

К. т. н. А. В. КАРПУХИН, В. Н. БАВЫКИН,
И. А. РЕВЕНЧУК, к. т. н. Г. Г. ЧЕТВЕРИКОВ

Дата поступления в редакцию
09.04 1999 г.
Оппонент д. т. н. В. И. ХАХАНОВ

Украина, г. Харьков, Гос. техн. ун-т радиоэлектроники

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ГИС НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ ЦЕПЕЙ

Приведено решение задачи оптимизационного синтеза частотно-гармонического многоустойчивого элемента, имеющего максимальное число устойчивых состояний.

Solution of the problem of optimisation synthesis of harmonic frequency, polystable element that has maximum number of stable states has been indicated.

Устройства преобразования и передачи данных с частотным кодированием информации являются перспективными для повышения надежности и достоверности передачи информации в системах управления, связи, сетях ЭВМ и т. д.

Одним из направлений в создании высоконадежных микроэлектронных устройств вычислительной техники и систем управления является разработка многофункциональных частотных элементов на основе нелинейных резонансных цепей. (Многофункциональность таких элементов при их схемной простоте определяется не количеством компонентов и сложностью структурной организации, а целенаправленным использованием многочисленных эффектов, имеющих место в нелинейных колебательных цепях.)

В нелинейных резонансных цепях (НРЦ) в качестве перестраиваемого реактивного компонента колебательных контуров используется полупроводниковый конденсатор как наиболее перспективный с точки зрения возможности микроминиатюризации. Математические модели резонансных цепей с полупроводниковой емкостью имеют вид нелинейных дифференциальных уравнений, близких к уравнению гармонического осциллятора [1–3].

НРЦ описываются нелинейными дифференциальными уравнениями достаточно сложного вида, которые содержат малые нелинейные члены с производными не только первого, но и более высоких порядков. При наличии в НРЦ обратной связи добавляется дифференциальное уравнение первого порядка, описывающее цепь обратной связи.

Существующие методы решения нелинейных дифференциальных уравнений можно разделить на аналитические и численные. Наиболее эффективными из приближенных аналитических методов являются асимптотические методы теории колебаний, в частности, метод

Боголюбова — Митропольского. Применение численных методов для непосредственного решения уравнений, описывающих высокочастотные НРЦ, является малоперспективным с точки зрения разумной скорости, точности вычислений и гарантии сходимости процесса. Кроме того, такой подход не позволяет использовать методы качественного анализа дифференциальных уравнений на фазовой плоскости, что в результате не обеспечивает необходимой наглядности результатов анализа.

Предлагается численно-аналитический подход, который заключается в поэтапном использовании аналитических и численных методов при моделировании НРЦ.

Аналитический этап включает в себя получение на ЭВМ исходного уравнения в аналитическом виде, качественное исследование поведения НРЦ в фазовом пространстве, вывод (в частных случаях) аналитических выражений для статических и динамических характеристик.

На *численном* этапе осуществляется анализ стационарного и динамического режимов резонансной цепи (позволяющий установить необходимые зависимости между параметрами схемы и ее статическими и переходными характеристиками при различных способах внешнего управления), а также оптимизация параметров НРЦ. Затем осуществляется решение уравнений при изменении параметров НРЦ в достаточно узких диапазонах требуемых режимов работы, определяемых в результате качественного анализа на первом этапе (что значительно уменьшает время моделирования по сравнению с прямым решением исходных уравнений, требующим практически полного перебора значений параметров во всей допустимой области их изменения).

В более узком смысле задачу оптимизации частотных элементов на основе НРЦ (ЧЭНРЦ) можно поставить как задачу поиска минимума функции $\Phi(x^0, \delta)$ на множестве $X^T \Delta$ (Δ — множество допусков, X^T — множество допустимых решений), считая структуру ЧЭНРЦ неизменной.

Найти:

$$\hat{Z} = (\hat{x}^0, \hat{\delta}) = (\hat{x}_1^0, \hat{x}_2^0, \dots, \hat{x}_l^0, \hat{\delta}_1, \hat{\delta}_2, \dots, \hat{\delta}_l);$$

$$\Phi(\hat{z}) = \min \Phi(z);$$

$$z \in D \subseteq R_n,$$

(1)

где x — вектор параметров ЧЭНРЦ;
 x^0 — вектор номинальных значений параметров ЧЭНРЦ;
 $\delta \in \Delta$ — вектор допусков на параметры ЧЭНРЦ;
 Φ — целевая функция;
 D — область допустимых решений;
 R_a — область работоспособности ЧЭНРЦ —

$$R_a = \left\{ \begin{array}{l} b_i(z) \leq 0, \quad i=1,2,\dots,k \\ d_n(z) = 0, \quad n=1,2,\dots,s \end{array} \right\};$$

$b_i(z)$ — функции-ограничения в виде неравенств;
 $d_n(z)$ — функции-ограничения в виде равенств;

$D: R\delta \subseteq R_a$;

$R\delta$ — специальным образом формируемая область допуска.

Компонентами вектора x являются значения конструктивно-технологических и электрофизических параметров ЧЭНРЦ. Область работоспособности R_a определена функциями-ограничениями в виде равенств и неравенств. Способы формирования области допуска $R\delta$ определяются целями проектирования и особенностями функций-ограничений. В конкретных случаях $R\delta$ представляет собой либо гиперпараллелепипед с центром в точке x^0 (размеры которого определяются компонентами вектора δ), либо множество его вершин.

Приведенная постановка охватывает семейство задач, каждая из которых отвечает некоторой цели проектирования и отличается видом функций $\Phi(z)$, $b_i(z)$, $d_n(z)$.

Одним из важнейших показателей качества проектируемых ГИС является вероятность работоспособности, количественно выражающаяся в величине выхода годных ИС. В строгой постановке задача проектирования в этом случае состоит в нахождении таких значений внутренних параметров ГИС и допусков на них, при которых вероятность работоспособности будет максимальной.

Основная трудность решения такой задачи заключается в вычислении многократных интегралов от многомерных функций плотности вероятности, при котором необходимо иметь информацию о законах распределения параметров компонентов ГИС. Вместе с тем в большинстве случаев проектировщик не знает законов распределения параметров компонентов ГИС для выбранного технологического процесса; ему известны лишь граничные значения этих параметров. При этом возникает задача «худшего случая».

Правомерность такой постановки задачи можно обосновать тем, что ЧЭНРЦ относятся к ГИС частного применения, для которых наиболее важным критерием в оценке качества является величина выхода годных, а вопросы стоимости являются второстепенными.

Рассмотрим задачу проектирования частотного элемента, имеющего максимально возможное число состояний. Такая задача возникает, например, при разработке преобразователей «напряжение — частота»

», используемых в системах автоматического контроля, измерения и сбора информации от удаленных датчиков.

Постановка задачи оптимизационного синтеза гибридно-интегрального частотно-гармонического многоустойчивого элемента (ЧГМЭ), имеющего максимально возможное число устойчивых состояний, имеет следующий вид.

Найти:

$$\hat{x}^0 = (\hat{x}_1^0, \hat{x}_2^0, \dots, \hat{x}_{10}^0) =$$

$$= (\hat{\Omega}_1^0, \hat{L}_1^0, \hat{C}_{k0}^0, \hat{\tau}^0, \hat{\varphi}_k^0, \hat{R}_i^0, \hat{\theta}^0, \hat{E}_1^0, \hat{\varphi}_k^0, \hat{C}_1^0);$$

$$W(x^0) = \min W(x^0);$$

$$x^0 \in D \subseteq R_a, \quad (2)$$

$$\text{где } R_a = \left\{ \begin{array}{l} 12,56 \cdot 10^3 \leq \Omega_1 \leq 188,4 \cdot 10^3 \text{ рад/с}; \\ 20 \leq E_1 \leq 60 \text{ В}; \\ C_{k0}/20 \leq C_1 \leq C_{k0}/10; \\ 50 \cdot 10^{-12} \leq C_{k0} \leq 10^{-9} \text{ Ф}; \\ 12,5 \cdot 10^{-6} \leq \tau \leq 14 \cdot 10^{-6} \text{ с}; \\ 0,2 \leq \varphi_k \leq 0,6 \text{ В}; \\ 0,4 \leq \varphi_k' \leq 1 \text{ В}; \\ 0 \leq R_i \leq 6 \cdot 10^3 \text{ Ом}; \\ 0 \leq \theta \leq \pi/2; \\ 10^{-3} \leq L \leq 3 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}; \\ 10^5 \leq f_0 \leq 3 \cdot 10^5 \text{ Гц}; \end{array} \right\}$$

$$R_\delta \subseteq R_a;$$

$$D: R_\delta = \{x | x_\alpha = x_\alpha^0 \pm x_\alpha^0 \delta_\alpha, \alpha=1, 2, \dots, 10\};$$

$$\delta_1 = \delta_2 = 0,05; \quad \delta_3 = \delta_4 = \dots = \delta_{10} = 0,2;$$

$W(x^0)$ — целевая функция, выражающаяся числом устойчивых состояний ЧГМЭ со знаком «—»;

x^0 — вектор номинальных значений параметров;

f_0 — резонансная частота;

$\Omega_1, L, C_{k0}, \tau, \varphi_k, R_i, \theta, E_1, \varphi_k', C_1$ — внутренние параметры ЧГМЭ.

Допуски на параметры Ω_1 и L были равны $\pm 5\%$, на остальные параметры — $\pm 20\%$.

В результате решения задачи (2) получены следующие значения компонент вектора x :

$$\Omega_1 = 13,19 \cdot 10^3 \text{ рад/с}; \quad C_1 = 55,6 \text{ пФ}; \quad L = 2,38 \text{ мГн};$$

$$R_\phi = 5,5 \text{ кОм}; \quad \varphi_k' = 0,39 \text{ В}; \quad E_1 = 34,6 \text{ В};$$

$$C_{k0} = 561,2 \text{ пФ}; \quad \tau = 13,64 \text{ мкс}; \quad \varphi_k = 0,8 \text{ В}; \quad \theta = 0,355.$$

При этих значениях параметров ЧГМЭ имеет пятнадцать устойчивых состояний, диапазон напряжений на потенциальном выходе $0,32 - 1,77$ В, диапазон частот $152 - 180$ кГц, диапазон напряжений на контуре $0,2 - 1,62$ В. Экспериментальные результаты отличаются от теоретических не более чем на 15% , причем число экспериментально наблюдаемых устойчивых состояний равно 15.

Для решения задачи (2) использовался метод скользящего допуска с поиском по деформируемому многограннику [4, с. 126], который не требует

вычисления производных целевой функции (что в данном случае затруднительно).

ЧГМЭ на основе колебательного контура с управляемой нелинейной емкостью можно использовать в качестве *элемента с частотным представлением информации для радиоимпульсных линий связи* [3].

Устройство выполнено в виде ГИС на основе бесконтурного нелинейного конденсатора и резонансной LC-структуры, представляющей собой планарную конструкцию в виде плоской спирали, расположенной над экраном с разрезами.

Задача проектирования LC-структуры рассматривалась как задача параметрического синтеза резонансной структуры при включении источника сигнала и нагрузки между отдельными секторами экрана и внешним заземленным витком.

В общем случае система характеризуется вектором

$$k = \langle k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 \rangle,$$

где $k_1 = G(x_1, \dots, x_n)$, $k_2 = f_0(x_1, \dots, x_n)$, $k_3 = Q_n(x_1, \dots, x_n)$, $k_4 = z_{вх}(x_1, \dots, x_n)$, $k_5 = z_{вых}(x_1, \dots, x_n)$, $G, f_0, Q_n, z_{вх}, z_{вых}$ — коэффициент передачи, резонансная частота, нагруженная добротность, входное и выходное сопротивление структуры, соответственно, (x_1, \dots, x_n) — параметры математической модели, характеризующие форму и положение секторов связи.

В результате решения задачи получены следующие значения электрических параметров структуры:

$$G = 0,45; Q_n = 48,3; f_0 = 512,8 \text{ МГц};$$

$$z_{вх} = 1,71 \text{ кОм}; z_{вых} = 1,69 \text{ кОм}.$$

Число устойчивых состояний, стабильность и надежность работы ЧГМЭ зависят от степени нелинейности емкости. К элементам с достаточно высокой степенью нелинейности относится МДП-структура, обладающая относительно высокой добротностью и значительным коэффициентом перекрытия.

Физические процессы, происходящие в ЧГМЭ, описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений, первое из которых описывает нелинейный колебательный контур, второе — цепь обратной связи:

$$\frac{d^2v}{dt^2} + \omega^2 v = \epsilon F_1 \left(v, \frac{dv}{dt}, \frac{d^2v}{dt^2}, E_{см}, S(t) \right); \quad (3)$$

$$\frac{dE_{см}}{dt} = F_2(v, E_{см}), \quad (4)$$

где v — нормированный заряд на емкости МДП-структуры;

$E_{см}$ — напряжение автоматического смещения, создаваемое постоянной составляющей тока через $p-n$ -переход, включенный параллельно МДП-структуре и имеющий значительно меньшую емкость;

$S(t)$ — полигармоническое внешнее воздействие.

Решение уравнения (3) было получено с помощью асимптотического метода Боголюбова — Митропольского.

На основе разработанной математической модели была решена задача проектирования ЧГМЭ с заданным числом устойчивых состояний как задача нелинейного программирования при наличии ограничений, обеспечивающих физическую реализуемость проектируемого элемента. В результате определены параметры схемы, питающего и управляющего напряжений, при которых частотно-гармонический многоустойчивый элемент имеет заданное число устойчивых состояний.

Разработанный элемент был применен в радиоимпульсной системе передачи информации внутри цифрового вычислительного комплекса.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

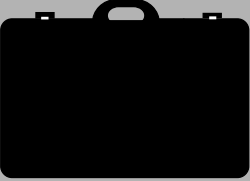
1. Карпухин А. В., Лоза Ю. Х., Яловега Г. И. Анализ режимов работы многофункциональных резонансных нелинейных элементов // Тез. докл. 9-й Междунар. конф. по нелинейным колебаниям. — Киев, 1981. — С. 378 — 379.

2. Карпухин А. В., Лоза Ю. Х., Яловега Г. И. Математическое моделирование и проектирование интегральных частотных элементов на основе нелинейных резонансных цепей // Автоматизация проектирования электронной аппаратуры. — Таганрог. — 1985. — Вып.6. — С. 53 — 55.

3. Александров В. В., Карпухин А. В., Лоза Ю. Х., Яловега Г. И. Машинное проектирование нелинейного резонансного элемента для частотных систем передачи данных // В кн.: Проблемы нелинейной электротехники. Ч. 2. — Киев : Наукова думка, 1981. — С. 125 — 127.

4. Химмельблау Д. М. Прикладное нелинейное программирование. — М. : Мир, 1975.

в портфеле редакции
в портфеле редакции
в портфеле редакции
в портфеле редакции



- Особенности развития производства интегральных микросхем в современных условиях. *А. А. Мерзвинский (Украина, г. Киев)*
- Проектирование, изготовление и монтаж специализированных БИС. *В. П. Грунянская, В. Д. Жора, Л. М. Солдатенко, И. А. Тучинский (Украина, г. Киев)*
- Решение задачи выбора оптимального варианта конструкции печатных узлов РЭС. *Л. И. Панов, А. А. Матвеев (Украина, г. Одесса)*
- Методика инженерного расчета акустооптического модулятора. *В. В. Данилов (Украина, г. Донецк)*
- Физические симуляторы мощных транзисторов. *З. Стевич (Югославия, г. Бор)*

в портфеле редакции

в портфеле редакции
в портфеле редакции
в портфеле редакции
в портфеле редакции