

Анализ эффекта ускорения при оптимизации электронных цепей

А.М. Земляк^{1,2}, Т.М. Маркина¹

¹Национальный технический университет Украины «КПИ», Украина, Киев

²Автономный университет Пуэбла, Мексика, Пуэбла, azemliak@yahoo.com

Аннотация — На основе обобщенной теории проектирования электронных цепей выявлен и проанализирован эффект дополнительного ускорения процесса оптимизации, возникающий вследствие различного поведения траекторий проектирования при изменении вектора управляющих функций. Эффект проявляется для всех анализируемых цепей и позволяет дополнительно сократить затраты машинного времени.

Ключевые слова — Оптимизация цепей, теория управления, эффект ускорения.

I. ВВЕДЕНИЕ

Сокращение процессорного времени является одной из существенных проблем проектирования БИС. Время, необходимое для анализа модели электронной системы, и время самой процедуры оптимизации, растет с увеличением сложности системы.

Известные традиционные методы сокращения необходимого времени анализа системы [1]-[9] практически исчерпали свои потенциальные возможности. Можно сказать, что эти идеи 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 была уже предложена в работе [10]. Этот процесс был основан на идее игнорирования законов Кирхгофа. При этом требовалось, помимо минимизации целевой функции процесса проектирования, минимизировать также невязку системы уравнений модели цепи. В своем крайнем случае, когда в невязку включались все уравнения модели цепи, эта идея была практически реализована в двух системах проектирования, [11] и [12]-[13]. Эта 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, не включающая анализ модели в процессе оптимизации.

Дальнейшее обобщение задачи проектирования может быть формализовано на основе применения теории управления [14]. Эта методология обобщает

задачу проектирования и определяет процедуру оптимизации 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 оптимизации, обладающих различным процессорным временем. Процесс построения оптимального по времени алгоритма проектирования системы сводится к задаче поиска оптимального управления, т.е. к типичной задаче теории управления. Этот подход, с одной стороны, обобщает процесс проектирования, а с другой, позволяет проанализировать движение текущей точки процесса проектирования в фазовом пространстве переменных. В рамках этой концепции, традиционная стратегия проектирования является лишь одним из возможных представителей множества различных стратегий проектирования. Как показано в работах [14]-[15], потенциальный выигрыш машинного времени, который может быть получен для оптимальной стратегии проектирования, по сравнению с традиционной возрастает с увеличением размера и сложности электронных цепей. Однако, этот потенциальный выигрыш реализуется на практике лишь в случае построения алгоритма, выделяющего оптимальную траекторию процесса проектирования.

В данной работе анализируются новый эффект, возникающий в процессе проектирования цепей методами теории управления. Исследование проводится начиная с простейшей нелинейной цепи с одним узлом и всего лишь двумя параметрами ($N=2$), которая не имеет практического значения, но служит хорошей иллюстрацией для понимания процессов, происходящих при проектировании цепей на основе новой методологии. Затем анализируется N -мерная задача. Все рассмотренные примеры демонстрируют наличие дополнительного эффекта ускорения процесса проектирования, возникающего вследствие различного поведения траекторий проектирования, имеющих различные управляющие функции.

II. ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Задача проектирования 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 все цели проектирования.

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

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

Такая постановка задачи правомочна в случае проектирования системы, работающей в стационарном режиме. В этом случае, применительно к электронным нелинейным цепям, сначала решается задача проектирования по постоянному току для определения рабочей точки.

Вектор X может быть разбит на две части: $X = (X', X'')$, где вектор $X' \in R^K$ является вектором независимых переменных, K есть число независимых переменных, вектор $X'' \in R^M$ является вектором зависимых переменных, M есть число зависимых переменных и $N = K + M$. Разбиение вектора X на зависимые и независимые переменные является достаточно условным, т.к. 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.

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 [14] 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:

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

Структура штрафной функции $\varphi(X)$ должна содержать информацию об уравнениях, исключенных из системы (1). Крайний случай, когда все уравнения системы (1) удалены, можно идентифицировать как модифицированную традиционную стратегию проектирования. Именно эта стратегия применялась в системах проектирования [11]-[13]. 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 [15], 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 (4)-(5):

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

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

где вектор направленного движения H зависит не только от вектора X , но также от дополнительного управляющего 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, например, следующей формулой:

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

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 всех этих стратегий существует одна или несколько стратегий, достигающих все цели 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.

Компоненты вектора H можно задать, например для градиентного метода, следующими функциями:

$$f_i(X, U) = -\frac{\delta}{\delta x_i} F(X, U), \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (7)$$

$$f_i(X, U) = -u_{i-K} \frac{\delta}{\delta x_i} F(X, U) + \frac{(1-u_{i-K})}{dt} [-\dot{x}_i + \eta_i(X)] \quad (7')$$

$$i = K + 1, K + 2, \dots, N,$$

где оператор $\frac{\delta}{\delta x_i}$ здесь и далее означает

$$\frac{\delta}{\delta x_i} \varphi(X) = \frac{\partial \varphi(X)}{\partial x_i} + \sum_{p=K+1}^{K+M} \frac{\partial \varphi(X)}{\partial x_p} \frac{\partial x_p}{\partial x_i}, \quad x_i^s$$

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). В случае применения не градиентного, а иного метода оптимизации, правые части $f_i(X, U)$ необходимо задать формулами, соответствующими этому методу. Системы (4)-(7) определяют процесс проектирования (оптимизации) электронной цепи. Формулы (5), (7) определяют процесс эволюции для независимых переменных и формулы (5), (7') 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

неограниченного числа различных траекторий проектирования, порожденных системами (4), (5).

Для минимизации компьютерного времени необходимо найти оптимальное поведение управляющих переменных u_j в течение процесса проектирования. Задача минимизации функционала (процессорного времени) для системы (5), (7) с не непрерывными или не гладкими функциями $f_i(X, U)$ может быть сформулирована адекватно на основе известного принципа максимума Понтрягина [16]. Однако проблема применения принципа максимума упирается в неизвестные начальные значения дополнительных функций сопряженной системы. Эта проблема имеет адекватное решение только в случае линейных функций $f_i(X, U)$, как например в работе [17]. В нелинейном случае применяются приближенные итерационные алгоритмы [18]-[19].

III. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим задачу проектирования (оптимизации) простейшей электронной цепи с одним узлом, изображенной на Рис. 1.

Полагаем, что элемент R_n подчиняется нелинейной зависимости следующего вида: $R_n = r_{10} + b_n \cdot V_1^2$. Для этого примера определены только два параметра: сопротивление R_1 как независимый параметр ($K=1$) и узловое напряжение V_1 как зависимый параметр ($M=1$). В этом примере и в последующих предполагается также, что все сопротивления (проводимости) являются положительными. Для автоматического выполнения последнего требования можно использовать следующее определение вектора X : $X = (x_1, x_2)$, где $x_1^2 \equiv R_1$, $x_2 \equiv V_1$. В этом случае уравнение, соответствующее цепи, задается следующей формулой: $x_2 = x_1^2 / (x_1^2 + r_{10} + b_n x_2^2)$. В стандартной форме модель цепи запишется следующим уравнением:

$$g_1(X) \equiv (x_1^2 + r_{10} + b_n x_2^2)x_2 - x_1^2 = 0. \quad (8)$$

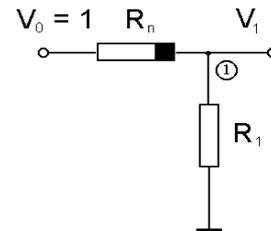


Рис. 1. Простейшая цепь с одним узлом

Целевую функцию процесса проектирования зададим в виде: $C(X) = (x_2 - k_v)^2$, где k_v имеет фиксированное значение. В этом случае вектор управляющих функций содержит только компоненту u_1 , т.к. имеется только один зависимый параметр x_2 . Траектории проектирования в этом случае являются кривыми в двумерном пространстве.

Процедура оптимизации и модель цепи в соответствии с предложенной методологией [14] задаются уравнениями (4)-(7) где $N=2$, $t_s \in R^1$, U есть управляющий вектор, состоящий в данном случае из одной компоненты, и функции $f_i(X, U)$ для $i = 1, 2$, представляющие компоненты вектора направленного движения, определяются выбранным методом оптимизации. Эти функции, например для градиентного метода, определяются следующими формулами:

$$f_1(X, U) = -\frac{\delta}{\delta x_1} F(X, U) \quad (9)$$

$$f_2(X, U) = -u_1 \frac{\delta}{\delta x_2} F(X, U) + \frac{(1-u_1)}{t_s} [-x_2^s + \eta_2(X)], \quad (9')$$

где $F(X, U)$ обобщенная функция цели, задаваемая формулой, $F(X, U) = C(X) + \frac{1}{\varepsilon} u_1 g_1^2(X)$, $\eta_2(X)$ неявная форма функции, задающей решение уравнения (8), $(x_2^{s+1} = \eta_2(X))$ и оператор $\frac{\delta}{\delta x_i}$

для $i = 1, 2$ определен следующим образом:

$$\frac{\delta}{\delta x_1} F = \frac{\partial F}{\partial x_1} + \frac{\partial F}{\partial x_2} \frac{\partial x_2}{\partial x_1}, \quad \frac{\delta}{\delta x_2} F = \frac{\partial F}{\partial x_2}.$$

Базис различных стратегий проектирования состоит в данном случае из двух стратегий, при $u_1=0$ и $u_1=1$. Первая стратегия является традиционной стратегией проектирования (ТСП) и вторая – модифицированной традиционной стратегией проектирования (МТСП). Траектории проектирования при значении параметра нелинейности $b_n = 1,0$ и начальной точки $X^0 = (1,1)$ изображены на Рис. 2 (а), сплошной линией – для ТСП, пунктирной – для МТСП. Число итераций и процессорное время в первом случае равны соответственно 44 и $0,092_{10}^{-3}$ сек., и во втором случае равны 78 и $0,149_{10}^{-3}$ сек. В данном случае традиционная стратегия является предпочтительной.

Незначительное уменьшение времени проектирования (5%) можно получить при изменении управляющей функции u_1 в процессе движения со значения 0 на 1 на шаге 18. Иной результат имеется в

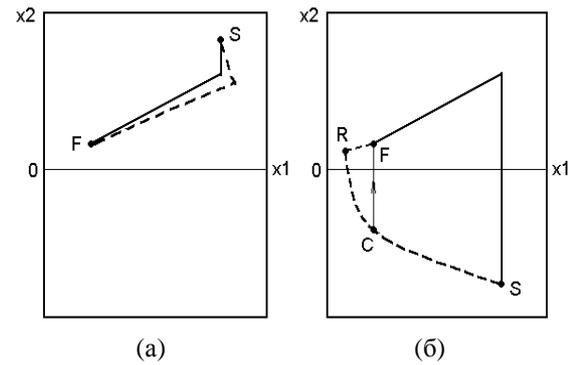


Рис. 2. Траектории ТСП и МТПС при положительном (а) и отрицательном (б) значениях координаты x_2

случае выбора отрицательного значения начального приближения для переменной x_2 , например -1, т.е.

$X^0 = (1, -1)$. Траектории, соответствующие этому случаю, изображены на Рис. 2 (б). Траектория, соответствующая ТСП, практически не изменяется. В первом случае мы имели скачок сверху вниз из точки начального приближения на линию, соответствующую согласованному решению уравнения (8), а во втором имеется скачок на ту же линию снизу вверх. Поскольку скачок совершается мгновенно, время в обоих случаях одинаково. Иная ситуация наблюдается с траекторией МТСП. При отрицательном начальном значении переменной x_2 ($x_2 = -1$) первая часть траектории лежит в физически

нереальном, отрицательном по переменной x_2 полупространстве, а вторая часть в положительном. Число итераций и процессорное время равны 288 и $0,553_{10}^{-3}$ сек. Важно также отметить, что движение текущей точки по первой части траектории из начальной точки S в точку R осуществляется довольно быстро, а затем замедляется. Общее время при этом больше, чем в случае положительного начального приближения. Весьма важно, что траектории двух разных стратегий подходят к конечной точке процесса проектирования F с противоположных сторон. Создается уникальная возможность ускорения процесса при переключении управляющей функции u_1 со значения 1 на 0 в точке C , являющейся проекцией конечной точки F на траекторию, соответствующую МТСП. В этом случае оптимальная стратегия имеет две части. Первая часть, являющаяся кривой SC , соответствует значению $u_1=1$ и МТСП и лежит в физически нереальном пространстве. В точке C значение управляющей функции u_1 меняется на 0, и при этом осуществляется скачок в конечную точку F или довольно близко к ней, что зависит от шага интегрирования системы (5) и заданной точности. Вторая часть траектории, начинающаяся в точке C и,

соответствующая значению $u_1=0$ и ТСП, таким образом, вырождается или в скачок, и при этом имеется только один дополнительный шаг, или еще несколько дополнительных шагов, соответствующих ТСП. При этом наблюдается значительный эффект ускорения процесса проектирования. Число итераций для анализируемого примера, соответствующих $u_1=1$ равно 9 и один шаг (скачок), соответствующий $u_1=0$. Время, соответствующее таким образом построенной оптимальной траектории, равно $0,0194_{10}^{-3}$ сек., что соответствует ускорению процесса в 4,7 раза. Эффект ускорения наблюдается и для более сложных примеров. Однако в этом случае траектории процесса лежат в N -мерном пространстве, и необходимо анализировать различные проекции N -мерных кривых.

Рассмотрим процесс проектирования усилителя на транзисторах (Рис. 3). В качестве модели транзистора использовалась статическая модель Эберса-Молла, реализуемая в системе SPICE [20]. Целевая функция определена как сумма квадратов разностей между заранее заданными и текущими значениями напряжений на переходах транзисторов.

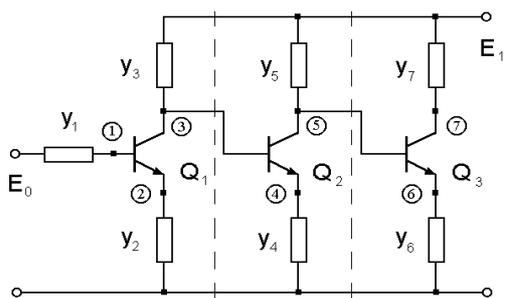


Рис. 3. Трехкаскадный транзисторный усилитель

В этом случае имеется возможность провести процесс оптимизации цепи для трех различных случаев: однокаскадного, двухкаскадного и трехкаскадного усилителей. В первом случае можно определить три независимых переменных, проводимости y_1, y_2, y_3 , ($K=3$) и три зависимых переменных, узловые напряжения V_1, V_2, V_3 , ($M=3$), во втором – имеется пять независимых и пять зависимых переменных, и в третьем – семь независимых и семь зависимых переменных. Базис стратегий проектирования содержит 8 различных стратегий проектирования в первом случае, 32 стратегии – во втором и 128 – в третьем.

Имеется множество различных квазиоптимальных решений при различном выборе стратегий из базиса и различных начальных значениях вектора X . Выбор наиболее перспективных стратегий проектирования осуществлялся на основе анализа проекций траекторий на плоскости $y_3 - V_3$ для первого случая,

$y_5 - V_5$ для второго, и $y_7 - V_7$ для третьего. В соответствии с общей идеей построения квазиоптимальной траектории [21], для первой части оптимальной траектории выбиралась одна из стратегий, относящаяся к группе стратегий, имеющих траектории подобные МТСП. Для осуществления скачка выбиралась стратегия, имеющие траектории подобные ТСП. Во всех трех случаях квазиоптимальная стратегия включала два переключения в управляющем векторе. Данные, соответствующие квазиоптимальным стратегиям, для всех трех случаев оптимизации усилителей приведены в таблице 1 для двух различных методов оптимизации – градиентного метода и метода Давидона-Флетчера-Пауэлла (ДФП). При оптимизации однокаскадного усилителя ($N_{TR}=1$) и использовании квазиоптимальной стратегии получен выигрыш во времени по сравнению с ТСП более ста раз для обоих методов оптимизации. Для двухкаскадного усилителя ($N_{TR}=2$) выигрыш составляет почти тысячу раз для градиентного метода и более 600 раз для метода ДФП. Для трехкаскадного усилителя ($N_{TR}=3$) выигрыш составляет более 7000 раз для градиентного метода и более 4000 раз для метода ДФП.

Результаты оптимизации этих активных цепей представлены на Рис. 4 в виде зависимости выигрыша во времени G от числа каскадов усилителя N_{TR} для градиентного метода (кривая 1) и метода ДФП (2). Видно, что полученный выигрыш увеличивается при увеличении размера и сложности цепи.

Таблица 1

Квазиоптимальные стратегии проектирования

S	Метод	Оптимальный вектор управляющих функций U	Число итер.	Точки перекл.	Время (сек)	Выигрыш во времени
1	Градиентный	(111); (000); (111)	1341	5; 6	0,083	166
	ДФП	(111); (000); (111)	230	2; 3	0,036	154
2	Градиентный	(1111); (01000); (11111)	499	1; 2	0,261	966
	ДФП	(1111); (00000); (11111)	222	1; 2	0,098	639
3	Градиентный	(111111); (000000); (1111111)	5090	10; 11	1,82	7721
	ДФП	(111111); (000000); (1111111)	462	2; 3	0,33	4306

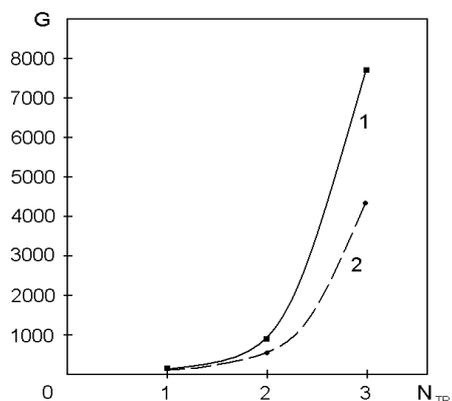


Рис. 4. Выигрыш по времени оптимальной стратегии

Проведенные исследования показывают, что структура квазиоптимальной траектории проектирования должна включать условия для достижения дополнительного эффекта ускорения процесса. Одним из таковых условий является правильный выбор начального приближения, т.е. наличие в начальном значении вектора переменных X по крайней мере одной отрицательной компоненты среди первоначально зависимых переменных, в нашем случае узловых напряжений. Вторым условием является правильный выбор последовательности стратегий проектирования в процессе построения оптимальной траектории. Здесь имеется в виду выбор на начальном этапе одной из стратегий, имеющей траекторию подобную МТСП, и затем смену ее на стратегию, имеющую траекторию подобную ТСП. Дополнительные изменения управляющего вектора способны приблизиться ближе к оптимальной по времени стратегии. Третье и самое существенное условие – это определение точного момента переключения вектора управляющих функций. Эта задача может быть решена с привлечением приближенных методов теории оптимального управления [19] и в данный момент является открытой.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показывают, что структура квазиоптимальной траектории проектирования должна базироваться на дополнительном эффекте ускорения процесса. Одним из условий появления этого эффекта является правильный выбор начального приближения, т.е. наличие в начальном значении вектора переменных X , по крайней мере, одной отрицательной компоненты. Вторым условием является правильный выбор последовательности стратегий проектирования в процессе построения оптимальной траектории. Здесь имеется в виду выбор на начальном этапе одной из стратегий, имеющей траекторию подобную МТСП, и затем смену ее на стратегию, имеющую траекторию подобную ТСП. Дополнительные изменения управляющего вектора способны приблизиться ближе к оптимальной по времени траектории. Третье и самое существенное условие – это определение точного момента переключения вектора управляющих функций.

Сформулированные выше условия можно определить как достаточные условия для получения дополнительного эффекта ускорения процесса проектирования. Результаты, полученные в работе, являются важным шагом к выявлению структуры оптимальной по времени стратегии проектирования цепи и служат основой для поиска оптимального, или точнее квазиоптимального по времени алгоритма проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bunch J.R., Rose D.J. Eds. Sparse matrix computations. - N.Y.: Acad. Press, 1976.
- [2] Osterby O., Zlatev Z. Direct methods for sparse matrices. - N.Y.: Springer-Verlag, 1983.
- [3] George A. On block elimination for sparse linear systems // SIAM J. Numer. Anal. - 1984. - V. 11. - № 3. - P. 585 – 603.
- [4] Wu F.F. Solution of large-scale networks by tearing // IEEE Trans. Circuits Syst. - 1976. - V. 23. - № 12. - P. 706 – 713.
- [5] Sangiovanni-Vincentelli A., Chen L.K., Chua L.O. An efficient cluster algorithm for tearing large-scale networks // IEEE Trans. Circuits Syst. - 1977. - V. 24. - № 12. - P. 709 – 717.
- [6] Ruehli A., Sangiovanni-Vincentelli A., Rabbat G. Time analysis of large-scale circuits containing one-way macromodels // IEEE Trans. Circuits Syst. - 1982. - V. 29. - № 3. - P. 185 – 191.
- [7] Fletcher R. Practical methods of optimization. - N.Y.: John Wiley and Sons, 1980.
- [8] Brayton R.K., Hachtel G.D., Sangiovanni-Vincentelli A.L. A survey of optimization techniques for integrated-circuit design // Proc. IEEE. - 1981. - V. 69. - P. 1334 – 1362.
- [9] Massara R.E. Optimization methods in electronic circuit design. - Harlow: Longman Scientific & Technical, 1991.
- [10] Каширский И.С., Трохименко Я.К. Обобщенная оптимизация электронных схем. - Киев: Техника, 1979.
- [11] Rizzoli V., Costanzo A., Cecchetti C. Numerical optimization of broadband nonlinear microwave circuits // IEEE MTT-S Int. Symp. - 1990. - V. 1. - P. 335 – 338.
- [12] Ochotta E.S., Carley L.R., Rutenbar R.A. Analog circuit synthesis for large, realistic cells: Designing a pipelined A/D converter with ASTRX/OBLX // Custom Integrated Circuits Conf. - 1994. - V.15. - № 4. - P. 1 – 4.
- [13] Ochotta E.S., Rutenbar R.A., Carley L.R. Synthesis of high-performance analog circuits in ASTRX/OBLX // IEEE Trans. on CAD. - 1996. - V. 15. - № 3. - P. 273 – 294.
- [14] Zemliak A.M. Analog system design problem formulation by optimum control theory // IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences. - 2001. - V. E84A. - № 8. - P. 2029 – 2041.
- [15] Земляк А.М., Проектирование аналоговых цепей методами теории управления // Изв. высш. учеб. заведений Радиоэлектроника. - 2004. - Т. 47. - № 5. - С. 18 – 28.
- [16] Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. - М.: Наука, 1969.
- [17] Neustadt L.W. Synthesis of time-optimal control systems // J. of Math. Analysis and Applications. - 1960. - № 1. - P. 484 – 492.
- [18] Rosen J.B. Iterative solution of nonlinear optimal control problems // J. SIAM Control Series A. - 1966. - P. 223 – 244.
- [19] Крылов И.А., Черноусько Ф.Л. Алгоритм метода последовательных приближений для задач оптимального управления // ЖВМ и МФ. - 1972. - Т. 12. - № 1. - P. 14 – 34.
- [20] Massobrio G., P. Antognetti P. Semiconductor device Modeling with SPICE. - N.Y.: Mc. Graw-Hill, Inc., 1993.
- [21] A.M. Zemliak, Acceleration effect of system design process // IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences. – 2002. - V. E85-A. - № 7. – P. 1751-1759.