
ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ЦЕПЕЙ КАК УПРАВЛЯЕМЫЙ ДИНАМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

Приводится формулировка процесса проектирования аналоговых цепей на основе применения теории управления. Такой подход позволяет представить задачу оптимизации цепи как управляемый динамический процесс. Задача определения оптимального по быстродействию алгоритма проектирования формулируется как задача минимизации функционала в теории управления. Обсуждаются свойства и характеристики различных стратегий проектирования, которые могут служить основой для построения оптимального алгоритма.

1. Введение

Задача сокращения чрезвычайно большого процессорного времени является одной из существенных проблем проектирования больших систем. Традиционный подход к проектированию включает две основные части: а) анализ модели системы, которая может быть описана алгебраическими или интегро-дифференциальными уравнениями, и б) процедура параметрической оптимизации, благодаря которой достигается оптимум целевой функции. Время, необходимое для анализа модели электронной системы, и время, связанное с расчетом характеристик процедуры оптимизации, растет с увеличением сложности системы.

Известны традиционные методы сокращения необходимого времени анализа системы. Благодаря разреженной структуре матрицы проводимости электронной схемы многие идеи для работы с разреженными матрицами успешно реализованы [1]. Иной путь уменьшения числа операций для анализа электронных схем связан с идеей декомпозиции, т.е. разбиения большой системы на ряд подсистем с дальнейшим анализом этих подсистем и сшиванием результатов для получения полного решения [2–3]. Расширение методов прямого решения было получено также на основе иерархической декомпозиции и представления макромоделей [4].

Техника оптимизации, используемая при оптимизации и проектировании электронных схем, тоже оказывает существенное влияние на общее количество операций и процессорное время [5]. Практические аспекты использования этих методов развиты для задач проектирования электронных схем с учетом оптимизации по различным критериям [6–7]. Фундаментальные проблемы развития, разработки структур и вопросов адаптации САПР рассмотрены в ряде работ [8–9]. Эти идеи были успешно развиты и стали основой для многих учебных и профессиональных пакетов анализа и проектирования электронных схем [10–12].

Изложенные выше идеи проектирования соответствуют традиционному подходу в том смысле, что метод анализа электронной цепи основан на соблюдении законов Кирхгофа. Иная формулировка задачи оптимизации цепи без точного соблюдения законов Кирхгофа предложена в работе [13]. Этот процесс назван обобщенной оптимизацией и был основан на идее игнорирования законов Кирхгофа для части схемы или для всей схемы в целом. При этом требовалось помимо минимизации целевой функции процесса оптимизации минимизировать также невязку системы уравнений модели цепи. В крайнем случае, когда в невязку включались все уравнения математической модели цепи, эта идея была практически реализована в двух системах проектирования, в первой – при оптимизации микроволновой цепи [14], во второй – при синтезе больших аналоговых цепей [15]. Последняя идея может быть определена как традиционная модифицированная стратегия проектирования. В отличие от традиционной стратегии, включающей анализ модели системы на каждом шаге процедуры оптимизации, традиционная модифицированная стратегия проектирования может быть определена как стратегия, вообще не включающая анализ модели в процессе оптимизации.

Задача проектирования системы может быть переформулирована и формализована на основе применения теории управления [16]. Эта новая методология обобщает задачу проектирования и определяет процедуру проектирования системы как динамический процесс с управлением. При этом были определены специальные управляющие функции, введенные искусственно, для управления процессом проектирования путем перераспределения затрат машинного времени между блоком анализа системы и блоком оптимизации. В этом случае появляется множество различных стратегий проектирования, обладающих различным процессорным временем. Можно определить задачу поиска на этом множестве одной из стратегий, наилучшей в смысле быстродействия. С точки зрения машинного времени, оптимальная стратегия проектирования может быть определена как стратегия, которая достигает оптимальную точку целевой функции процесса проектирования за минимальное время. Процесс построения оптимального по времени алгоритма проектирования системы сводится к задаче поиска оптимального управления, т.е. к типичной задаче теории управления.

2. Формулировка задачи

Задача проектирования физической системы может быть сформулирована как процесс минимизации целевой функции $C(X)$ для $X \in R^N$ с ограничениями, где в качестве таковых выступает математическая модель физической системы. Предполагается, что достигнув минимума целевой функции, мы достигаем всех целей проектирования. Это могут быть, например, необходимые заданные частотные или временные характеристики электронной системы.

Предположим, что проектируемая система имеет в качестве математической модели систему нелинейных алгебраических уравнений:

$$g_j(X) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, M. \quad (1)$$

Вектор X может быть разбит на две части: $X = (X', X'')$, где вектор $X' \in R^K$ – вектор независимых переменных, K – число независимых переменных, вектор $X'' \in R^M$ – вектор зависимых переменных, M – число зависимых переменных и $N = K + M$. Разбиение вектора X на зависимые и независимые переменные является достаточно условным, так как любой параметр может быть принят в качестве независимого или зависимого.

Процесс минимизации целевой функции $C(X)$ для двухшаговой процедуры в общем случае может быть описан следующим векторным уравнением:

$$X^{s+1} = X^s + t_s \cdot H^s(X), \quad (2)$$

где s – номер итерации, t_s – итерационный параметр, $t_s \in R^1$, H – функция, задающая направление уменьшения целевой функции $C(X)$. Вектор H зависит от функции $C(X)$, и зависимость эта определяется примененным методом оптимизации. Это есть типичная формулировка задачи условной оптимизации, при которой (1) является системой ограничений.

Специфический характер процесса проектирования электронных схем состоит в том, что нет необходимости выполнять условия (1) для каждого шага процесса оптимизации и вполне достаточно удовлетворить этим условиям в конечной точке процесса проектирования. Как показано в работе [16], задача (1)-(2) может быть переформулирована так, что все или часть зависимых переменных могут быть трансформированы в независимые. В этом состоит основной принцип реорганизации задачи (1)-(2). При этом некоторые или все уравнения системы (1) исчезают, а вместо них появляется дополнительная штрафная функция, обобщающая целевую функцию $C(X)$. Новая обобщенная целевая функция проектирования $F(X)$ может быть определена, например, как следующая аддитивная функция:

$$F(X) = C(X) + \phi(X). \quad (3)$$

Структура штрафной функции $\phi(X)$ должна содержать информацию об уравнениях, исключенных из системы (1). Крайний случай, когда все уравнения системы (1) удалены, можно идентифицировать как модифицированную традиционную стратегию проектирова-

ния. Именно эта стратегия применялась в системах проектирования [14-15]. Число возможных реорганизаций задачи (1)-(2) зависит от числа первоначально зависимых переменных M и равно 2^M . Каждая новая форма задачи (1)-(2) определяет новую стратегию проектирования и соответствующую ей траекторию. В этом случае имеет смысл определение задачи поиска оптимальной стратегии и траектории проектирования, которые обеспечивают минимальное число операций и минимальное компьютерное время. Этот аспект обсуждался в работе [16], где показано, что такая постановка задачи имеет смысл и что оптимальная стратегия может быть отлична как от традиционной стратегии, так и от модифицированной традиционной стратегии проектирования.

Более высокий уровень обобщения проблемы проектирования был получен на основе переформулирования задачи проектирования в терминах теории управления. В этом случае процесс проектирования системы мыслится как управляемый динамический процесс, где управление осуществляется специально заданными функциями, которые могут осуществлять реорганизацию структуры задачи (1)-(2) на каждом шаге процедуры оптимизации. При этом формулируется типичная задача теории управления – задача поиска оптимального управления, позволяющего минимизировать некоторый функционал, в нашем случае компьютерное время. Задача (1)-(2) в таком случае трансформируется в задачу:

$$(1 - u_j)g_j(X) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, M, \quad (4)$$

$$X^{s+1} = X^s + t_s \cdot H^s(X, U), \quad (5)$$

где вектор направленного движения H зависит не только от вектора X , но также от дополнительного вектора U , компонентами которого являются управляющие функции u_j . Форма вектора H определяется методом оптимизации обобщенной целевой функции (3), где структура дополнительной штрафной функции $\varphi(X)$ может быть задана следующей формулой:

$$\varphi(X^s) = \frac{1}{\varepsilon} \sum_{j=1}^M u_j g_j^2(X^s). \quad (6)$$

Вектор U состоит из M компонент $U = (u_1, u_2, \dots, u_m)$, где $u_j \in \Omega$; $\Omega = \{0, 1\}$. Смысл управляющих переменных u_j следующий: уравнение номер j присутствует в системе (4), а член $g_j^2(X)$ удалён из правой части формулы (6) в случае, когда $u_j = 0$, и наоборот, уравнение j удалено из системы (4), а соответствующий член появляется в правой части формулы (6), когда $u_j = 1$. Все управляющие переменные u_j являются функциями текущей точки процесса оптимизации. Полное число различных стратегий, появляющихся внутри той же самой процедуры оптимизации, практически бесконечно. Среди них существует одна или несколько стратегий, достигающих всех целей проектирования за минимальное компьютерное время. Задача поиска оптимальной стратегии сформулирована как типичная задача теории оптимального управления. Основным аспектом такой формулировки является поиск оптимальной структуры управляющего вектора.

Возможно определить процесс проектирования системы в терминах теории управления как в дискретной, так и в непрерывной форме. Процедура оптимизации может быть задана следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{dX}{dt} = f(X, U). \quad (7)$$

Структура правой части уравнения (7) зависит от применяемого метода оптимизации и например, для градиентного метода компоненты векторной функции $f(X, U)$ определены следующим образом:

$$f_i(X, U) = -\frac{\delta}{\delta x_i} F(X, U), \quad i = 1, 2, \dots, K, \quad (8)$$

$$f_i(X, U) = -u_{i-K} \frac{\delta}{\delta x_i} F(X, U) + \frac{(1 - u_{i-K})}{dt} [-x'_i + \eta_i(X)], \quad i = K + 1, K + 2, \dots, N, \quad (8')$$

где оператор $\frac{\delta}{\delta x_i}$ здесь и далее означает $\frac{\delta}{\delta x_i} \varphi(X) = \frac{\partial \varphi(X)}{\partial x_i} + \sum_{p=K+1}^{K+M} \frac{\partial \varphi(X)}{\partial x_p} \frac{\partial x_p}{\partial x_i}$, x_i^s равно

$x_i(t - dt)$ и функция $\eta_i(X)$, записанная в неявном виде, определяет текущее значение переменной x_i^{s+1} ($x_i^{s+1} = \eta_i(X)$), которое находится в результате решения системы (4). Системы (4), (7) определяют процесс проектирования в непрерывной форме. Формулы (7), (8) определяют процесс эволюции для независимых переменных и формулы (7), (8') определяют переменные, которые изначально были определены как зависимые, но могут быть также трансформированы в независимые. Преобразование векторов X' и X'' может быть сделано в любой момент времени. Это приводит к появлению практически неограниченного числа различных траекторий проектирования, порожденных системами (4), (7). Каждая траектория соответствует своей стратегии.

Можно утверждать, что нет принципиального отличия между задачами (5) и (7). Задача (5) определяет управляемый динамический процесс в дискретной форме и задача (7) – в непрерывной форме.

Для минимизации полного компьютерного времени проектирования необходимо найти оптимальное поведение управляющих переменных u_j в течение процесса проектирования. Существует одна трудность при рассмотрении системы (7). Функции $f_i(X, U)$ не являются непрерывными как функции времени в конечном числе точек, так как управляющие переменные u_j принимают значение 0 или 1. Задача минимизации функционала (процессорного времени) для системы (7) с не непрерывными или не гладкими функциями $f_i(X, U)$ может быть сформулирована адекватно на основе известного принципа максимума Понтрягина [17]. Основная проблема применения принципа максимума упирается в неизвестные начальные значения дополнительных функций сопряженной системы. Эта проблема имеет адекватное решение только в случае линейной системы (7), как например в работе [18]. В нелинейном случае применяются приближенные итерационные алгоритмы [19-20].

3. Численные результаты

Идея формулировки задачи проектирования системы как задачи минимизации функционала в теории оптимального управления не зависит от применяемого метода оптимизации и может быть встроена в любую процедуру оптимизации. Численные результаты для различных электронных цепей показали, что оптимальный управляющий вектор U_{opt} может быть найден, и при этом полное процессорное время существенно сокращается. Оптимальная стратегия при этом отлична от традиционной стратегии проектирования, когда $u_j = 0$, $\forall j=1,2,\dots,M$, и от модифицированной традиционной стратегии, когда $u_j = 1$, $\forall j=1,2,\dots,M$, т.е. идея, реализованная в работах [14, 15], не является оптимальной с точки зрения процессорного времени. Анализ задачи проектирования различных электронных систем позволяет заключить, что потенциальный выигрыш в машинном времени для оптимальной стратегии по сравнению со стратегией традиционной растет при усложнении системы и при увеличении ее размеров [16]. При анализе нижеследующих примеров были приняты такие характеристики. Процесс проектирования был реализован для постоянного тока. В качестве метода оптимизации был выбран градиентный метод. Функция цели $S(X)$ была определена как сумма квадратов разностей между априори заданными и текущими значениями узловых напряжений для некоторых узлов схемы. Конечное значение функции цели задавалось величиной 10^{-9} .

Пусть анализируется пассивная нелинейная электронная цепь, представленная схемой на рис. 1 и имеющая четыре независимых переменных ($K=4$) в качестве проводимостей y_1, y_2, y_3, y_4 и три зависимых переменных ($M=3$) в качестве узловых напряжений V_1, V_2, V_3 . Нелинейные элементы заданы выражениями: $y_{n1} = a_{n1} + b_{n1} \cdot (V_1 - V_2)^2$, $y_{n2} = a_{n2} + b_{n2} \cdot (V_2 - V_3)^2$.

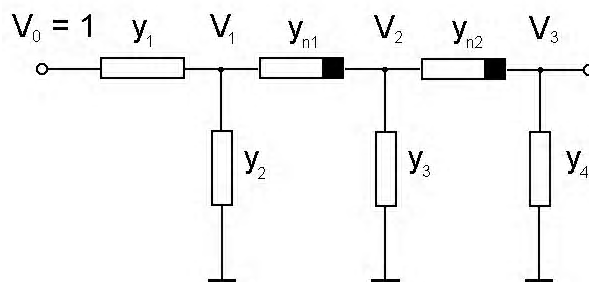


Рис. 1. Схема с четырьмя независимыми ($K=4$) и тремя зависимыми ($M=3$) переменными

Параметры нелинейности b_{n1}, b_{n2} равны 1.0. Компоненты вектора X заданы формулами: $x_1^2 = y_1$, $x_2^2 = y_2$, $x_3^2 = y_3$, $x_4^2 = y_4$, $x_5 = V_1$, $x_6 = V_2$, $x_7 = V_3$. Такое определение компонент вектора X удовлетворяет положительной определенности всех проводимостей, что автоматически снимает проблему физических ограничений для независимых переменных. В этом случае основная система (7) процедуры оптимизации содержит семь уравнений:

$$\frac{dx_i}{dt} = -\frac{\delta}{\delta x_i} F(X, U), i = 1, 2, 3, 4, \quad (9)$$

$$\frac{dx_i}{dt} = -u_{i-4} \frac{\delta}{\delta x_i} F(X, U) + \frac{(1-u_{i-4})}{dt} \{-x_i(t-dt) + \eta_i(X)\}, i = 5, 6, 7,$$

где $F(X, U) = C(X) + \frac{1}{\varepsilon} \sum_{j=1}^3 u_j g_j^2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7)$. Модель электронной системы вклю-

чает систему трех нелинейных алгебраических уравнений в соответствии с методом узловых напряжений. Эта система для процесса проектирования записывается в следующей форме:

$$(1-u_j)g_j(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7) = 0, j = 1, 2, 3.$$

Результаты анализа полного набора возникающих стратегий проектирования при постоянном управляющем векторе для каждой стратегии представлены в табл. 1. При этом имеется $2^3=8$ различных стратегий. Первая строка таблицы соответствует традиционной стратегии оптимизации цепи. Последняя строка соответствует модифицированной традиционной стратегии. Остальные стратегии суть новые, появившиеся в рамках новой методологии.

Таблица 1

N	Вектор управляющих функций $U(u_1, u_2, u_3)$	Число итераций	Полное процессорное время (сек)
1	(0 0 0)	59	0.229
2	(0 0 1)	167	0.273
3	(0 1 0)	174	0.291
4	(0 1 1)	185	0.154
5	(1 0 0)	63	0.122
6	(1 0 1)	198	0.245
7	(1 1 0)	228	0.258
8	(1 1 1)	293	0.176

Процессорное время для традиционной стратегии с управляющим вектором (000) составляет 0,229 с. Стратегия 5 с управляющим вектором (100) является оптимальной по времени среди всех представленных. Она имеет выигрыш по времени 1,87 раза по сравнению с традиционной стратегией, однако не является оптимальной в общем. Оптимальная, а точнее квазиоптимальная стратегия была найдена путем вариации управляющего вектора U . Полный комплект различных стратегий проектирования табл. 1 в этом случае служит в

качестве структурного базиса для поиска оптимальной стратегии. Результаты этого поиска представлены в табл. 2.

Таблица 2

Оптимальный вектор управляющих функций $U(u_1, u_2, u_3)$	Число итераций	Точки переключения	Полное процессорное время (сек)	Выигрыш по времени счета
(101); (000); (111)	81	3; 7	0,0636	3,6

Квазиоптимальная стратегия содержит две точки переключения управляющего вектора, и полное процессорное время в этом случае равно 0.0636 с. Эта стратегия имеет выигрыш во времени 3.6 раза по сравнению с традиционной стратегией. Структура и поведение управляющих функций для этого оптимального случая приведены на рис. 2, где t_k – время окончания процесса проектирования.

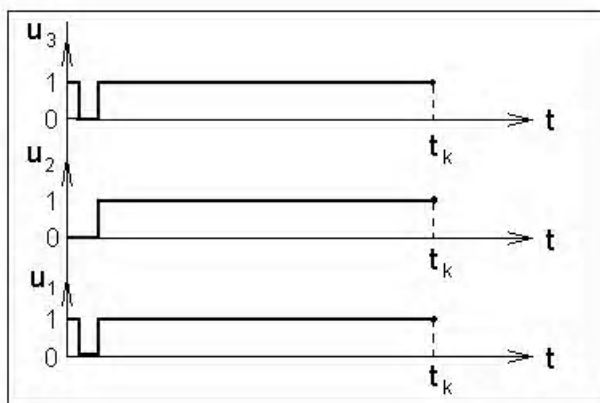


Рис. 2. Оптимальные зависимости управляющих функций

Схема трехкаскадного транзисторного усилителя с семью независимыми переменными ($K=7$) и семью зависимыми переменными ($M=7$) представлена на рис. 3.

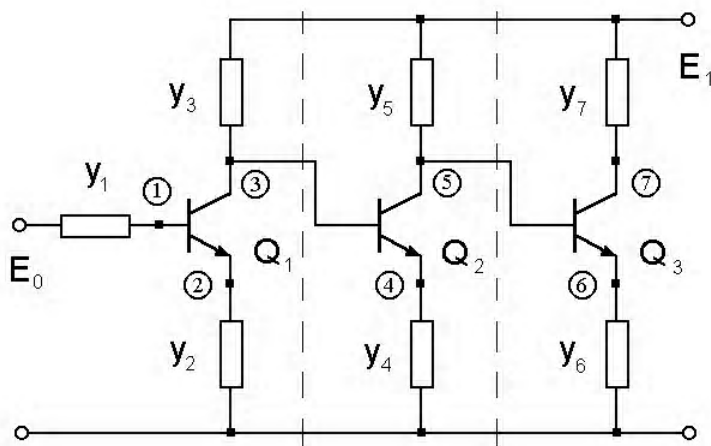


Рис. 3. Схема трехкаскадного транзисторного усилителя, $K=7$, $M=7$

Независимыми переменными являются проводимости $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7$, ($K=7$), а зависимыми переменными – узловые напряжения $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7$, ($M=7$). Управляющий вектор U включает также семь компонент. Основная система процедуры оптимизации (7) включает 14 уравнений, и модель электронной цепи (4) включает 7 уравнений. Процесс проектирования реализован на постоянном токе с учетом статической модели Эберса-Молла [21] для каждого транзистора. Целевая функция $C(X)$ определена суммой квадратов разностей между априори заданными и текущими значениями напряжений на переходах транзисторов.

Структурный базис этого примера включает $2^7=128$ различных стратегий. Результаты проектирования для традиционной стратегии и некоторых стратегий, имеющих процессорное время меньше, чем традиционная, даны в табл. 3.

Таблица 3

N	Вектор управляющих функций $U(u_1, u_2, \dots, u_7)$	Число итераций	Полное процессорное время (сек)
1	(0 0 0 0 0 0 0)	6379	321.09
2	(0 0 1 0 1 0 1)	922	54.53
3	(0 0 1 0 1 1 0)	1667	80.71
4	(0 0 1 0 1 1 1)	767	35.35
5	(0 0 1 1 1 0 0)	3024	159.67
6	(0 0 1 1 1 0 1)	823	37.73
7	(0 0 1 1 1 1 0)	3068	86.87
8	(0 0 1 1 1 1 1)	553	15.75
9	(0 1 1 0 0 0 0)	2465	83.04
10	(0 1 1 0 1 0 0)	1247	32.48
11	(0 1 1 0 1 1 1)	501	8.82
12	(0 1 1 1 1 0 0)	2643	72.66
13	(0 1 1 1 1 0 1)	507	9.24
14	(0 1 1 1 1 1 0)	3070	67.27
15	(1 0 1 0 1 0 1)	1345	28.07
16	(1 0 1 0 1 1 1)	615	10.01
17	(1 0 1 1 1 0 1)	699	10.71
18	(1 0 1 1 1 1 1)	366	4.97
19	(1 1 1 0 1 0 1)	789	10.43
20	(1 1 1 0 1 1 0)	3893	61.53
21	(1 1 1 0 1 1 1)	749	7.71
22	(1 1 1 1 1 0 0)	4325	90.72
23	(1 1 1 1 1 0 1)	796	8.47
24	(1 1 1 1 1 1 0)	2149	29.26
25	(1 1 1 1 1 1 1)	2031	5.67

Надо заметить, что примерно треть стратегий из 128 имеют процессорное время больше, чем традиционная стратегия, а часть из них вообще не приводит к завершению процесса проектирования при погрешности минимизации функции цели менее 10^{-8} . Стратегия 18 является оптимальной из всего структурного базиса, однако, как и в предыдущем примере, она не является оптимальной в целом. Эта стратегия обеспечивает выигрыш машинного времени в 64.6 раза по сравнению с традиционной. Квазиоптимальная стратегия была получена путем тщательного анализа возможных вариаций управляющего вектора U . Результаты этого анализа приведены в табл. 4.

Таблица 4

Оптимальный вектор управляющих функций $U(u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7)$	Число итераций	Точки переключения	Полное процессорное время (сек)	Выигрыш по времени счета
(1111111); (1111101)	363	350	1.127	285

Управляющий вектор этой стратегии имеет одну точку переключения. Выигрыш во времени составляет 285 раз. Этот результат позволяет сделать вывод, что потенциальный выигрыш во времени, который возможно получить от оптимальной или квазиоптимальной стратегии, возрастает при усложнении и увеличении размеров проектируемой системы.

В последнем примере для нахождения квази-оптимальной стратегии мы были вынуждены анализировать 128 различных стратегий и на их основе, с учетом возможных вариаций управляющего вектора, конструировать квазиоптимальную траекторию. Ясно, что такой подход правомочен при доказательстве существования стратегий и соответствующих им траекторий, обеспечивающих время меньшее, чем традиционный подход, однако он совершенно не приемлем для реального построения оптимальных стратегий. Потенциальные возможности могут быть реализованы только в случае построения оптимального алгоритма, позволяющего с самого начала и в каждый текущий момент двигаться вдоль опти-

мальной траектории. На данном этапе приоритетными проблемами являются изучение внутренних свойств и возможных ограничений, присущих оптимальному алгоритму, и выработка механизмов, позволяющих производить селекцию различных траекторий проектирования.

4. Заключение

Традиционный алгоритм проектирования систем не является оптимальным по времени. Задача конструирования оптимального алгоритма может быть решена адекватно на основе построения теории оптимального проектирования. Подобная теория может быть развита на основе формулировки проблемы в терминах теории управления. В этом случае необходимо найти оптимальную траекторию проектирования из практически бесконечного множества траекторий, рожденных в рамках обобщенного подхода. Этот поиск может быть осуществлен посредством конструирования оптимального управляющего вектора на основе исследования свойств оптимальной траектории.

Список литературы: 1. Bunch J.R., Rose D.J. Sparse matrix computations. New York: Acad. Press, 1976. 2. Wu F.F. Solution of large-scale networks by tearing // IEEE Trans. Circuits Syst. 1976. Vol. CAS-23, № 12. P. 706-713. 3. Sangiovanni-Vincentelli A., Chen L.K., Chua L.O. An efficient cluster algorithm for tearing large-scale networks // IEEE Trans. Circuits Syst. 1977. Vol. CAS-24, № 12. P. 709-717. 4. Ruehli A., Sangiovanni-Vincentelli A., Rabbat G. Time analysis of large-scale circuits containing one-way macromodels // IEEE Trans. Circuits Syst. 1982. Vol. CAS-29, № 3. P. 185-191. 5. Fletcher R. Practical methods of optimization. New York: John Wiley and Sons, 1980. 6. Brayton R.K., Hachtel G.D., Sangiovanni-Vincentelli A.L. A survey of optimization techniques for integrated-circuit design // Proc. IEEE. 1981. Vol. 69, P. 1334-1362. 7. Massara R.E. Optimization methods in electronic circuit design. Harlow. Longman Scientific & Technical, 1991. 8. Nagel L.W. SPICE2: A computer program to simulate semiconductor circuits. Electronic Research Laboratory, Rep. No. ERL-M520, University of California Berkeley. 1975. 9. Ильин В.И. Ителлектуализация САПР // Изв. высш. учеб. заведений. Радиоэлектроника. 1987. Т. 30, № 6. С. 5-13. 10. Сигорский В.П. Проблемная адаптация в системах автоматизированного проектирования // Изв. высш. учеб. заведений Радиоэлектроника. 1988. Т. 31, № 6. С. 5-22. 11. Петренко А.И. Комплексность и адаптивность современных систем автоматизированного проектирования // Изв. высш. учеб. заведений. Радиоэлектроника. 1988. Т. 31, № 6. С. 27-31. 12. Норенков И.П. Разработка структур САПР // Изв. высш. учеб. заведений. Радиоэлектроника, 1989. Т. 32, № 6. С. 25-29. 13. Каширский И.С., Трохименко Я.К. Обобщенная оптимизация электронных схем. Киев: Техника, 1979. 14. Rizzoli V., Costanzo A., Cecchetti C. Numerical optimization of broadband nonlinear microwave circuits // IEEE MTT-S Int. Symp. 1990. Vol. 1. P. 335-338. 15. Ochotta E.S., Rutenbar R.A., Carley L.R. Synthesis of high-performance analog circuits in ASTRX/OBLX // IEEE Trans. on CAD. 1996. Vol. 15, № 3. P. 273-294. 16. Zemliak A.M. Analog system design problem formulation by optimum control theory // IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2001. Vol. E84-A, № 8. P. 2029-2041. 17. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе П.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1969. 18. Neustadt L.W. Synthesis of time-optimal control systems // J. of Math. Analysis and Applications. 1960. № 1. P. 484-492. 19. Крылов И.А., Черноусько Ф.Л. Алгоритм метода последовательных приближений для задач оптимального управления // ЖВМ и МФ. 1972. Т. 12, № 1. С. 14-34. 20. Федоренко Р.П. Приближенное решение задач оптимального управления. М.: Наука, 1969. 21. Massobrio G., P. Antognetti P. Semiconductor device Modeling with SPICE, New York: Mc. Graw-Hill, Inc., 1993.

Поступила в редколлегию 05.02.2009

Земляк Александр Михайлович, канд. техн. наук, доцент Физико-технического института, Национальный технический университет Украины «КПИ». Научные интересы: анализ и проектирование ВЧ и СВЧ электронных цепей, моделирование, анализ и оптимизация СВЧ приборов, оптимальное проектирование электронных систем. Адрес: Украина, 03056, Киев, пр. Перемоги, 37, корп. 11, тел. +038 044 2416804. E-mail: azemliak@mail.ru.

Маркина Татьяна Михайловна, ассистент Физико-технического института, Национальный технический университет Украины «КПИ». Научные интересы: оптимальное проектирование электронных систем. Адрес: Украина, 03056, Киев, пр. Перемоги, 37, корп. 11, тел. +038 044 2416804. E-mail: martm@inbox.ru.