

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра общей физики

**Магнитотранзисторы и элементы расчета
гетеромагнитного автогенератора**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 252 группы
направления 03.04.02 «Физика» физического факультета

Джихад Зульфикар Надхим Джихад

Научный руководитель
д. ф.-м. н., профессор

 14.06.2019

А.А. Игнатьев

Зав. Кафедрой
д. ф.-м. н., профессор

 14.06.2019

А.А. Игнатьев

Саратов 2019

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра общей физики

**Магнитотранзисторы и элементы расчета
гетеромагнитного автогенератора**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 252 группы

направления 03.04.02 «Физика» физического факультета

Джихад Зульфикар Надхим Джихад

Научный руководитель
д. ф.-м. н., профессор

А.А. Игнатьев

подпись, дата

Зав. Кафедрой
д. ф.-м. н., профессор

А.А. Игнатьев

подпись, дата

Саратов 2019

Структура и объем работы

Магистерская работа состоит из введения, двух глав, заключения, списка использованных источников. Основной текст содержит 57 стр. машинописного текста, включая 34 рисунка и 2 таблицы. Список использованных источников на 3 страницах содержит 29 наименований.

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность тематики магистерской работы, сформулирована цель работы и основные задачи, определены объект и предмет работы, изложено краткое содержание работы и основные положения, выносимые на защиту.

Целью данной работы магистра является ознакомление с магнитотранзисторами различных типов, моделирование схемы и проведение расчета гетеромагнитного автогенератора с помощью системы автоматизированного проектирования MWO-2012.

Соответственно задачами работы являются систематизация существующих магниточувствительных транзисторов (магнитотранзисторов) и магниточувствительных микросистем, ознакомление с системой автоматизированного проектирования MWO-2012, рассмотрение схемы построения гетеромагнитного автогенератора на транзисторе BFG-67 и проведение расчета характеристик гетеромагнитного автогенератора.

Объектом магистерской работы является магнитотранзисторы и элементы расчета гетеромагнитного автогенератора.

Предмет магистерской работы – построение электрической схемы и расчет выходных характеристик гетеромагнитного автогенератора на основе биполярного транзистора BFG – 67 с помощью САПР MWO-2012.

В первой главе, имеющей обзорный характер, анализируются различные типы магитотразисторов и их характеристики. Рассмотрены

принципы построения гетеромагнитных транзисторов различных типов, содержащих различные виды магнитоэлектронных элементов связи.

Во 2 разделе кратко рассмотрены возможности САПР MWO-2012 и их направления применения.

Системы автоматизированного проектирования (САПР) интенсивно развиваются на основе широкого использования информационных технологий как в России, так и за рубежом.

Эффективность САПР определяется степенью формализации постановки задачи, адекватностью перехода от физической модели к математическому описанию элементов техники, а также выбором и разработкой методов, алгоритмов и программ выполнения проектных процедур [1].

NI AWRDE - данный пакет объединяет три мощных инструмента, которые помогут с созданием среды для проектирования РЧ, аналоговых или интегрированных систем: Visual System Simulator (VSS), Microwave Office и Analog Office. Эти инструменты полностью интегрированы в пакет NI AWR Design Environment и позволяют использовать проекты отдельных схем в разработке сложных систем, не покидая среду проектирования [2].

Microwave Office и Analog Office позволяют создавать сложные схемы, состоящие из различных элементов и электромагнитных структур, доступных в обширной базе данных электрических моделей, и затем синтезировать топологию на основе созданных схем.

Далее во втором разделе была подробно рассмотрена схема автогенератора на биполярном транзисторе BFG – 67 с линейной эквивалентной схемой ферритового микрорезонатора (Рис. 1). Данная схема предложена аспирантом Саратовского национального исследовательского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского А.В. Васильевым.

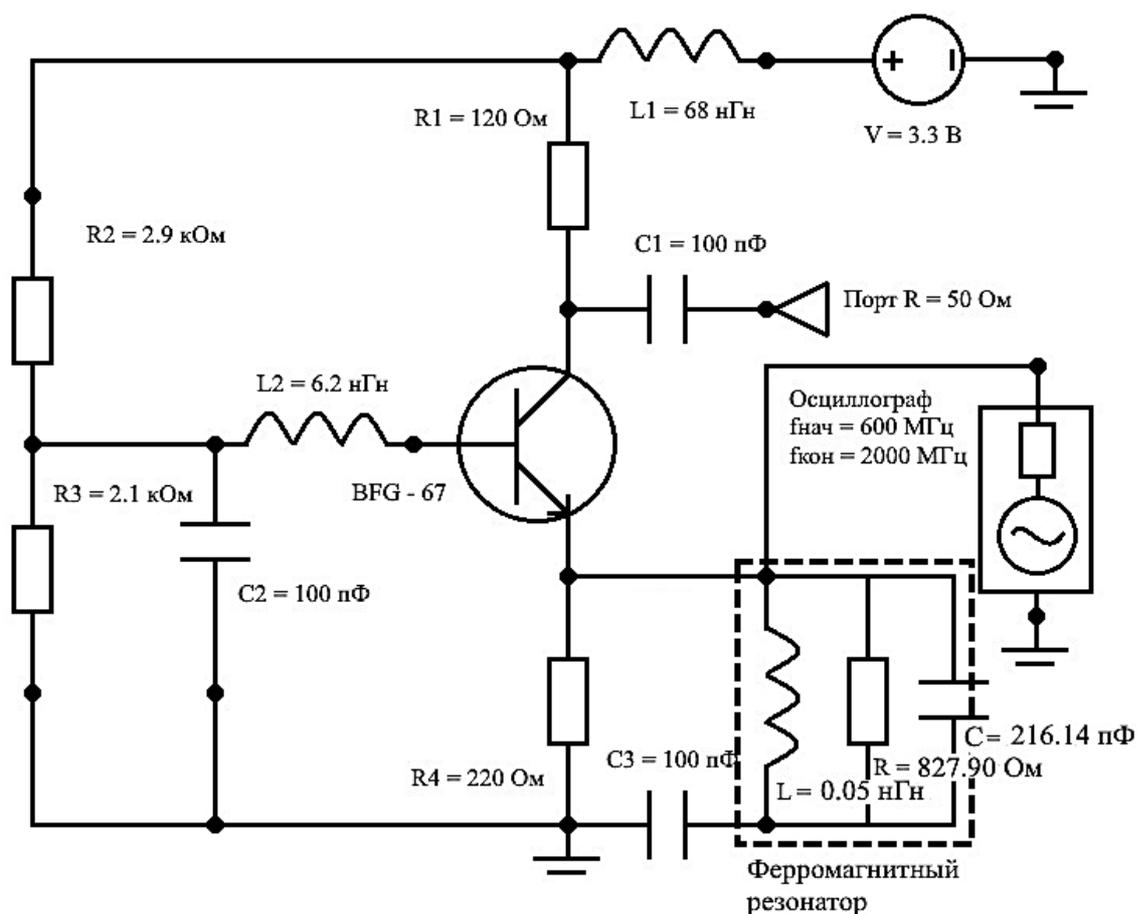


Рисунок 1 Электрическая схема автогенератора на основе биполярного транзистора BFG – 67

Такой n-p-n транзистор используется в связи с высоким коэффициентом усиления по мощности, $K_{ур} = 10-17$ дБ, который необходим для компенсации вносимых потерь в цепь положительной обратной связи автогенератора. Низкий уровень собственного шума ($K_{ш} = 1,3-3,0$ дБ) обуславливает повышенный уровень магнитной чувствительности, достигающей в настоящее время 1,0-0,1 нТл.

Электрическая схема автогенератора с цепью питания при рабочем напряжении $U = 3,3$ В и рабочем токе $I = 20$ мА. Выход генератора обеспечивает порт с сопротивлением $R = 50$ Ом.

Цепь обратной связи образуют элементы связи виткового типа, содержащие сферу феррита марки КГ-30 с пониженной намагниченностью

насыщения 300 Гс и полушириной линии ферромагнитного резонанса монокристаллического железо-итриевого граната (ЖИГ) $2\Delta H = 0,5 \text{ Э}$.

Ферромагнитный резонатор в виде эквивалентной схемы из RLC элементов образует колебательный контур, который изображен на рисунке 2.1 пунктиром. Отметим, что резонансная частота контура f_0 связана с полем подмагничивания H_0 и намагниченностью насыщения ЖИГ (КГ-30) – M_s соответственно.

$$f_0 \text{ (МГц)} = 28 \text{ (МГц/мТл)} \cdot V_{0i} \text{ (мТл)}, \quad (2.1)$$

где 28 (МГц/мТл) – гиромагнитное отношение для электрона;

V_{0i} (мТл) – внутренняя эффективная магнитная индукция сферического ЖИГ-резонатора.

Причем величина V_{0i} зависит от внешней магнитной индукции V_0 и сферического резонатора с намагниченностью насыщения $\cdot\pi \cdot M_s$ через соотношение:

$$V_{0i} = V_0 + \cdot\pi \cdot M_s. \quad (2.2)$$

Тогда девиация внутренней магнитной индукции ΔV_{0i} сферического резонатора с намагниченностью насыщения M_s будет:

$$\Delta V_{0i} = \Delta V_0 + \cdot\pi \cdot M_s, \quad (2.3)$$

где ΔV_0 – изменение подмагничивания.

Величина девиации подмагничивания ΔV_0 связана с изменением внешней магнитной индукцией $\Delta V_{\text{внешн}}$, причем

$$\Delta V_0 = V_{0 \text{ магн сист}} + \Delta V_{\text{внешн}}. \quad (2.4)$$

Тогда величина девиации частоты гетеромагнитного автогенератора, работающего в гармоническом режиме:

$$\Delta f_0 \text{ (МГц)} = 28 \text{ (МГц/мТл)} \cdot \Delta V_{0i} \text{ (мТл)}. \quad (2.5)$$

Далее в работе были приведены основные параметры и характеристики биполярного транзистора BFG – 67.

BFG–67 – кремниевый биполярный широкополосный n-p-n транзистор [3].

Особенности транзистора:

- высокий коэффициент усиления по мощности;
- низкий коэффициент шума;
- высокая частота перехода;
- золотая металлизация, обеспечивающая отличную надежность.

Применение: Широкополосные устройства в диапазоне ГГц, таких как спутниковые ТВ – тюнеры и портативные средства связи.

На таблицах 1 и 2 представлены основные характеристики транзистора BFG-67, такие как значения предельно допустимых режимов эксплуатации [4] и тепловые характеристики (таблица 1), а также электрические характеристики (таблица 2). Все характеристики указаны при температуре окружающей среды в 25 °С

Таблица 1

Значения предельно допустимых электрических режимов эксплуатации и тепловые характеристики транзистора BFG-67

Значения предельно допустимых электрических режимов эксплуатации		
Параметр	обозначение	Значение
напряжение коллектор-база	Uкб max	20 В
напряжение коллектор-эмиттер	Uкэ max	10 В
напряжение эмиттер-база	Uэб max	2.5 В
постоянный ток коллектора	Iк max	50 мА
рассеиваемая мощность коллектора	Pк max	380 мВт
температура перехода	Tj	175 °С
диапазон рабочих температур	Tamb	от -65 до 150 °С
диапазон температур хранения	Tstg	от -65 до 150 °С
Тепловые характеристики		
Параметр	обозначение	Значение
тепловое сопротивление от перехода к точке пайки	Rth j-a	290 К/Вт

Электрические характеристики транзистора BFG-67

Электрические характеристики			
Параметр	обозначение	Значение	Условия испытания
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Коллектор-база ток отсечки	$I_{кбо}$	до 50 нА	$U_{кб}=5 В, I_э=0$
Коэффициент передачи тока	h_{21}	от 60 до 100	$I_к=15 мА, U_{кэ}=5 В$
Граничная частота коэф. Передачи тока	$f_{гр.}$	8 ГГц	$I_к=15 мА, U_{кэ}=8 В, f=500 МГц$
Емкость коллекторного перехода	$C_{к}$	0,7 пФ	$U_{кб}=8 В, I_э=0 мА, f=1 МГц$
Емкость эмитерного перехода	$C_э$	1,3 пФ	$U_{эб}=0,5 В, I_к=0 мА, f=1 МГц$
Емкость обратной связи	$C_{ос}$	0,5 пФ	$U_{кб}=8 В, I_к=0 мА, f=1 МГц$
Коэффициент усиления по мощности	$K_{уР}$	17 дБ	$U_{кб}=8 В, I_к=15 мА, f=1 ГГц, T_{amb}=25 °C$
		10 дБ	$U_{кб}=8 В, I_к=30 мА, f=2 ГГц, T_{amb}=25 °C$
Коэффициент шума	$K_{ш}$	1,3 дБ	$U_{кб}=8 В, I_к=5 мА, f=1 ГГц, T_{amb}=25 °C$
		1,7 дБ	$U_{кб}=8 В, I_к=15 мА, f=1 ГГц, T_{amb}=25 °C$
		2,5 дБ	$U_{кб}=8 В, I_к=5 мА, f=2 ГГц, T_{amb}=25 °C$
		3 дБ	$U_{кб}=8 В, I_к=15 мА, f=2 ГГц, T_{amb}=25 °C$

Так же во втором разделе был выполнен расчет резонансной характеристики ферритового микрорезонатора на схеме.

Работа резонаторов на основе железо-иттриевого граната (ЖИГ) основана на явлении резонанса прецессионного движения спиновых моментов электронов в монокристаллах феррита.

В общем случае резонатор представляет собой ЖИГ-сферу диаметром 0,2-0,7 мм с хорошо обработанной поверхностью, охваченную взаимно перпендикулярными полупетлями [5].

ЖИГ – резонатор по своей сути - резонатор СВЧ диапазона на основе ферромагнитных свойств железо-иттриевого граната. ЖИГ – резонаторы имеют исключительно высокую добротность ($2...3 \cdot 10^3$), при этом способны перестраиваться по частоте в широком диапазоне в некоторых конструкциях - больше декады, в большинстве практических конструкций - порядка октавы.

На основе ЖИГ резонаторов строятся перестраиваемые [генераторы](#) и [фильтры](#) СВЧ - диапазона.

ЖИГ генераторы используются в качестве [гетеродинов](#) анализаторов спектра и генераторов стандартных сигналов, благодаря сочетанию способности к перестройке в широком диапазоне и малых фазовых [шумов](#).

Фильтры, построенные на основе ЖИГ-резонаторов, находят применение в качестве преселекторов высококачественных приемников СВЧ диапазона, в составе широкополосных умножителей частоты [6].

Характеристики ЖИГ – резонатора КГ30:

КГ30 - марка ЖИГ-резонатора

$4\pi M_s$ – намагниченность ЖИГ-резонатора, Гс (360 для КГ30)

dH – ширина резонансной линии ФМР (0.3 для КГ30)

Частота измерения – 1.5 ГГц

Точка Кюри – 155 °С

Полоса рабочих частот – 1.35 – 4.0 ГГц

R_0 – начальное сопротивление

L – Индуктивность катушки

C – Емкость конденсатора

Резонансная кривая ЖИГ - резонатора

ЖИГ – резонатор обладает собственными характеристиками, такими как: ширина резонансной кривой и потерями. Снятие этих характеристик производится через схему, представленную на рисунке 2.

В данной схеме колебательный контур включен как полосовой фильтр: R - последовательно, LC - параллельно. Входной сигнал поступает на порт 1, а выходной снимается с порта 2, после прохода через линейный ЖИГ – резонатор. С помощью подобной схемы была снята резонансная кривая, изображенная на рисунке 3.

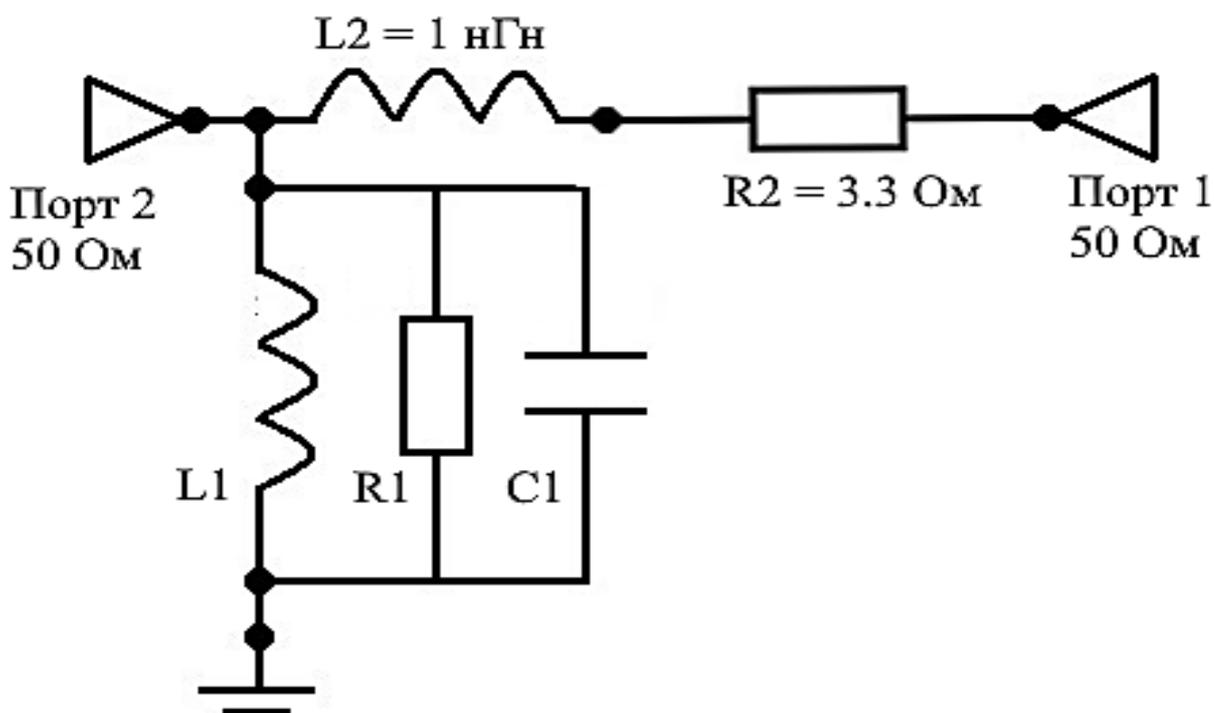


Рисунок 2 Схема снятия характеристик ЖИГ - резонатора

Ширина резонансной кривой определяется на уровне в -3 дБм и равна примерно 25 МГц.

Потери – вершина графика, недостающая до 0 по вертикальной оси. В данном случае потери – 0,8 дБм

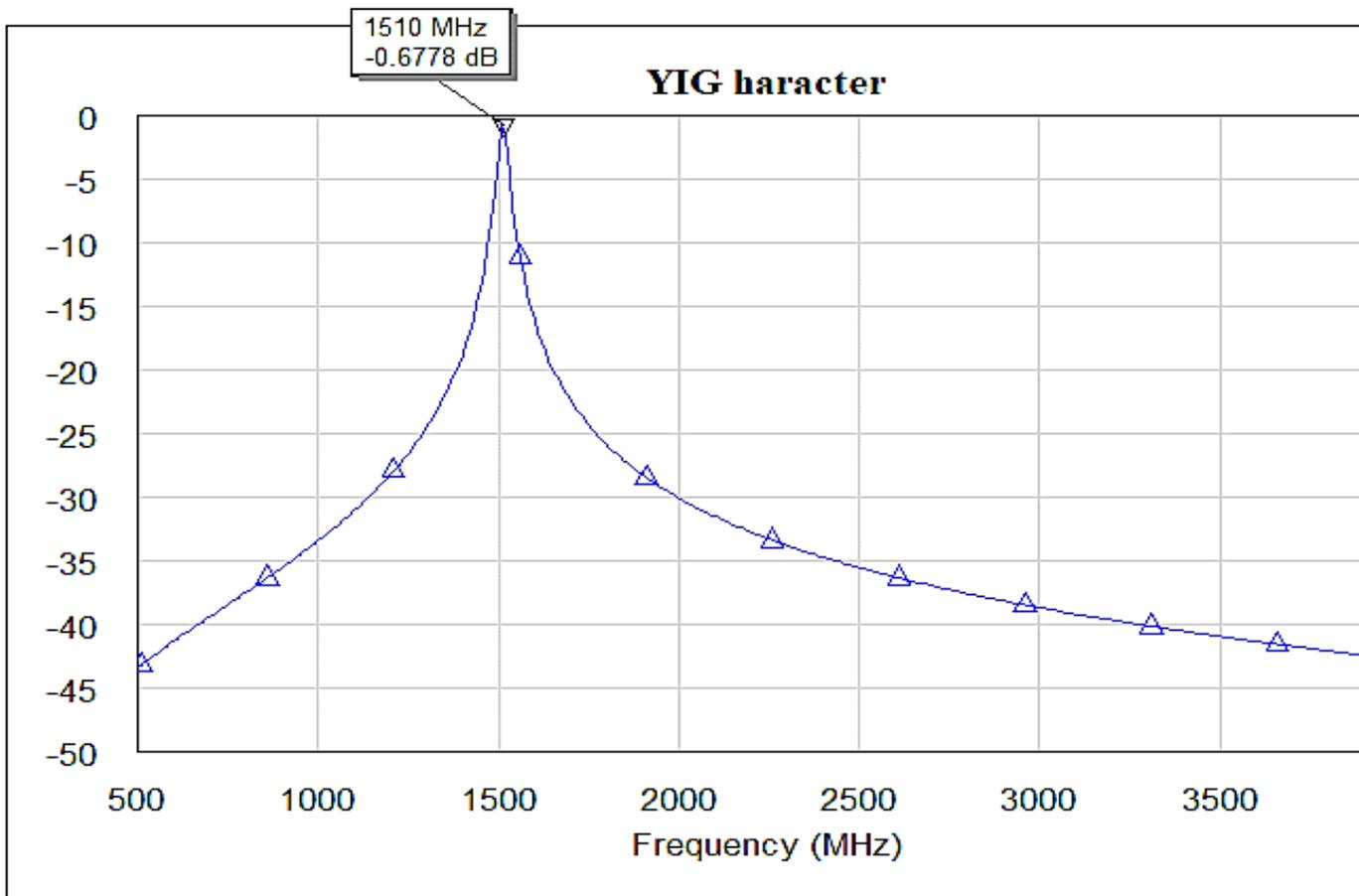


Рисунок 3 Характеристики ЖИГ – резонатора

Таким образом, проведено моделирование ЖИГ резонатора.

Формулы для расчета характеристик магнито-электронного элемента связи (МЭЭС):

Все характеристики резонатора определяются [3] по формулам 2.6 – 2.14:

$$F_0 = \gamma H_0, \quad (2.6)$$

$$\gamma = 28 \text{ МГц/мТл}, \quad (2.7)$$

$$R_0 = \mu_0 V K^2 \omega_m Q_h; \quad (2.8)$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}, \quad (2.9)$$

$$V = 1/6\pi d^3, \quad (2.10)$$

$$\omega_m = 2\pi\gamma \cdot 4\pi M_s, \quad (2.11)$$

$$Q_h =, \quad (2.12)$$

$$L_0 =, \quad (2.13)$$

$$C_0 =. \quad (2.14)$$

В данных формулах (2.6-2.14) используются следующие обозначения:

F_0 - резонансная частота ферритового микрорезонатора (ФМР);

γ – гиромагнитное отношение для электрона;

H_0 – внешнее магнитное поле;

R_0 – активное сопротивление МЭЭС;

μ_0 – магнитная постоянная;

V – объем ферритовой сферы;

d – диаметр ферритовой сферы;

ω_m – круговая частота ФМР;

ω_0 – круговая начальная частота;

Q_h – ненагруженная добротность ФМР;

$4\pi M_s$ – намагниченность насыщения феррита;

ΔH – ширина резонансной линии фмр;

L_0 индуктивность контура;

C_0 – емкость контура.

По данным формулам в работе были рассчитаны основные характеристики ЖИГ-резонатора.

Характеристики ЖИГ – резонатора в схеме:

$$R = 827,90 \text{ Ом.}$$

$$L = 0,05 \text{ нГн.}$$

$$C = 216,14 \text{ пФ.}$$

Выход сгенерированного сигнала направлен транзистором на порт выхода.

В заключительной части 2 раздела магистерской работы мы определили режим неустойчивости гетеромагнитного автогенератора и спектр выходного сигнала.

Автогенератор – устройство, преобразующее энергию источников питания в энергию ВЧ - колебаний (вырабатывающее электрические колебания) без внешнего воздействия [7]. Содержит активный элемент (транзистор), резонатор (высокодобротный колебательный контур), цепь положительной обратной связи.

Независимо от назначения автогенераторов, они должны удовлетворять следующим общим требованиям: иметь достаточно высокое постоянство (стабильность) частоты колебаний и выходной мощности, а также возможно близкую к синусоидальной форму выходного напряжения.

Плавное нарастание колебаний в автогенераторе при включении питания возможно лишь в случае, когда потери энергии в контуре меньше, чем поступление её от транзистора [7].

Условие самовозбуждения генератора выполняется при уменьшении резонансного сопротивления колебательного контура лишь до определенной минимальной величины, которой соответствует минимальное допустимое активное сопротивление датчика. Если сопротивление датчика ниже этой величины, происходит срыв колебаний генератора и измерение становится невозможным.

Для снятия неустойчивости в программе NI AWR Design Environment менялась магнитная индукция от 32 мТл до 70 мТл. и снимались характеристики основной гармоники выходного сигнала.

В данном случае характеристиками были частота сигнала в МГц и его мощность в дБм. По полученным данным был построен график, изображенный на 4.

Рисунок 4 Неустойчивость автогенератора

В ходе моделирования автогенератора был получен спектр зависимости частоты генерации (МГц) от амплитуды сигнала (dBm), который изображен на рисунке 25.

В генераторе менялась магнитная индукция подмагничивания в пределах от 32 мТл до 70 мТл.

При магнитной индукции 54,5 мТл наблюдалось максимальная амплитуда. Основная гармоника выделена красным цветом. Частота основной линии 1521 МГц.

Рисунок 5 Спектр гетеромагнитного автогенератора. Зависимость частоты от мощности сигнала

Таким образом, рассмотрена схема построения на биполярном транзисторе BFG-67, в цепи положительной обратной связи которой находится ЖИГ-резонатор с резонансной частотой, определяемой подмагничивающей индукцией, имеющий область устойчивости при изменении магнитной индукции от 32 мТл до 70 мТл.

Список использованных источников

- Карякин Л.В., Карякин Д.В. Развитие прикладных систем автоматизированного проектирования телекоммуникационных систем и устройств // Научно-технические ведомости СПбГПУ, серия Информатика, телекоммуникации, управление №1, 2009. – С.109-115
- National Instruments. Руководство по Microwave Office MMIC2017. - 108 с.
- Васильев А.В., Игнатьев А.А. Расчет характеристик магнитоэлектронного генератора с использованием нелинейной модели

ЖИГ-резонатора// Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. докл. и ст. II и III науч.-техн. совещ. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2005. Вып. 2. Методы проектирования магнитоэлектронных устройств. С. 59–62.

- Карякин В.В., Карякин Д.В. Система автоматизированного проектирования телекоммуникационных устройств «Telecom-MWO» // Сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Телеком-2007». Ростов-на-Дону: СКФ МТУСИ. 2007. С. 28-33.

- Лаврентьев Б. Ф. Схемотехника электронных средств. - М.: Издательский центр «Академия», 2010. - С. 53-68. - 336 с.

- Кувшинов В., Майстренко А. Жиг-генераторы и синтезаторы частот компании Micro Lambda Wireless // Компоненты И Технологии. -№ 9 – 2015

- Сазонов Д. М., Антенны И Устройства Свч: Учеб. Для Радиотехнических Спец. Вузов. – М.: Высш. Шк., 1988 – 432 С.

Список использованных источников

1. Карякин Л.В., Карякин Д.В. Развитие прикладных систем автоматизированного проектирования телекоммуникационных систем и устройств // Научно-технические ведомости СПбГПУ, серия Информатика, телекоммуникации, управление №1, 2009. – С.109-115
2. National Instruments. Руководство по Microwave Office MMIC2017. - 108 с.
3. Васильев А.В., Игнатьев А.А. Расчет характеристик магнитоэлектронного генератора с использованием нелинейной модели ЖИГ-резонатора// Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. докл. и ст. II и III науч.-техн. совещ. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2005. Вып. 2. Методы проектирования магнитоэлектронных устройств. С. 59–62.
4. Карякин В.В., Карякин Д.В. Система автоматизированного проектирования телекоммуникационных устройств «Telecom-MWO» // Сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Телеком-2007». Ростов-на-Дону: СКФ МТУСИ. 2007. С. 28-33.
5. Лаврентьев Б. Ф. Схемотехника электронных средств. - М.: Издательский центр «Академия», 2010. - С. 53-68. - 336 с.
6. Кувшинов В., Майстренко А. Жиг-генераторы и синтезаторы частот компании Micro Lambda Wireless // Компоненты И Технологии. -№ 9 – 2015
7. Сазонов Д. М., Антенны И Устройства Свч: Учеб. Для Радиотехнических Спец. Вузов. – М.: Высш. Шк., 1988 – 432 С.



13.06.2019