

А. В. КАРПУХИН, канд. техн. наук, *В. Я. ЖУРАВЛЕВ*, канд. техн. наук,
А. Д. МЕНЯЙЛО, канд. техн. наук, *О. И. ДОМРИН*

СКВОЗНОЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ЧАСТОТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ ЦЕПЕЙ

Одно из направлений в создании микроэлектронных устройств вычислительной техники и автоматики — разработка многофункциональных частотных элементов на основе нелинейных резонансных цепей (ЧЭНРЦ). Многофункциональность таких элементов при их схемной простоте определяется не количеством компонентов и сложностью структурной организации, а целенаправленным использованием многочисленных эффектов, имеющих место в нелинейных цепях [1; 2].

Проектирование изделий электронной техники (ИЭТ) содержит следующие основные этапы: структурное, схемотехническое, техническое. В силу упомянутых свойств ЧЭНРЦ автоматизация первого из указанных этапов, по существу, теряет смысл. Синтез структуры производится проектировщиком на основе всестороннего анализа данных о возможных в НРЦ физических явлениях, а также собственного опыта и интуиции. Схемотехнический этап состоит в моделировании и оптимизации параметров ЧЭНРЦ с учетом особенностей интегральной схемотехники и технологии. Так как количество компонентов в рассматриваемых элементах невелико, выполнение этапа технического проектирования затруднений не вызывает.

Таким образом, наиболее ответственный и трудоемкий этап проектирования ЧЭНРЦ — схемотехнический.

Как показал анализ САПР (СПАРС, МАЭС, КАПР-Э и т. п.), они недостаточно эффективны при решении задач моделирования НРЦ, особенно высокочастотных. Их использование часто приводит к большим затратам машинного времени и не дает полной качественной картины поведения НРЦ в различных режимах. При этом вне рассмотрения оказываются некоторые важные режимы работы моделируемых схем. Так как НРЦ все больше применяются в микроэлектронике, возникла необходимость в разработке методов и средств их автоматизированного проектирования, наиболее полно учитывающих специфику цепей данного класса.

Основой ЧЭНРЦ являются резонансные цепи, в которых в качестве перестраиваемого реактивного компонента колебательных контуров используется полупроводниковый конденсатор как наиболее перспективный с точки зрения возможностей микроэлектронной технологии. Математические модели резонансных цепей с полупроводниковой емкостью имеют вид нелинейных дифференциальных уравнений, близких к уравнениям гармонического осциллятора.

До настоящего времени не разработан единый подход к проблеме проектирования НРЦ. Недостаточно внимания уделялось исследованию формализации и алгоритмизации всего процесса проектирования данного класса цепей, начиная от составления исходных уравнений и кончая проектированием конкретного устройства. Не изучались вопросы оптимизации параметров НРЦ.

В работе приведены результаты исследования и разработки эффективных методик и алгоритмов проектирования тонкопленочных интегральных ЧЭНРЦ и отдельных компонент математического и программного обеспечения для решения задач их автоматизированного проектирования.

Для достижения указанных результатов решены следующие задачи: разработана методика сквозного проектирования ЧЭНРЦ, учитывающая особенности интегральной схемотехники и технологии (моделирование без макетирования, учет конструктивно-технологических ограничений); найдены новые способы построения математического и программного обеспечения для автоматизированного проектирования ЧЭНРЦ; созданы алгоритмы и программы инженерного анализа и оптимизации НРЦ, базирующиеся на численно-аналитическом подходе к моделированию данного класса нелинейных цепей; разработаны математические модели конкретных типов НРЦ; полученные алгоритмы решения задач автоматизации проектирования реализованы в виде комплекса прикладных программ моделирования и оптимизации ЧЭНРЦ (МОДОП-ЧЭ).

НРЦ описываются нелинейными дифференциальными уравнениями достаточно сложного вида [1; 2]. Существующие методы решения таких уравнений можно разделить на аналитические и численные. Наиболее эффективны из приближенных аналитических методов — асимптотические методы теории колебаний, в частности метод Боголюбова-Митропольского. Применимость этих методов для анализа НРЦ обоснована в работе [1].

Применение численных методов для непосредственного решения уравнений, описывающих высокочастотные НРЦ, малоперспективно с точки зрения разумной скорости и точности интегрирования на современных ЭВМ из-за ограниченности их памяти и быстродействия. Переход от аналитического представления сложных колебательных функций к табличному с заданной точностью требует, как правило, значительного дробления шага и, следовательно, увеличения времени интегрирования, приводит при численном решении исходных уравнений к большому количеству обрабатываемой информации и не гарантирует сходимости применяемых численных методов на всем временном интервале интегрирования. Такой подход эквивалентен численному экспериментированию над моделью схемы и исключает возможность определения функциональных зависимостей между характеристиками НРЦ и ее физическими параметрами, не позволяет использовать методы качественного анализа дифференциальных уравнений на фазовой плоскости на первом этапе их исследования, что не обеспечивает необходимой наглядности результатов анализа.

Предлагается другой подход — численно-аналитический. Моделирование НРЦ разделяется на два этапа: аналитический и численный. Аналитический этап включает в себя получение на ЭВМ решения исходного уравнения в аналитическом виде и качественное исследование поведения НРЦ в фазовом пространстве. На втором 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 [2].

Проектные процедуры на указанных этапах проектирования НРЦ реализуются программами, объединенными в комплекс прикладных программ МОДОП-ЧЭ. Он предназначен для моделирования и оптимизации ЧЭНРЦ и позволяет решать следующие задачи: построение решения исходного уравнения НРЦ в аналитическом виде; качественный анализ поведения моделируемой НРЦ в фазовом пространстве — построение фазовых портретов; анализ стационарного режима — построение АЧХ, ФЧХ; анализ динамического режима — построение графиков переходных процессов; оптимизация параметров НРЦ.

Комплекс программ МОДОП-ЧЭ ориентирован на функционирование с использованием технических средств СМ-1410, расширенных устройствами вывода графической информации, входящими в состав периферийного оборудования СМ ЭВМ АРМ. Язык реализации — АНАЛИТИК-79 и ФОРТРАН. Диалоговый режим работы комплекса поддерживается средствами алгоритмического языка АНАЛИТИК-79 и программным обеспечением СМ ЭВМ. Графические возможности обеспечиваются базовой графической системой АРМ. Работа комплекса программ происходит под управлением операционной системы РАФОС.

Вопросы моделирования ЧЭНРЦ достаточно полно описаны в работах [1; 2], а также в данной статье, в то время как задачи оптимизации рассматривались лишь в работе [4]. Учитывая, что получение наилучшего проектного решения является одной из основных целей проектирования, приведем постановку и решение одной из оптимизационных задач, возникающих при схемотехническом проектировании ЧЭНРЦ.

К важнейшим показателям качества проектируемых ИЭТ (в данном случае ГИС) относится вероятность работоспособности, количественно выражающаяся в величине выхода годных (ВВГ) ИС в случае их массового производства. В строгой постановке задача проектирования в этом случае состоит в нахождении таких значений внутренних параметров ГИС и допусков на них с учетом внешних факторов, при которых вероятность работоспособности будет максимальной. Основная трудность названной задачи в строгой постановке заключается в вычислении многократных интегралов от многомерных функций плотности вероятности, при котором необходимо иметь информацию о законах распределения параметров компонентов ГИС. В случае ГИС, компоненты которых изготавли-

ваются в едином технологическом процессе, задача усложняется необходимостью учета корреляции параметров компонентов ГИС. Однако в большинстве случаев по многим причинам проектировщик не знает законов распределения параметров компонентов ГИС для выбранного технологического процесса, ему известны лишь граничные значения этих параметров. При этом возникает так называемая задача «худшего случая» [5]. Правомерность такой постановки задачи при проектировании ЧЭНРЦ объясняется тем, что рассматриваемые ИЭТ относятся к ГИС частного применения, для которых наиболее важным критерием в оценке качества является ВВГ, а вопросы стоимости — второстепенны. Кроме того, компоненты ЧЭНРЦ (катушки индуктивности, резисторы, конденсаторы) выполняются отдельно, а не в едином технологическом процессе. Поэтому корреляция их параметров отсутствует. Все приведенные соображения упрощают задачи проектирования ЧЭНРЦ, которые можно сформулировать так [5]: задачи центрирования $\min_{x \in R_t} \Phi(x_n, t)$,

$R_t \in R_a$; задачи центрирования и оптимального назначения допусков $\min_{x \in R_t} \Phi(x_n, t)$, $R_t \in R_a$, где $\Phi(x_n, t)$ — целевая функция; x_n — вектор номинальных значений параметров ГИС; R_a — область работоспособности; R_t — допусковая область; t — вектор допусков.

Рассмотрим одну из задач первой группы — проектирование частотно-гармонического многоустойчивого элемента (ЧГМЭ), имеющего максимально возможное число устойчивых состояний. Такая задача возникает, например, при разработке преобразователей напряжение — частота, входящих в состав аналого-частотных преобразователей, используемых в системах автоматического контроля, измерений и сбора информации от удаленных датчиков.

В работе [4] приведены постановка и решение оптимизационной задачи определения номинальных значений параметров ЧГМЭ. С учетом допусков на параметры ЧГМЭ наиболее общая постановка задачи оптимизации имеет вид $\min_{x \in R_t} W(x_n, t)$, где $W(x_n, t)$ — целевая функция, выражающаяся числом устойчивых состояний ЧГМЭ, взятым с обратным знаком. Компонентами вектора x_n являются следующие параметры ЧГМЭ [4]:

$$x_n = [\Omega_1, E_1, C_1, C_{к0}, \tau, R_\phi, \varphi_k, \varphi_n, \theta, C_\phi, L]^T. \quad (2)$$

Обозначения в (1) взяты из работы [5]. Область работоспособности описывается системой неравенств: $12,56 \cdot 10^3 \leq \Omega_1 \leq 188,4 \times 10^3$ рад/с; $20 \leq E_1 \leq 60$ В; $C_{к0}/20 \leq C_1 \leq C_{к0}/10$; $50 \cdot 10^{-12} \leq C_{к0} \leq 10^{-9}$ Ф; $12,5 \cdot 10^{-6} \leq \tau \leq 14 \cdot 10^{-6}$ с; $0,2 \leq \varphi_k \leq 0,6$ В; $0,4 \leq \varphi_n \leq 1$ В; $10^5 \leq R_\phi \leq 10^8$ Ом; $0 \leq \theta \leq \pi/2$; $10C_{к0} \leq C_\phi \leq 50C_{к0}$; $10^{-3} \leq L \leq 3 \cdot 10^{-3}$ Гн; $10^5 \leq f_0 \leq 3 \cdot 10^5$ Гц, где f_0 — резонансная частота контура.

Допуски на параметры Ω_1 и L равны 5 %, на остальные параметры — 20 %. В результате решения задачи (1) получены следующие значения компонент вектора x_n :

$\Omega_1 = 13,19$ рад/с; $E = 34,6$ В; $C_1 = 55,6$ пФ; $C_{к0} = 561$ пФ; $L = 238$ мГн; $\tau = 13,64$ мкс; $R_{\phi} = 479$ кОм; $\varphi_k = 0,8$ В; $\varphi_k = 0,39$ В; $\theta = 0,355$; $C_{\phi} = 4700$ пФ.

При этих значениях параметров ЧГМЭ имеет 15 устойчивых состояний; диапазон напряжений на потенциальном выходе 0,25... 0,63 В, частот 152...180 кГц, напряжений на контуре 0,64...1,02 В. Экспериментальные результаты, полученные на макетном образце ГИС, отличаются от теоретических не более чем на 15 %, причем число экспериментально наблюдаемых устойчивых состояний равно 15.

Таким образом, разработанная методика сквозного автоматизированного проектирования ЧЭНРЦ (а также комплекс прикладных программ МОДОП-ЧЭ) может использоваться при моделировании нелинейных резонансных систем другой физической природы, например механических, электромеханических и т. д.

Список литературы: 1. Митропольский Ю. А., Молчанов А. А. Машинный анализ нелинейных резонансных цепей. К., 1981. 205 с. 2. Карпухин А. В., Лоза Ю. Х., Яловега Г. И. Математическое моделирование и проектирование интегральных частотных элементов на основе нелинейных резонансных цепей // Автоматизация проектирования электрон. аппаратуры. Таганрог. 1983. Вып. 2. С. 53—56. 3. Боголюбов Н. Н., Митропольский Ю. А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М., 1963. 410 с. 4. Карпухин А. В., Яловега Г. И. Оптимальное проектирование частотно-гармонических многоустойчивых элементов // Радиотехника. 1979. Вып. 48. С. 75—78. 5. Брейтон Р. К., Хэчтел Г. Д., Санджовачи-Винчензелли А. Л. Обзор методов оптимального проектирования интегральных схем // Тр. ин-та инж. по электротехнике и радиоэлектронике. 1981. Т. 69, № 10. С. 180—215.

Поступила в редколлегию 17.08.87

УДК 621.372.852

Ю. В. ШПАГИН, Л. Г. МАРТЫНЕНКО, канд. техн. наук,
А. Г. НЕРУХ, канд. физ.-мат. наук

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ЭЛЛИПСОИДЕ В СЛУЧАЕ МНОГОМОДОВОГО РЕЖИМА ВОЛНОВОДА

При использовании металлических дисков в качестве элементов волноводных СВЧ-устройств возможны ситуации, требующие учета многомодового режима работы волновода. Например, при передаче электромагнитной энергии больших уровней необходим учет вклада высших типов колебаний в нагрев металлического диска. Для случая одномодового режима работы исследование нагрева диска проведено в работе [1].

Для описания любого явления, связанного с работой металлического диска в поле волновода, необходимо знание распределения электромагнитного поля в ближней зоне диска. В работе расчет такого распределения производится для случая многомодового