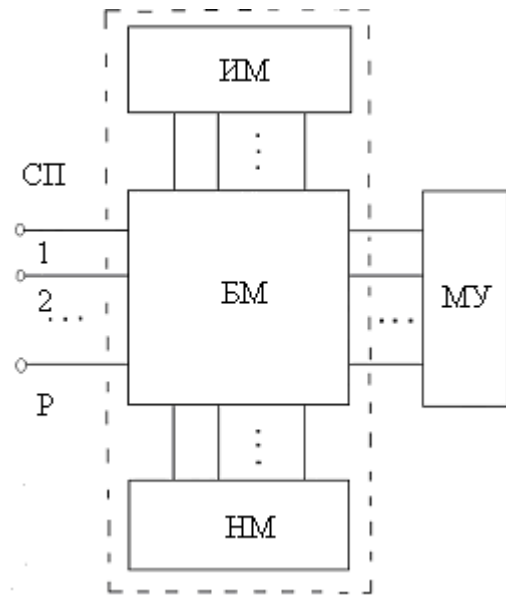


Рис. 1. Структура ФУ и АМ для задач параметрического синтеза

Перед построением УМ идентификация сторон многополюсника осуществляется следующим образом: к числу элементов ИМ относят все реактивности схемы замещения ФУ; НМ образуется всеми нелинейными резисторами (компонентными диодами и диодами, моделирующими работу транзисторов); множество компонентов с управляемыми параметрами образуют многополюсник МУ. Обычно варьируют только параметрами пассивных элементов – сопротивлением, ёмкостью, индуктивностью. В процессе агрегирования состав множеств элементов ИМ, НМ, МУ меняется, но структура УМ остаётся неизменной.

4. Уравнения упрощенной модели

Уравнения такого многополюсника относительно напряжений его сторон и свободных полюсов в общем случае имеет вид

$$\begin{bmatrix} H_{pp} & H_{pv} & H_{pn} & H_{pc} \\ H_{vp} & H_{vv} & H_{vn} & H_{vc} \\ H_{np} & H_{nv} & H_{nn} & H_{nc} \\ H_{cp} & H_{cv} & H_{cn} & H_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_p \\ U_v \\ U_n \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_p \\ -I_v \\ -I_n \\ -I_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

где $H = [h_{ik}]$ – матрица модели;

$U_v, U_n, U_c, I_v, I_n, I_c$ — векторы напряжений и токов варьироваемых, нелинейных и инерционных элементов соответственно;

U_p, J_p — векторы напряжений и токов свободных полюсов соответственно. Вектор J_p имеет только те ненулевые компоненты, которые соответствуют информационным и энергетическим входам устройства;

p, v, n, c — количество свободных полюсов, варьироваемых, нелинейных и инерционных элементов соответственно.

Система уравнений в форме (3) существует всегда, если нелинейные, инерционные и варьироваемые элементы не образует контуров между собой или через свободные полюса. Доказательство этого утверждения может быть проведено от обратного.

Так как управляемые параметры $x_i (i = \overline{1, v})$ исходной схемы и УМ совпадают, то нет необходимости устанавливать математическую связь между ними, что является важным достоинством модели в форме (3). Кроме того, вычисление возмущенной матрицы УМ при вариациях значений X_i осуществляется довольно просто — корректируются только диагональные элементы субматрицы H_{vv} . Это открывает возможности повышения вычислительной эффективности расчетов непосредственно на этапе поисковой оптимизации за счёт возможности формировать уравнения УМ только один раз.

Чтобы минимизировать размерность УМ и избежать переопределённости системы (3), необходимо руководствоваться следующими правилами идентификации множества свободных полюсов СП:

- все входы системы относятся к СП;
- к числу свободных полюсов только тогда относят узел, инцидентный варьировемому элементу, когда его потенциал входит в выражение для целевой функции;
- в качестве свободного полюса выступает лишь один из двух узлов подключения управляемого элемента, если их потенциалы участвуют в формировании разных критериев;
- узлы подключения элемента с варьировемыми параметрами не относят к числу свободных полюсов, если функция качества зависит от его напряжения. Такой элемент выделяют в качестве одной из сторон ВМ обычным образом.

Компоненты векторов U_n, U_c являются факультативными, т.е. внутренними переменными УМ. Поэтому мощность объединенного множества $U_f = U_n \cup U_c$ минимизируется в процессе агрегирования.

Следует отметить, что в большинстве практических случаев наблюдается уменьшение порядка модели при переходе от внешних переменных УМ U_p, U_v непосредственно к выходным характеристикам с помощью преобразования

$$K_r = [Y_p Y_v] \cdot \begin{bmatrix} U_p \\ U_v \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где Y_p, Y_v — блоки матрицы преобразования;

K_r — вектор выходных характеристик размерности g .

Это возможно, если выходные характеристики линейны по U_p и U_v .

Однако такая редукция приводит к нарушению явной связи между параметрами управляемых компонентов и элементов модели. Это не происходит, если используются только те уравнения системы (4), которые соответствуют нулевым строкам субматрицы Y_v .

Выводы

В данной работе рассмотрены вопросы агрегирования детерминированных математических моделей аналоговых электронных схем при многокритериальной параметрической оптимизации. Исследованы особенности таких моделей и сформулированы требования к ним. На основе этих требований предложена универсальная структура моделируемого функционального узла и его агрегированной модели с выделенными нелинейными, инерционными и управляемыми частями. Получены соответствующая система уравнений и условия ее существования. Отличительная особенность такой модели — явная взаимосвязь между варьировемыми схемными параметрами и параметрами модели, что позволяет избежать сложных взаимных пересчетов. Кроме того, открывается уникальная возможность организации вычислительного процесса так, что уравнения агрегированной модели формируются однократно, а вариации параметров схемных элементов приводят лишь к возмущениям отдельных, заранее определенных элементов матрицы модели. Тестовые расчеты свидетельствуют о возможности значительно повысить эффективность и увеличить сложность решаемых задач параметрического синтеза схем в САПР.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Васильев Ф.П. Методы оптимизации. М.: Факториал Пресс, 2002. — 824 с.
2. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. - М.: Научный мир, 2003. — 430 с.
3. Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования. Том 1. Вычислительная математика. - М.: Наука, 2005. - 344 с.
4. Прасол И.В., Семенец В.В. Проблемы агрегирования моделей при решении задачи электрического анализа сложных электронных схем /Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». Частина 4.- Київ, Інститут електродинаміки НАН України, 2009.- С. 98-101.
5. Прасол И.В. Вопросы адаптации агрегированных моделей схем на этапе параметрического синтеза в САПР/Технология приборостроения. Научно-технический журнал. № 2. Харьков, ДП НДТІП, 2009.- С. 45-49.
6. E. B. Rudnyi, J. G. Korvink, "Automatic Model Reduction for Transient Simulation of MEMSbased Devices", Sensors Update vol. 11, pp. 3-33, 2002.
7. Стемковский А.Л. и др. Актуальные проблемы моделирования в системах автоматизации схемотехнического проектирования. - М: Наука, 2003. — 430 с.