

# АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЫСОКОДОБРОТНОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТРАНЗИСТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

С.Вишняков,  
В.Геворкян,  
Ю.Казанцев

Миниатюрные высокостабильные транзисторные автогенераторы (ТрАГ) на базе колебательной системы с диэлектрическими резонаторами (ДР), связанными с отрезками микрополосковых линий, получили широкое распространение в системах радиосвязи коммерческого и специального назначения дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн [1]. Для построения ТрАГ СВЧ-диапазона используются два типа схем: с параллельной (внешней) и так называемой последовательной (внутренней для транзистора) обратной связью [1]. Первый тип схемы предпочтителен для создания неперестраиваемых, а второй – для частотно управляемых автогенераторов (АГ). В обоих случаях проектирование АГ можно условно разделить на два этапа. Первый – электродинамический расчет колебательной системы для предварительной оценки ее параметров (резонансной частоты, добротности, стабильности при внешних воздействиях и т.п.). Второй – решение задачи обеспечения стационарного режима автогенерации на основе уравнений состояния (вблизи требуемой частотной точки), представленных в терминах сосредоточенных параметров (например,  $s$ -параметров) для колебательной системы и транзистора. Ограничимся рассмотрением особенностей первого этапа расчета ТрАГ, учитывая его большую трудоемкость и значимость.

Важными характеристиками АГ являются долговременная и кратковременная стабильность. Обеспечение долговременной и кратковременной стабильности генератора решается оптимальным сочетанием электрофизических свойств керамических материалов ДР и рациональным построением колебательной системы. Применение современных СВЧ-керамик с управляемым температурным коэффициентом относительной диэлектрической проницаемости ( $TK_{\epsilon_r}$ ) [2] позволяет получать долговременную стабильность частоты (относительную нестабильность частоты) ТрАГ до  $10^{-5}$  (в температурном диапазоне от  $-60$  до  $+50^\circ\text{C}$ ) на основе принципов термокомпенсации. Проблема обеспечения кратковременной стабильности частоты ТрАГ (уровней фазовых шумов) связана со зна-

чением собственной добротности колебательной системы и, в значительной мере, – со значением собственной добротности ДР.

В коротковолновой части сантиметрового диапазона длин волн уровень собственных шумов генератора растет из-за падения добротности колебательной системы ТрАГ. Высокую стабильность частоты генератора можно достичь применением фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Однако для реализации такого технического решения требуются дорогостоящие высокостабильные микросхемы. Кроме того, ФАПЧ – крупногабаритная система, в то время как ТрАГ без такой системы выгодно отличаются миниатюрностью и дешевизной. Так, ТрАГ на основе ДР [3] на частоту 16 ГГц размером  $2,5 \times 2,5 \times 0,8$  см обеспечивает выходную мощность не менее 10 дБм при токе потребления 30 мА и напряжении питания 3 В (рис. 1). Однако в отсутствие ФАПЧ при отстройке от несущей на 10 кГц уровень частотных шумов такого ТрАГ составляет  $80 \text{ дБ}/\sqrt{\text{Гц}}$ , что для большинства применений явно недостаточно.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Недостаточная кратковременная стабильность частоты ТрАГ в коротковолновой части сантиметрового диапазона длин волн связана с уменьшением добротности традиционных колебательных систем (КС) генераторов вследствие роста потерь в диэлектрике при повышении частоты, а также ухудшением добротности микрополосковых резонаторов (МПР), входящих в состав КС. Необходимая добротность колебательной системы ТрАГ достигается за счет высокой собственной добротности ДР (в 3-см диапазоне длин волн равной  $\sim 5000$  [2]) при оптимальном включении ДР в систему отрезков микрополосковых линий (МПЛ), формирующих МПР. Значение добротности МПР (определяемой потерями в проводниках и на излучение) не превышает 100–200 [4] и в первом приближении не зависит от

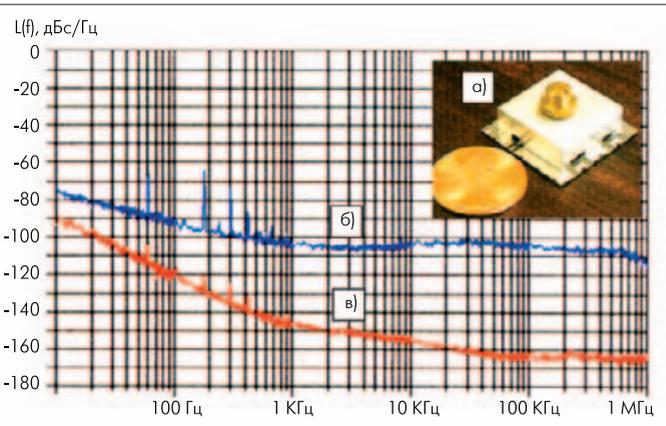
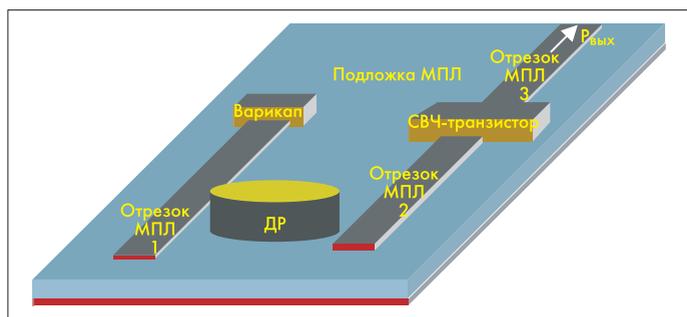


Рис. 1. Внешний вид ТрАГ на ДР на частоту 16 ГГц [3] (а) и спектральные характеристики при отсутствии (б) и наличии (в) внешней ФАПЧ



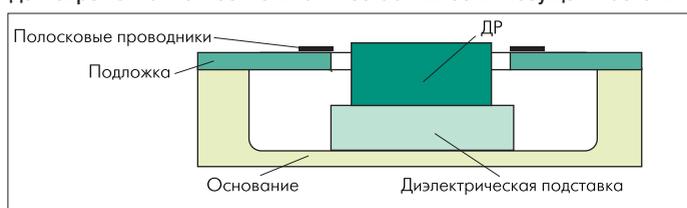
**Рис. 2. Схематичный вид ТРАГ с варакторной перестройкой частоты**

свойств материала подложки. Поскольку из-за частотной дисперсии в коротковолновой части сантиметрового диапазона значения тангенса угла потерь современной СВЧ-керамики с высокой относительной диэлектрической проницаемостью сравнительно высокие (например, при  $\epsilon_r = 41$  на частоте 15 ГГц  $\text{tg}\delta \approx 3 \cdot 10^{-4}$  [2]), добротность колебательной системы с ее применением снижается.

Возможный путь повышения кратковременной стабильности без использования ФАПЧ – замена микрополосковых резонаторов более добротными полосковыми резонаторами (ПР) на линиях с подвешенной подложкой. Добротность ПР достигает 2000, что значительно выше чем у МПП [4]. Однако проектирование подобных колебательных систем затруднено из-за сложного спектра собственных частот системы, не допускающей применения приближенных расчетных оценок. Достоверный расчет систем с диэлектрическими и полосковыми резонаторами возможен с применением численных методов расчета электромагнитных полей. Это и обуславливает актуальность разработки метода автоматизированного проектирования колебательных систем высокостабильных ТРАГ с применением современного программного обеспечения, реализующего численные методы расчета электромагнитных полей.

Без снижения общности ограничим рассмотрение метода проектирования примером расчета колебательной системы ТРАГ на основе последовательной обратной связи с варакторной перестройкой частоты (рис.2). В такой системе ДР электромагнитно связан с размещенными на подложке отрезками МПП 1 и 2. МПП 2 соединена с затвором полевого СВЧ-транзистора, а линия 3 служит для вывода мощности. Отрезок МПП 1 соединен с варикапом. На противоположных концах МПП 1 и 2 разомкнуты. Перестройка частоты генератора осуществляется с помощью варикапа, создающего дополнительную удлиняющую емкость и тем самым смещающего резонансные частоты полосковой линии.

Для повышения добротности в такой колебательной системе ТРАГ а целесообразно применять несимметричные линии с подвешенной подложкой (рис.3), поскольку они более технологичны, чем симметричные, и их проще стыковать с микрополосковыми линиями в трактах передачи сигнала. Образец такого генератора, разработанного в СССР в середине 80-х годов прошлого века [5], обеспечивал электронную перестройку частоты на 40 МГц относительно несущей частоты ~15 ГГц при выходной мощности 150 мВт. Его долговременная относительная нестабильность несущей частоты



**Рис.3. Поперечное сечение высокдобротной колебательной системы**

$\Delta f/f$  составляла  $\sim 2 \cdot 10^{-4}$ , а спектральная частота – -90 дБ при отстройке от несущей на 10 кГц. Габаритные размеры ТРАГ с вентиляционной развязкой – 50x30x15 мм. На основе известных размеров топологии этого ТРАГ и примененного в нем ДР можно экспериментально проверить достоверность метода проектирования.

## ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА

Как отмечалось, расчет колебательной системы, содержащей ДР и ПР на линиях с подвешенной подложкой, требует применения численных методов расчета электромагнитных полей для анализа спектра собственных частот. При выборе численного метода и его программной реализации следует руководствоваться следующими критериями:

- достоверностью анализа электромагнитного поля диэлектрического резонатора;
- достоверностью анализа поля полосковой линии;
- возможностью расчета собственных частот электродинамической системы;
- возможностью оценки добротности системы;
- возможностью управления точностью/трудоемкостью решения;
- возможностью автоматизации многократного анализа.

Сегодня на рынке предлагается множество коммерческих программ, реализующих различные численные методы. Наиболее популярны программные продукты, основанные на методе моментов (Method of Moments, MoM) и методе конечных разностей во временной области (Finite Differences Time Domain Method, FDTD) (табл.1). Достоинства таких программ – дружелюбный интерфейс, простота работы, сравнительно малые аппаратные требования. Менее популярны "тяжелые" конечно-элементные пакеты (Finite Elements Method, FEM), для которых требуются значительно большие вычислительные мощности. К тому же они более сложны в освоении, хотя и обладают широкими возможностями.

**Таблица 1. Некоторые характеристики наиболее известных программ [6–10]**

| Программа        | Объемные/планарные модели | Построение регулярной/нерегулярной сетки | Численный метод |
|------------------|---------------------------|--|-----------------|
| ANSYS            | +/+                       | +/+                                      | FEM             |
| Microwave Office | -/+                       | +/-                                      | MoM             |
| Microwave Studio | +/-                       | +/-                                      | MoM             |
| IE3D             | -/+                       | +/-                                      | FDTD            |
| Fidelity         | +/+                       | +/-                                      | MOM             |
| FEMLAB           | +/+                       | +/+                                      | FEM             |
| Concerto         | +/+                       | +/-                                      | FDTD            |

Всем перечисленным требованиям в наибольшей мере удовлетворяет программа ANSYS, реализующая метод конечных элементов. В ней предусмотрены возможности управления густотой конечно-элементной сетки, автоматизации многократного анализа, вычисления собственных частот и добротностей электродинамической системы, что подтверждает опыт ее применения авторами при расчете полей ДР. Корректность расчета поля ДР подтверждена экспериментальными исследованиями [11].

## АЛГОРИТМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исходные данные для численного моделирования колебательной системы автогенератора – требуемая частота (в предположении ее соответствия несущей частоте генератора, т.е. без учета вносимых реактивностей со стороны активного прибора, который может и должен быть выполнен на последующем этапе проектирования собственно автогенератора) в сочетании с максимальной добротностью. В случае синтеза перестраиваемой колебательной системы

добавляется еще и требование обеспечения необходимого диапазона перестройки частоты. Несмотря на достоинства программы ANSYS, при непосредственном расчете электродинамической системы она не позволяет получить ясного результата и автоматизировать вычисления. Эффективный анализ и синтез колебательной системы высокостабильного транзисторного автогенератора с помощью программы ANSYS можно провести только с применением специального алгоритма. Этот алгоритм состоит из следующих этапов:

- 1) создание и расчет исходной модели:
  - создание геометрической модели с некоторыми (начальными) конструктивными параметрами;
  - создание конечно-элементной сетки для модели, проверка ее качества;
  - исследование численной сходимости при определении спектра собственных частот – многократное вычисление первых нескольких резонансных частот при различных настройках конечно-элементного разбиения, выбор оптимальных по соотношению точность/трудоемкость настроек;
- 2) анализ спектра собственных частот исходной модели:
  - вычисление (с выбранными настройками) спектра собственных частот колебательной системы;
  - вычисление добротности для каждой собственной частоты;
  - анализ картины электромагнитного поля для каждой собственной частоты;
  - составление по результатам расчета значений добротности и анализа картин поля вывода о типе каждого резонанса и о его влиянии на технические характеристики ТРАГ;
- 3) автоматизированное исследование колебательной системы:
  - составление программы на внутреннем алгоритмическом языке программирования ANSYS (с использованием вспомогательных файлов, созданных программой для исходной модели), позволяющей автоматически генерировать геометрическую модель, конечно-элементную сетку и граничные условия;
  - тестовый прогон созданной программы – вычисление спектра собственных частот исходной модели;
  - вычисление с помощью разработанной программы требуемых характеристик системы (например, зависимости значений собственных частот системы от параметров материала диэлектрического резонатора);
  - расчет АЧХ системы при нагруженных полосковых линиях, вычисление коэффициентов связи между ПР и ДР;
- 4) анализ полученных данных, выбор оптимальных настроек.

При реализации алгоритма целесообразно руководствоваться следующими рекомендациями:

- ограничить число собственных частот, анализируемых при проектировании колебательной системы и не рассматривать частоты, резко отличающиеся (в основном вверх по частоте) от предполагаемой несущей частоты генератора;
- при вычислении добротности рассматривать в качестве единственного источника потерь токи в проводниках, поскольку программа ANSYS не позволяет вычислять собственные частоты электродинамической системы, содержащей диэлектрики с потерями. Такое допущение возможно, так как добротность колебательной системы определяется прежде всего добротностью полосковых линий, потери в которых обусловлены относительно высокой плотностью токов на краях проводников;
- делать вывод о природе резонанса для каждой из найденных собственных частот системы, сравнивая добротности при резонансах на данной частоте и на остальных собственных частотах и анализируя структуру поля, соответствующую конкретной частоте.

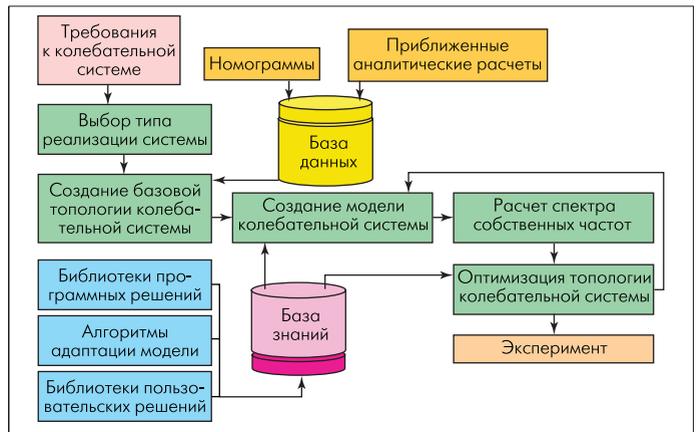


Рис.4. Блок-схема системы автоматизированного проектирования колебательной системы

те. Резонансам, контролируемым ДР, соответствуют большие значения добротности, а резонансам, определяемым только полосковыми линиями, – меньшие ее значения;

- для рассматриваемой колебательной системы наблюдаются парные (для четного и нечетного типа возбуждения) резонансы полосковых линий, их расстройка по частоте определяется значением коэффициента связи между полосковыми резонаторами;
- моделировать перестройку частоты, осуществляемую варикапом, меняя длину соответствующего полоскового резонатора.

С учетом сказанного блок-схему системы автоматизированного проектирования можно представить в виде, показанном на рис.4.

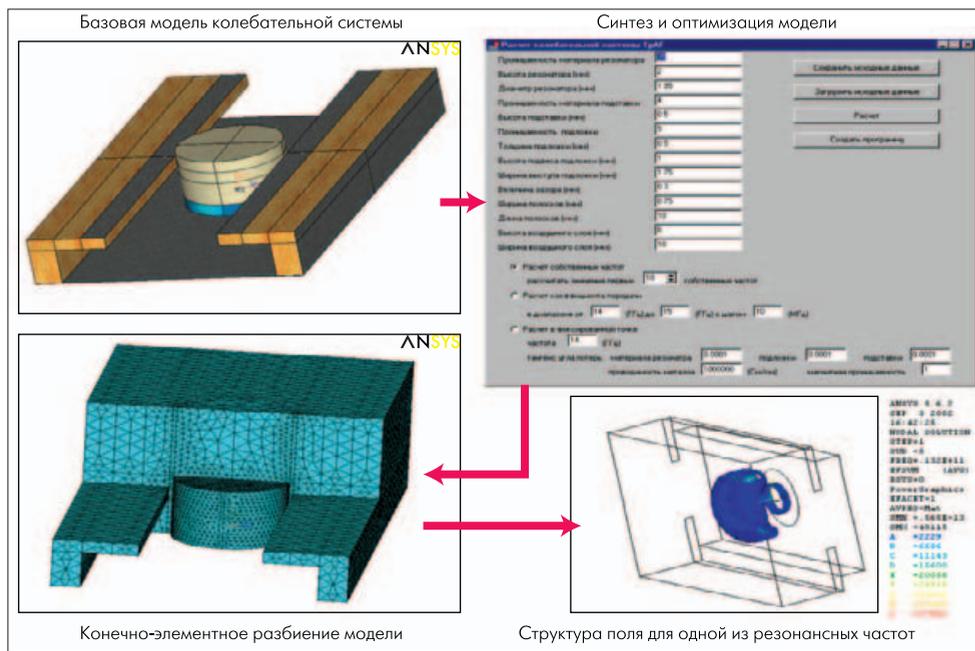
Предлагаемый алгоритм, основанный на программе ANSYS, поддерживается программным обеспечением CADGen, работающим под управлением Windows 95 и позволяющим оперативно проектировать колебательную систему ТРАГ. Для вычисления s-параметров системы при нагруженных полосковых линиях предусмотрена возможность присоединения 50-Ом коаксиальных портов. Разработанная база знаний позволяет автоматически создавать высококачественное конечно-элементное разбиение, задавать граничные условия, настраивать программу ANSYS. Номограммы и табличные данные, составляющие базу данных, обеспечивают оперативное получение начальной топологии и ее оптимизацию. Отметим, что с помощью предлагаемого алгоритма возможен и синтез колебательных систем на основе микрополосковых резонаторов.

### ПРИМЕР ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрим этапы проектирования колебательной системы ТРАГ на частоту 14,7 ГГц с помощью программы CADGen и комплекса ANSYS (рис.5). При численном моделировании в качестве нулевого приближения приняты следующие электрофизические параметры материалов и исходные конструктивные размеры:

- $\epsilon_r$  подложки ПР равно 9, материала резонатора – 35, диэлектрической подставки – 4;  $\sigma$  металлического покрытия проводников –  $5,8 \cdot 10^7$  См/м,  $\mu_r = 1$ ;
- толщина подложки – 0,5 мм; ширина выступа, образующего линию с подвешенной подложкой, – 1,75 мм; длина и ширина полосков – 2 см и 0,75 мм, соответственно; диаметр ДР – 3,9 мм, высота – 2 мм; высота диэлектрической подставки – 0,5 мм; зазоры между ДР и полосками – 0,3 мм; размер модели (с учетом воздушного заполнения) 10x20x5,5 мм.

Конечно-элементное разбиение модели создавалось с учетом малого зазора между ДР и ПР. В диэлектрическом резонаторе и в зазоре между ним и полосками сетка имеет наибольшую плотность



**Рис.5. Автоматизированный синтез колебательной системы**

размещения конечных элементов. Поскольку топология геометрической модели иррегулярна, для построения сетки применялись тетраэдральные конечные элементы и устанавливался нерегулярный ("свободный" – free) способ разбиения. Изучались различные варианты разбиения. Оптимальным по соотношению точности и трудоемкости оказалось разбиение, представленное на рис.5.

перестройки или подстройке частоты ТрАГ можно использовать зависимость резонансных частот колебательной системы от длины ПР (рис.10).

Создание эффективной колебательной системы ТрАГ предполагает отбор наиболее добротных резонансов. Для рассматриваемой системы – это собственные колебания под номерами 6, 7 и 8

Поскольку анализ проводился для колебательной системы ТрАГ с рабочей частотой ~14,7 ГГц, целесообразно ограничиться рассмотрением первых десяти собственных колебаний (табл.2).

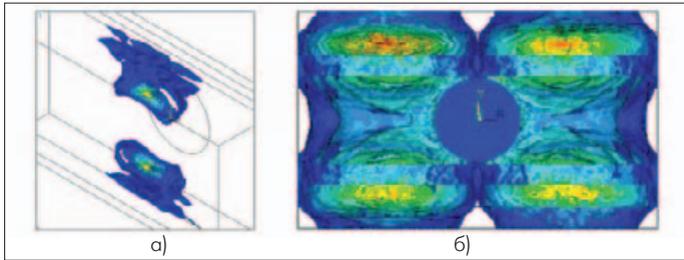
Выводы о природе резонансов, обнаруженных в системе, можно сделать на основе анализа значений добротности и картин поля, соответствующих нескольким характерным резонансам системы, представленным на рис.6–9 в виде изоповерхностей напряженности электрического поля.

С помощью программы CADGen исследовалось влияние различных конструктивных факторов на значения собственной частоты в системе (табл. 3).

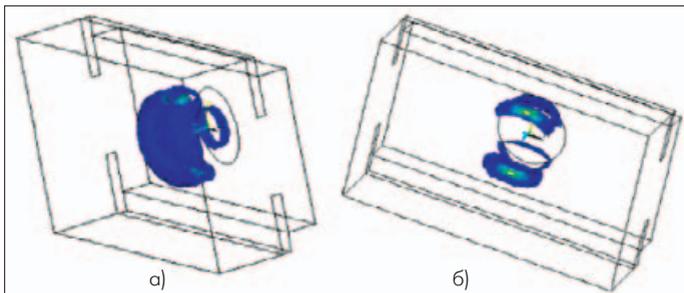
При оценке чувствительности топологии колебательной системы к точности исполнения, а также для построения электронной (варакторной)

**Таблица 2. Результаты анализа собственных частот для исходной модели колебательной системы**

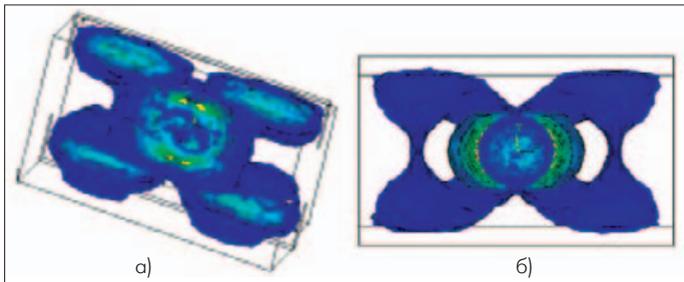
| №            | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Частота, ГГц | 5,535 | 5,614 | 11,24 | 11,33 | 13,17 | 13,48 | 14,54 | 14,69 | 15,66 | 16,37 |
| Добротность  | 1119  | 1192  | 1518  | 1546  | 1964  | 7783  | 7421  | 6333  | 2090  | 1951  |



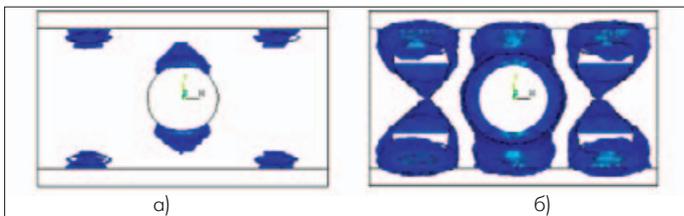
**Рис.6. Картины поля для резонансных частот полосковых линий (табл.2): а) 1 и 2 – резонанс для 0,5 длины волны, б) 3 и 4 – резонанс для 1 длины волны**



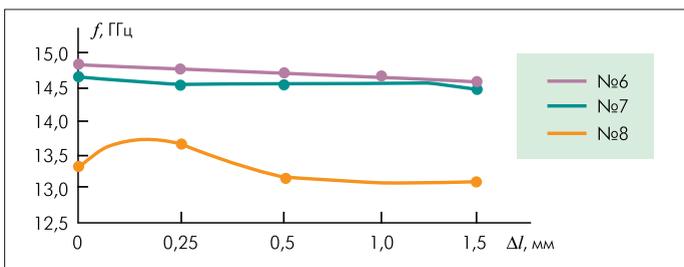
**Рис.7. Картины поля для определяемых только ДР резонансных частот (табл.2): а) 5 – низшая мода и б) 6 – вторая мода**



**Рис.8. Картины поля для резонансных частот связанной системы ДР– ПР (табл.2). Частоты: а) 7 и б) 8**



**Рис.9. Картины поля для резонансных частот ПР (табл.2): а) 9 и б) 10 – резонанс для 1,5 длины волны**



**Рис.10. Зависимости собственных частот системы от длины ПР**

(см. табл.2). А поскольку заданная для проектирования ТРАГ рабочая частота составляет 14,7 ГГц, то реализовывать колебательную систему целесообразно на основании собственного колебания № 7. Следует отметить, что результаты расчета привели к синтезу колебательной системы ТРАГ, идентичной системе, примененной в созданном ранее ТРАГ с варакторной перестройкой частоты [5].

**Таблица 3. Влияние конструктивных факторов на значения собственных частот системы**

| №  | A     | B     | C     | D     | E     | F     | G     |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1  | 6,21  | 6,19  | 6,13  | 6,27  | 6,13  | 6,03  | 5,72  |
| 2  | 6,23  | 6,22  | 6,22  | 6,33  | 6,31  | 6,06  | 5,75  |
| 3  | 12,38 | 12,43 | 12,42 | 12,42 | 12,33 | 12,17 | 11,61 |
| 4  | 12,55 | 12,5  | 12,48 | 12,46 | 12,65 | 12,21 | 11,63 |
| 5  | 13,38 | 13,37 | 13,33 | 13,55 | 13,59 | 13,28 | 13,14 |
| 6  | 14,57 | 14,54 | 14,1  | 14,57 | 14,5  | 14,53 | 14,49 |
| 7  | 14,78 | 14,71 | 14,8  | 14,72 | 14,7  | 14,67 | 14,59 |
| 8  | 15,43 | 15,24 | 14,93 | 15,51 | 15,11 | 15,21 | 15,16 |
| 9  | 16,7  | 16,88 | 17,03 | 17,31 | 16,96 | 16,68 | 16,18 |
| 10 | 17,99 | 18,02 | 17,97 | 17,98 | 18,06 | 17,62 | 16,85 |

**Примечание.** В столбцах приведены значения собственной частоты системы при увеличении высоты диэлектрической подставки на 0,2 мм (А); уменьшении высоты диэлектрической подставки на 0,2 мм (С); увеличении зазоров между ДР и ПР на 0,2 мм (D) и увеличении длин ПР на 0,25; 0,5 и 1,5 мм (E-G, соответственно). В – значения собственной частоты системы для исходной модели.

Таким образом, разработана методика автоматизированного синтеза колебательной системы высокочастотного ТРАГ на основе программы ANSYS, реализующей метод конечных элементов. Предложенный алгоритм позволяет проектировать колебательные системы, включающие в себя диэлектрические резонаторы и резонаторы на отрезках линий с подвешенной подложкой. Возможен синтез систем, содержащих резонаторы иного типа. Полученные с помощью численных расчетов характеристики колебательных систем хорошо согласуются с данными для использующихся на практике генераторов. Следовательно, можно говорить о решении задачи оперативного проектирования колебательных систем для миниатюрных высокочастотных транзисторных автогенераторов.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Абраменков, И.И. Бродуленко, В.М. Геворкян, Д.А. Ковтунов А.И. Состояние и перспективы применения миниатюрных диэлектрических резонаторов в перестраиваемых полупроводниковых генераторах. – Обзоры по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ/Под ред. В.М. Геворкяна – М.: ЦНИИ "Электроника", 1988, вып. 5(1359). – 70 с.
2. Высокочастотные керамические материалы и микроволновые элементы: Каталог. – СПб.: ООО "Керамика", 2000.
3. New Products. Phase Locked Oscillators for LMDS, VSAT and POINT TO POINT Wireless Applications. – Microwave-Magazine, 2000, Dec., v.1, N4, p.104–105.
4. Малорацкий Л.Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ. – М.: Сов. радио, 1976.
5. Геворкян В.М., Ковтунов Д.А. Генератор СВЧ. Авт. св. № 1788664, 05.07.90 г.; МКИ 5 Н03В 5/18: – Бюл. № 2 от 15.01. 1993.
6. ANSYS Electromagnetic field analysis guide. – ANSYS Inc, 1998.
7. Microwave Office – EMSight Reference. – Applied Wave Research, 2000.
8. IE3D User's manual. – Zeland Software, 2000.
9. Fidelity User's manual// Zeland Software, 1999.
10. New features in CONCERTO V3. – Vector, 2002, v.17, N1, p.6.
11. Казанцев Ю.А., Бунин А.В., Геворкян В.М., Вишняков С.В., Капустин Ю.Г., Полукаров В.И. СВЧ фильтры на диэлектрических резонаторах. – Конференция "Излучение и рассеяние электромагнитных волн", 2001. – Таганрог: изд-во ТПУ, с.191–193.