



2. Mak W. C., Malomed B. A., Chu P. L. Formation of a standing-light pulse through collision of gap solitons // Phys Rev E. 2003. Vol. 31, № 68. P. 1–9.
3. Ablowitz M. J., Horikis T. P., Nixon S. D., Zhu Y. Asymptotic analysis of pulse dynamics in mode-locked lasers // Studies in Applied Mathematics. 2009. Vol. 122, iss. 4. P. 411–425.
4. Sysoliatin A. A., Konyukhov A. I., Melnikov L. A. Dynamics of optical pulses propagating in fibers with variable dispersion // Numerical Simulations of Physical and Engineering Processes. 2011. P. 277–300.
5. Bauer R. G., Melnikov L. A., Multi-soliton fission and quasiperiodicity in a fiber with a periodically modulated core diameter // Opt. Commun. 1995. Vol. 115. P. 190–195.

УДК 538.975

## ТЕРМОСТАБИЛЬНЫЙ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ЖИГ ГЕНЕРАТОР

А. Н. Литвиненко, В. В. Тихонов

Саратовский государственный университет  
E-mail: LitvinenkoAN@gmail.com



В работе предложена оригинальная конструкция термостабилизированного электрически перестраиваемого ЖИГ генератора СВЧ с пленочным ЖИГ резонатором в цепи обратной связи. Печатная плата генератора вместе с катушками электрической перестройки и встроенной системой термокомпенсации располагалась внутри экрана портативной магнитной системы. Температурный дрейф частоты ЖИГ резонатора компенсировался температурным размагничиванием постоянных магнитов.

**Ключевые слова:** ЖИГ генераторы, температурная нестабильность, термостабилизация.

### Thermostable Tunable YIG Oscillator

A. N. Litvinenko, V. V. Tikhonov

In the paper the original construction of thermostable electrically tunable microwave YIG oscillator with planar resonator in feedback loop is proposed. PCB of oscillator with tunable coil and thermocompensated system is located inside the screen of the portable magnetic system. Temperature drift YIG resonator frequency compensated temperature demagnetization of permanent magnets.

**Key words:** YIG oscillator, thermal instability, thermostabilization.

### Введение

Современные тенденции развития мобильных систем радиолокации, навигации и связи проявляются в продвижении в область более высоких частот. При этом к бортовым системам предъявляются повышенные требования миниатюризации, энергоёмкости и другие. В системах обработки радиосигналов начинают преобладать цифровые методы [1]. Однако эффективность этих методов во многом зависит от качества опорного сигнала. В частности, для повышения точности радарных систем необходимо предельное снижение уровня фазовых шумов, а для защиты от шумового противодействия необходимо иметь возможность быстрой перестройки ча-

стоты опорного сигнала. В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют транзисторные ЖИГ генераторы.

В настоящее время в основном используются генераторы на ЖИГ сферах, которые серийно выпускаются целым рядом российских и зарубежных фирм [2]. Однако область их применения весьма ограничена из-за высокой температурной нестабильности частоты ЖИГ резонаторов. С началом производства высококачественных плёнок ЖИГ появилась возможность создания плёночных ЖИГ резонаторов, которые также обладают высокой добротностью, порядка  $10^3$ – $10^4$ , но отличаются более высокой технологичностью и низкой стоимостью. Однако переход к планарной технологии по-прежнему не решал проблемы термостабилизации. Более того, эта проблема усложнялась температурной нестабильностью постоянных магнитов, которые использовались в портативных системах намагничивания плёнок ЖИГ.

Известные способы термостабилизации не вполне удовлетворяют требованиям мобильных систем. Термостатирование и фазовая автоподстройка частоты ЖИГ генератора приводят к желаемому результату ценой дополнительных энергозатрат, значительного усложнения устройства и увеличения его габаритов. В этом смысле более предпочтительными представляются методы термокомпенсации дрейфа частоты резонатора за счёт температурного изменения величины намагничивающего поля. Для реализации этих методов в конструкцию магнитной системы дополнительно вводились термокомпенсационные элементы (термошунты, термосопротивления) [3], которые вместе с постоянными магнитами обеспечивали требуемое изменение поля в рабо-



чем зазоре магнитной системы (см., например, [4]). Однако настройка такой системы оказалась достаточно сложной и трудоемкой задачей.

Наиболее простой и эффективный способ автоподстройки частоты пленочного ЖИГ резонатора был предложен в работе [5], где в качестве термокомпенсационных элементов использовалась специально подобранная комбинация разнородных магнитов. Этот способ был реализован в оригинальной конструкции портативной экранированной электрически перестраиваемой магнитной системы, которая к тому же допускала размещение внутри экрана микрополосковой схемы интегрального СВЧ устройства [6].

В данной работе эта конструкция использовалась для термостабилизации ЖИГ генератора СВЧ. В задачу работы входило: разработка принципиальной схемы и топологии печатной платы малошумящего транзисторного ЖИГ генератора; макетирование генератора в составе портативной магнитной системы [6]; настройка системы термостабилизации и ее испытание в широком диапазоне температур.

### 1. Моделирование схемы ЖИГ генератора

В задачу моделирования входила разработка транзисторного ЖИГ генератора с предельно низким уровнем фазовых шумов и широкой полосой перестройки частоты генерации.

Известно, что уровень фазовых шумов генератора определяется: во-первых, нагруженной добротностью частотно задающего резонатора в цепи обратной связи (в нашем случае пленочного ЖИГ резонатора), во-вторых, собственной нестабильностью СВЧ транзистора и, в-третьих, качеством согласования активной части автогенератора с внешним СВЧ трактом. Известно также, что наиболее широкой полосой перестройки обладает схема транзисторного генератора с общей базой. В этой схеме резонатор подключается к активной части генератора по схеме двухполюсника, что давало дополнительное преимущество в плане ослабления нагрузки ЖИГ резонатора.

Схема транзисторного ЖИГ генератора с общей базой представлена на рис. 1.

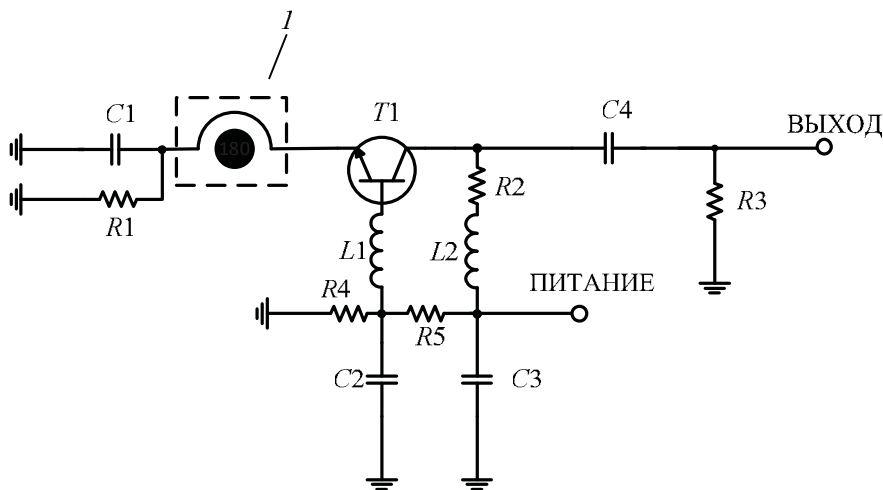


Рис. 1. Принципиальная схема транзисторного ЖИГ генератора с общей базой.  
1 – ЖИГ резонатор с микрополосковым преобразователем

Для реализации схемы генератора был выбран биполярный транзистор BFU730f фирмы NXP [7], который отличался предельно низким уровнем собственных шумов, порядка 0.8дБ, на частотах до 5ГГц. В цепях согласования активной части использовались высокочастотные пассивные элементы фирмы Murata [8], которые обеспечивали стабильную работу генератора в диапазоне 3-6ГГц.

Моделирование колебательных процессов в схеме генератора, которая приведена на рис. 1, осуществлялось в системе ADS фирмы Agilent

[9]. Эта система позволяла осуществлять полный цикл проектирования электронных схем, включая моделирование процессов развития колебаний, моделирование электромагнитных полей в заданной топологии печатной платы, а также расчет характеристик выходного сигнала генератора с учётом влияния паразитных параметров печатной платы.

В расчетах использовалась нелинейная модель транзистора BFU730f, которая была предоставлена производителем в виде SPICE-файла [10]. Этот файл импортировался в систему



ADS вместе с файлами  $S$ -параметров пассивных элементов, которые выбирались из соответствующих библиотек производителей [11]. Помимо этого в системе ADS использовалась модель ЖИГ резонатора с элементом связи, эквивалентная схема которого представлена на рис. 2.

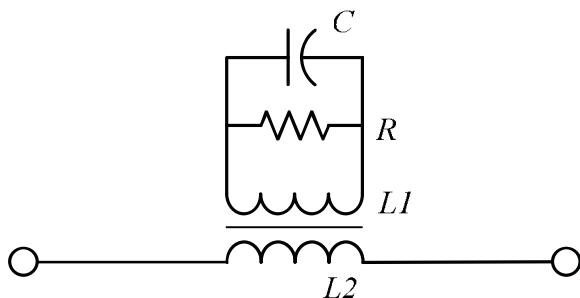


Рис. 2. Эквивалентная схема нагруженного ЖИГ резонатора:  $C$  – емкость,  $L1$  – индуктивность,  $R$  – сопротивление,  $L2$  – индуктивность микрополоскового преобразователя

Значения эквивалентных параметров  $L1$ ,  $L2$ ,  $C$ ,  $R$  рассчитывались с использованием измеренных  $S$ -параметров ЖИГ резонаторов по методике, предложенной в работе [12].

Для реализации электрической схемы генератора, (см. рис. 1) была разработана топология печатной платы, которая представлена на рис. 3.

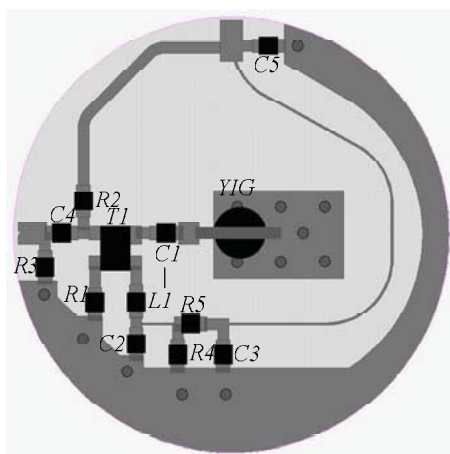


Рис. 3. Топология печатной платы

С целью уменьшения паразитных емкостных параметров и уменьшения потерь печатной платы был выбран материал Arlon-250 с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 2.5$  и тангенсом угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta = 0.0014$ . Диаметр платы составлял 20 мм, толщина 0.5 мм. Геометрия и размеры печатной платы задавались внутренними размерами цилиндрической магнитной системы.

В задачу моделирования входил расчет  $S$ -параметров активной части генератора, временной анализ генерируемого сигнала и уровня фазовых шумов. Результаты расчетов  $S11$ -параметров представлены на рис. 4.

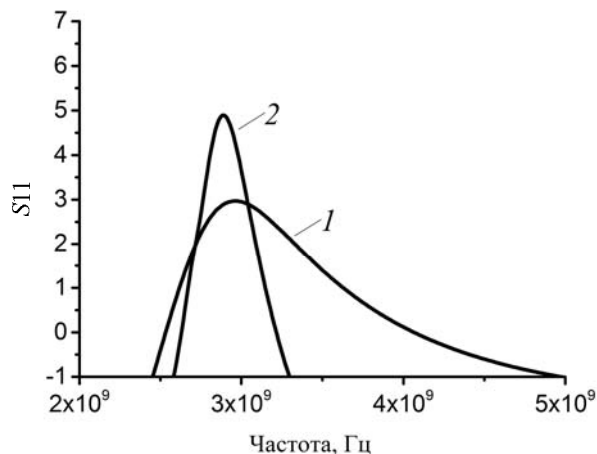


Рис. 4. Результаты расчетов  $S11$ -параметров активной части транзисторного автогенератора

Кривая 1 была рассчитана по принципиальной схеме, приведенной на рис. 1. Кривая 2 была рассчитана по той же схеме, но с учётом паразитных параметров печатной платы. Видно, что паразитные параметры печатной платы сужают частотный диапазон усиления активной части генератора, но при этом остается достаточно широкая полоса для перестройки частоты ЖИГ генератора.

На рис. 5 представлены временные реализации генерируемых сигналов.

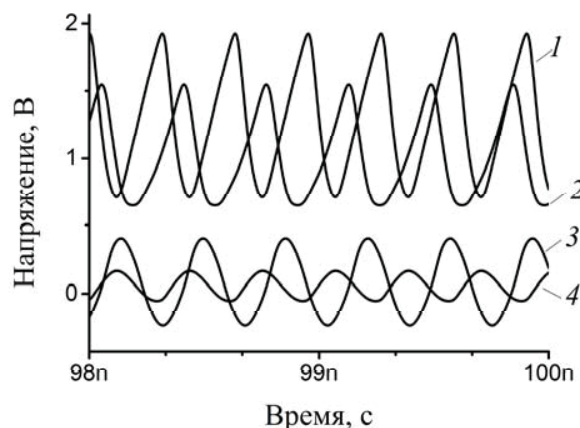


Рис. 5. Временная реализация генерируемых сигналов

Кривые 1, 2 соответствует колебаниям на выходе генератора соответственно без учета и с учетом влияния параметров печатной платы. Кривые 3, 4 соответствуют колебаниям на входе ЖИГ резонатора также без учета и с учетом вли-



яния параметров печатной платы. Видно, что на выходе транзисторного генератора возникают монохроматические колебания на частоте возбуждения ЖИГ резонатора. При этом паразитные параметры печатной платы не оказывают заметного влияния на тип колебаний.

На рис. 6 представлены результаты расчета уровня фазовых шумов. Видно, что фазовые шумы составляют  $-74$  дБн/Гц при отстройке частоты на  $1$  кГц и  $-94$  дБн/Гц при отстройке частоты на  $10$  кГц, что является показателем высокой стабильности частоты генератора.

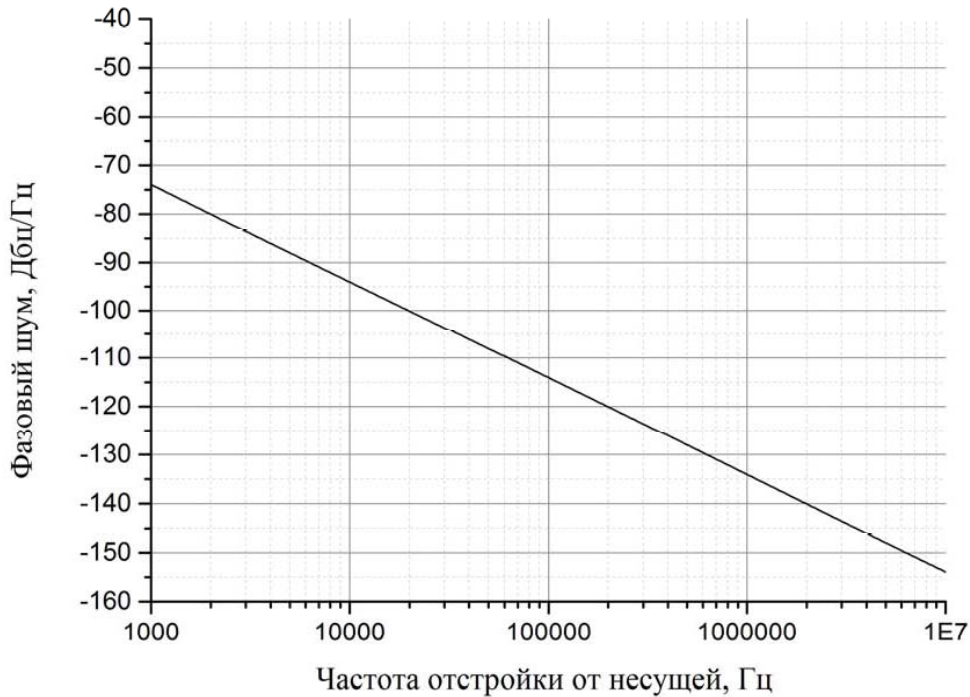


Рис. 6. Фазовые шумы схемы транзисторного ЖИГ генератора

Таким образом, в результате моделирования была показана возможность физической реализации предложенной схемы автогенератора.

## 2. Экспериментальные результаты

Конструкция магнитной системы и внешний вид экспериментального макета транзисторного ЖИГ генератора представлены на рис. 7.

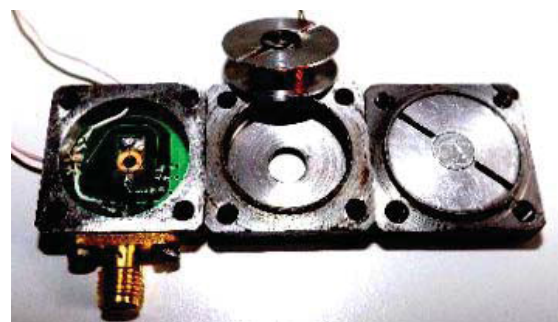
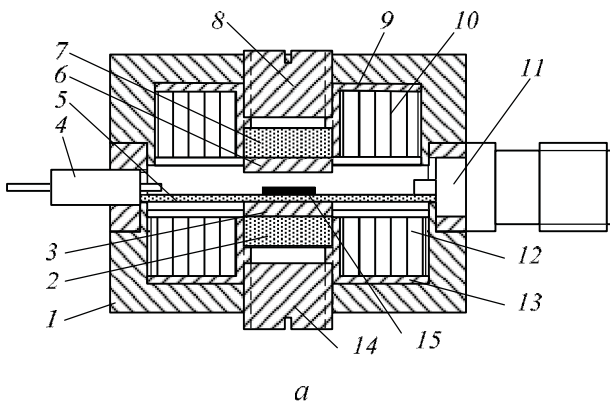


Рис. 7. Конструкция (а) и внешний вид (б) макета термостабильного транзисторного ЖИГ генератора. Обозначения рис. 7. а: 1 – стальной экран; 2, 7 – неодим-железо-боровые магниты; 3, 6 – полюсные наконечники; 4 – питание ЖИГ генератора; 5 – печатная плата с ЖИГ резонатором; 7 – пленочный ЖИГ резонатор; 8, 14 – регулировочные винты; 9, 13 – каркасы катушек электрического управления; 10, 12 – витки катушек электрического управления; 11 – выход СВЧ сигнала, 15 – ЖИГ резонатор



В макете генератора были установлены два одинаковых Ne-Fe-B магнита диаметром 5 мм и толщиной 1.5 мм. На плате генератора располагался пленочный ЖИГ резонатор круглой формы диаметром 2 мм. Резонатор изготавливался методом лазерного скрайбирования из эпитаксиальной пленки толщиной 13.6 мкм. Резонатор размещался в центре рабочего зазора магнитной системы, как показано на рис. 7, а. На вход генератора подавалось напряжение питания 2.5 В, генерируемый сигнал поступал на выходной СВЧ разъем макета генератора. Частота выходного сигнала измерялась частотомером.

Механическая перестройка частоты генератора осуществлялась при помощи изменения положения регулировочных винтов 8, 14 на рис. 7, а. Электрическая перестройка частоты осуществлялась подачей напряжения на катушки управления 10, 12 на рис. 7, а. Диапазон механической перестройки составлял 1.8–3.6 ГГц. Электрическая перестройка позволяла изменять частоту генерации в пределах  $\pm 100$  МГц.

Механическая регулировка частоты генератора использовалась для настройки системы термостабилизации, которая осуществлялась по методике, приведённой в работе [5]. Согласно данной методике генератор при комнатной температуре  $T_0$  настраивался на частоту стабилизации  $f_{st}(T_0)$ , на которой температурный коэффициент дрейфа частоты генератора  $\alpha_{st} = \Delta f_{st} / \Delta T$  обращался в ноль. После чего положение регулировочных винтов фиксировалось. В дальнейшем перестройка частоты генератора осуществлялась только электрической регулировкой.

Для определения частоты стабилизации  $f_{st}(T_0)$  проводились две серии измерений температурных зависимостей частот  $f_1(T)$ ,  $f_2(T)$ , которые отличались начальной настройкой частоты генератора при комнатной температуре  $f_1(T_0)$ ,  $f_2(T_0)$ . Частоты  $f_1(T_0)$ ,  $f_2(T_0)$  выбирались на краях диапазона механической перестройки так, чтобы температурные зависимости  $f_1(T)$ ,  $f_2(T)$  имели противоположный наклон, как показано на рис. 8 (см. кривые 1, 2).

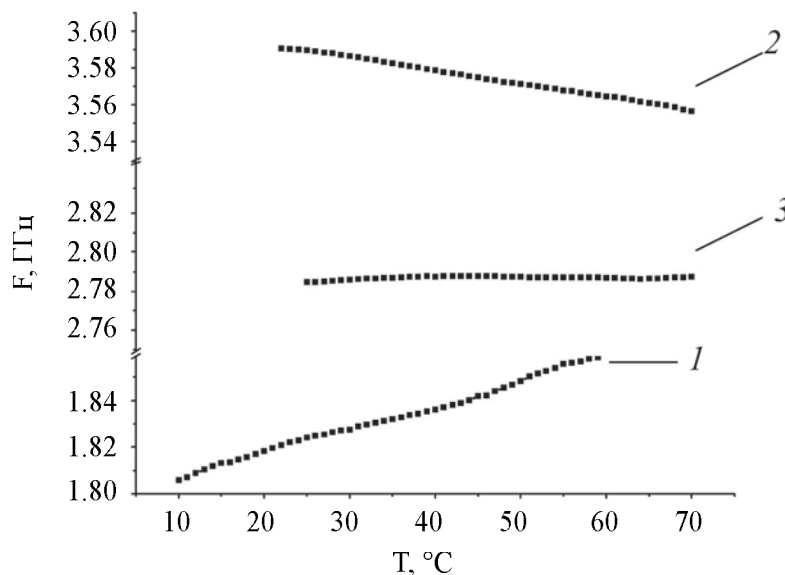


Рис. 8. Результаты измерения температурной зависимости частоты генератора:  
 1 –  $f_1(T_0) = 1.82$  ГГц; 2 –  $f_2(T_0) = 3.59$  ГГц; 3 –  $f_{st}(T_0) = 2.78$  ГГц

С использованием линейных аппроксимаций кривых 1, 2 рассчитывались температурные коэффициенты дрейфа частоты  $\alpha_1 = \Delta f(T) / \Delta T = 1.02$  КГц/°С и  $\alpha_2 = \Delta f(T) / \Delta T = 0.72$  КГц/°С, которые затем использовались для расчета частоты стабилизации ЖИГ генератора:

$$f_{st}(T_0) = \frac{\alpha_1 f_2(T_0) + \alpha_2 f_1(T_0)}{\alpha_1 + \alpha_2}.$$

В нашем случае, расчетная частота стабилизации оказалась равной  $f_{st}(T_0) = 2.78$  ГГц. При настрой-

ке генератора на эту частоту снова проводились температурные измерения  $f_{st}(T)$ , результаты которых представлены на рис. 8 (см. кривую 3). Как и ожидалось, линейная аппроксимация кривой 3 обуславливала температурный коэффициент  $\alpha_{st} \approx 0$ . При этом неравномерность частоты в диапазоне температур 20–80 °С не превышала  $\Delta f_{st}(T) \leq 10$  кГц.

Результаты измерения фазовых шумов генератора представлены на рис. 9.

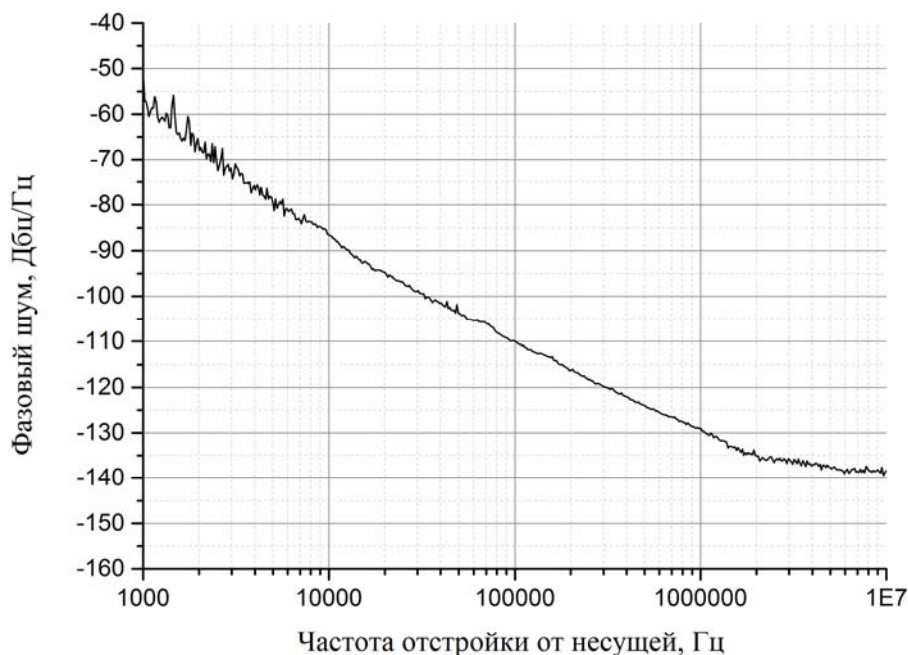


Рис. 9. Фазовые шумы макета транзисторного ЖИГ генератора

Видно, что фазовые шумы составляют  $-60$  дБм/Гц при отстройке частоты на  $1$  кГц и  $-85$  дБм/Гц при отстройке частоты на  $10$  кГц, что является типичной характеристикой для транзисторных ЖИГ генераторов.

### Заключение

Таким образом, была показана возможность создания термостабильного электрически перестраиваемого ЖИГ генератора с использованием портативной экранированной магнитной системы со встроенной системой электрической перестройки и температурной стабилизацией частоты. Важным преимуществом предложенного способа термостабилизации является то, что он практически не усложняет конструкцию намагничивающих систем, отличается простотой настройки и не зависит от индивидуальных особенностей пленок ЖИГ и постоянных магнитов. При этом обеспечивается стабильность частоты генератора в широком диапазоне положительных температур. Еще большее повышение температурной стабильности частоты может быть достигнуто за счет простейших методов термостатирования.

Было показано, что характеристики транзисторных генераторов с пленочным ЖИГ резонатором в цепи обратной связи сравнимы с аналогичными характеристиками генераторов на ЖИГ сферах. Использование пленочных резонаторов дает преимущество в плане повышения технологичности и снижения себестоимости

ЖИГ генераторов. Продвижение в область более высоких частот, а также дальнейшее улучшение электрических и шумовых характеристик ЖИГ генераторов на основе пленочных резонаторов может быть достигнуто за счет использования технологии интегральных схем.

### Список литературы

1. *Chenakin A.* Frequency Synthesis : Current Solutions and New Trends // Microwave Journal. 2007. May. P. 256–266.
2. Microlambda Wireless, YIG Tuned Oscillator web page. URL: <http://www.microlambdawireless.com/apppdfs/ytodefinitions2.pdf> (дата обращения: 09.04.2014).
3. *Кекало И. Б., Самарин Б. А.* Физическое металловедение прецизионных сплавов. Сплавы с особыми магнитными свойствами. М. : Металлургия, 1989.
4. А.с.5065565 Рос. Федерация. Экранированная магнитная система / В. В. Тихонов, А. В. Толкачев, Ю. Б. Рудый. – №5065565/09; заявл.18.08.1992; опубл.10.04.1996, Бюл. № 6.
5. *Тихонов В. В., Литвиненко А. Н., Никитов С. А., Сучков С. Г.* Температурная стабилизация спинволновых ферритовых устройств // РЭ. 2013. Т. 58, № 1. С. 83–90.
6. Миниатюрное устройство намагничивания и термостабилизации ферритовых СВЧ резонаторов : пат. 2492539 Рос. Федерация / Тихонов В. В., Литвиненко А. Н., Никитов С. А. – № 2011143096; заявл. 26.10.2011; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 25.
7. Высоочастотный биполярный транзистор BFU730F фирмы NXP. URL: [www.nxp.com/pip/BFU730F](http://www.nxp.com/pip/BFU730F) (дата обращения: 05.04.2014).



8. Высокочастотные пассивные элементы фирмы Murata. URL: <http://www.murata.com/products/microwave/index.html> (дата обращения: 09.04.2014).
9. Система проектирования электронных схем Advanced Design System. URL: <http://www.home.agilent.com/ru/pc-1297113/advanced-design-system-ads?&cc=RU&lc=rus> (дата обращения: 07.04.2014).
10. Spice-модель высокочастотного биполярного транзистора BFU730F фирмы NXP. URL: [http://www.nxp.com/documents/spice\\_model/spice\\_BFU730F.prm](http://www.nxp.com/documents/spice_model/spice_BFU730F.prm) (дата обращения: 07.04.2014).
11. S-параметры пассивных элементов фирмы Murata. URL: [http://www.murata.com/products/design\\_support/lib/index.html#tab](http://www.murata.com/products/design_support/lib/index.html#tab) (дата обращения: 07.04.2014).
12. Ollivier P. M. Microwave YIG-Tuned Transistor Oscillator Amplifier Design Application to C Band // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1972. Vol. SC-7, № 1. February. P. 54–60.

УДК 539.182/184, 519.677

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРОННЫХ СПЕКТРОВ МНОГОАТОМНЫХ МОЛЕКУЛ

М. К. Березин, М. Л. Чернавина,  
А. В. Новоселова, В. И. Березин

Саратовский государственный университет  
E-mail: nusena1975@mail.ru; berezin@sgu.ru



Описаны алгоритмы для колебательного анализа возбужденных электронных состояний молекул и вычисления изменения геометрии молекулы при электронном возбуждении. Алгоритмы реализованы в виде специальных программ. Описаны исходные данные программ. Все исходные данные для комплекса формируются на основе решения задач молекулярной динамики в рамках квантовых моделей. Разработаны алгоритмы решения обратной вибронной задачи, которые позволяют оценивать частоты нормальных колебаний, потенциальные функции в возбужденных электронных состояниях и вычислять изменение геометрии молекулы при электронном возбуждении. Представлена блок-схема программного комплекса и приведен численный пример.

**Ключевые слова:** колебательный анализ, электронное возбуждение, молекулярная динамика, квантовая модель, спектроскопия, поглощение, квантовомеханическое силовое поле.

### Numerical Simulation of Vibronic Spectra for Polyatomic Molecules

М. К. Berezin, М. L. Chernavina,  
А. V. Novoselova, V. I. Berezin

Algorithms for vibrational analysis of the excited electronic states of molecules and calculations of molecular structure at electronic excitation are described. Algorithms are realized in the form of special programs. Basic data of programs are described. All initial data for this complex are formed on the basis of the molecular dynamics and quantum models. Solution algorithms of the inverse vibronic task allowing to estimate frequencies of normal modes, force fields in the raised electronic conditions and to calculate molecular geometry changes at electronic excitation are developed. The flowchart of a program complex is submitted and the numerical example is given.

**Key words:** stable algorithm for calculation, normal mode analysis, electronic excited states, molecular dynamics, quantum model, vibronic spectroscopy, absorption spectra, quantum-mechanical force fields.

### Введение

Решение прямых и обратных вибронных задач проводится с целью получения информации о спектральных и структурных параметрах молекул непосредственно из экспериментальных вибронных спектров. К числу таких параметров относятся частоты нормальных колебаний и потенциальные функции в возбужденных электронных состояниях, изменение геометрии молекулы при электронном возбуждении, производные от момента перехода по нормальным координатам, характеризующие эффекты электронно-колебательного взаимодействия и элементы матрицы Душинского, оценивающие «перепутывание» нормальных координат при электронном возбуждении [1]. Все указанные параметры могут быть вычислены, как показано в [2], в рамках квантовых моделей при решении прямой вибронной задачи с помощью комплекса программ с применением методов *ab initio* и теории функционала плотности (DFT-методов). Однако приближенность квантовых моделей не позволяет рассчитывать эти параметры с точностью, достаточной для удовлетворительной интерпретации экспериментальных вибронных спектров. В связи с этим в программном комплексе предусмотрен ряд процедур, с помощью которых в интерактивном режиме возможно уточнение параметров исходной модели с целью получения лучшего согласия с экспериментом. Описание этих процедур и является целью данной работы.