

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.396.6:621.391.827

АШАМИС
Абдэльхаким Омран

**ВОСПРИИМЧИВОСТЬ ГЕНЕРАТОРОВ СВЧ-ДИАПАЗОНА
К ВОЗДЕЙСТВИЮ ВНЕШНЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОМЕХИ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения

Минск 2012

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель

Бригидин Анатолий Михайлович, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры радиотехнических устройств учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты:

Воропаев Юрий Павлович, доктор технических наук, профессор, пенсионер.
Корневский Святослав Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры систем телекоммуникаций учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Оппонирующая организация

ОАО «АЛЕВКУРП»

Защита состоится 31 января 2013 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. 293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «22» декабря 2012 года

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение совместной работы различных радиоэлектронных средств (РЭС) с каждым годом приобретает все большее значение. Значимость данной проблемы обусловлена также и электромагнитной совместимостью РЭС при работе в сложной помеховой обстановке. Данная проблема является частью более общей проблемы, которая заключается в обеспечении функционирования РЭС, в частности, генераторов СВЧ, находящихся под любым внешним воздействием. Это могут быть выходные каскады передатчиков, гетеродины, на которые поступает внешний сигнал, системы синхронизации. При этом режим синхронизации рассмотрен в ряде литературных источников достаточно глубоко. Вместе с тем несинхронно возбуждаемые колебаний изучены не в полной мере. Тем не менее их появление может привести к срыву работы критически важных устройств и систем.

В диссертационной работе проводится обоснование и производится выбор критерия оценки реакции генератора СВЧ на воздействие внешней электромагнитной помехи. Таким критерием предлагается определить восприимчивость генератора СВЧ к воздействию электромагнитной помехи. Знание восприимчивости даст возможность специалистам уже на этапе проектирования радиоаппаратуры выбрать соответствующий тип генератора с тем чтобы обеспечить требования электромагнитной совместимости, предъявляемые к разрабатываемым изделиям.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Работа выполнялась на кафедре радиотехнических устройств Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники в рамках НИР ГБ 06-2010 по теме «Разработать теорию, алгоритмы, методологию структурно-функциональной схемотехники и программно-аппаратные средства формирования, приема и обработки сигнально-кодовых конструкций в помехозащищенных радиоинформационных системах», а также ГБ 11-2010 по теме «Разработать модели, алгоритмы функционирования и структурно-функциональную схемотехнику телекоммуникационных систем и сетей с учетом критериев качества обслуживания, помехоустойчивости, характеристик обслуживаемого трафика и электромагнитной совместимости».

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является анализ воздействия внешних электромагнитных помех на генератор СВЧ и разработка мер по снижению восприимчивости генератора к такому воздействию.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- разработка критерия определения восприимчивости полупроводникового автономного генератора СВЧ к воздействию внешней электромагнитной помехи;
- исследование восприимчивости генератора СВЧ с внешней дополнительной обратной связью (ВДОС) к воздействию внешнего колебания;
- обоснование и выбор критерия оценки реакции генераторов СВЧ с принудительной синхронизацией на воздействие внешней электромагнитной помехи;
- сравнительный анализ восприимчивости различных типов генераторов СВЧ к воздействию внешних колебаний;
- экспериментальные исследования восприимчивости полупроводниковых генераторов СВЧ.

Объектом исследования являются генераторы СВЧ на диодах Ганна.

Предметом исследования является восприимчивость генераторов СВЧ-диапазона к внешнему электромагнитному воздействию.

Положения, выносимые на защиту

1. Обоснование критерия оценки реакции генератора СВЧ на воздействие внешней электромагнитной помехи в виде параметра восприимчивости, основанного на одновременном учете параметров генератора и помехи, частотного разнеса между полезным и помеховым сигналами, что позволило использовать данный критерий для качественной и количественной оценки работоспособности генераторных устройств в условиях внешних воздействий.

2. Теоретическое и экспериментальное обоснование модифицированного метода расчета побочных выходных колебаний интермодуляционного типа СВЧ генераторов, основанного на дополнительном учете составляющих выходного спектра, расположенных со стороны помехи, что позволило более точно определить спектр генерируемых побочных колебаний для повышения эффективности распределения и использования радиочастотного ресурса.

3. Синтез схемы генератора СВЧ с внешней дополнительной обратной связью, отличающейся заменой ферритового циркулятора и направленного ответвителя квадратурным мостом, что позволило снизить общие затраты на создание цепи ВДОС при сохранении основных рабочих характеристик генератора.

Личный вклад соискателя

Соискатель лично выполнил:

- анализ научно-технической литературы по электромагнитной совместимости и теории синхронизации и на основе этого обосновал меру оценки реакции генераторов СВЧ на внешнюю электромагнитную помеху по параметру восприимчивости устройства;
- разработку новой конструктивной модели генератора СВЧ с внешней дополнительной обратной связью;
- вывод расчетных соотношений для оценки спектра выходных побочных колебаний интермодуляционного типа.

Совместно с руководителем соискатель выполнил:

- анализ амплитудных, фазовых и шумовых характеристик генератора СВЧ с внешней дополнительной обратной связью, а также определил возможность использования этого типа генераторов в различных радиотехнических устройствах;
- вывод расчетных соотношений для анализа спектра выходных колебаний интермодуляционного типа генератора СВЧ с внешней дополнительной обратной связью с принудительной синхронизацией и определил их восприимчивость к воздействию электромагнитной помехи;
- экспериментальные исследования выходных побочных колебаний генераторов СВЧ в условиях их работы при воздействии электромагнитной помехи, а также сравнительный анализ восприимчивости различных типов генераторов диапазона СВЧ.

Апробация результатов диссертации

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международная научно-техническая конференция, посвященная 45-летию МРТИ–БГУИР (БГУИР, Минск, Беларусь, 2009 г.); 19-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (14–18 сентября 2009 г. Севастополь, Крым, Украина); XVI Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (13–15 апреля 2010 г. Воронеж, Россия); 6-я Международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2010» (19–24 апреля 2010 г., Севастополь, Украина); 20-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (13–17 сентября 2010 г. Севастополь, Крым, Украина); XV Международная научно-техническая конференция «Современные средства связи» (28–30 сентября 2010 г. Минск, Беларусь); 7-я Международная молодежная научно-техническая конференция «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2011» (11–15 апреля 2011 г., Севастополь, Украина); XVI Международная научно-техническая конференция «Современные средства связи» (27–29 сентября 2011 г. Минск, Беларусь).

Опубликованность результатов диссертации

По материалам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 13 печатных работ, в том числе 5 статей в научных журналах общим объемом 2,2 авторских листа, 8 статей и тезисов докладов в сборниках материалов конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и трех приложений. В первой главе рассмотрено современное состояние проблемы электромагнитной совместимости, методы синхронизации как инструменты исследования интермодуляционных колебаний генераторов СВЧ. Во второй главе приведены результаты исследований восприимчивости автономного генератора СВЧ на диоде Ганна при воздействии на него внешней электромагнитной помехи. В третьей главе исследована восприимчивость синхронизированного генератора СВЧ на диоде Ганна при воздействии на него внешней электромагнитной помехи. В четвертой главе проведен анализ характеристик генератора СВЧ на диоде Ганна с внешней дополнительной обратной связью. Общий объем диссертационной работы составляет 113 страниц, из них 71 страница текста, 27 рисунков на 23 страницах, 3 приложения на 13 страницах, библиография из 76 источников на 6 страницах, включая 13 собственных публикаций автора.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* подчеркивается, что внешняя электромагнитная помеха (ЭП), проникая в радиопередатчик, создает на его выходе спектр побочных излучений интермодуляционного типа, которые не только ухудшают функционирование других радиосредств, но и искажают собственный полученный сигнал. Предлагается оценку составляющих интермодуляционного спектра передатчика производить по его восприимчивости к воздействию ЭП.

В *первой главе* рассмотрено современное состояние проблемы электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств.

Анализ современных литературных источников, опубликованных в известных научных журналах за последнее десятилетие, показывает, что аномальные процессы, происходящие в генераторах СВЧ при воздействии на них ЭП, изучены недостаточно полно, например нет предложений по сведению к минимуму последствий внешнего воздействия на генераторы СВЧ, которые сегодня используются в качестве оконечных каскадов радиопередатчиков и др.

В соответствии с существующими нормами на побочные излучения в настоящее время уровни составляющих колебаний интермодуляционного типа измеряются по тракту устройства или по полю, хотя в радиоэлектронике при анализе процесса воздействия внешней ЭП на радиосредства закрепилось такое

понятие, как восприимчивость устройства (усилитель, транзистор, операционный усилитель и т.д.) к внешнему воздействию.

Обосновывается критерий реакции (восприимчивости) генераторов СВЧ на воздействие внешней помехи. Учитывая, что уровни составляющих частот интермодуляционного спектра зависят как от частоты помехи и частоты полезного сигнала, так и от полосы синхронизации. За восприимчивость генератора СВЧ предлагается принять величину $P = \frac{\Delta\omega}{\alpha}$, где $\Delta\omega$ – разность частот по-

лезного и помехового сигналов $\alpha = \frac{\omega_0 E_{\text{п}}}{2Q_{\text{H}} U_{a0}}$, где $\omega_0, Q_{\text{H}}, E_{\text{п}}, U_{a0}$ –

соответственно резонансная частота автоколебательной системы, её нагруженная добротность, амплитуды напряжений помехового сигнала и генератора.

Таким образом, связав наибольшие по амплитуде уровни интермодуляционного спектра с величиной P , можно будет легко рассчитать восприимчивость генератора СВЧ и сравнить реакцию на воздействие ЭП различных типов генераторов СВЧ: автономного, синхронизированного, генератора с внешней дополнительной обратной связью.

Во второй главе рассмотрена восприимчивость автономного генератора СВЧ. Интермодуляционный спектр на выходе генератора СВЧ формируется в результате изменений фазы φ , возникающих из-за взаимодействия полезного и помехового сигнала.

$$u = U_{a1} \sin(\omega_{\text{п}} t - \varphi), \quad (1)$$

где U_{a1}, φ – амплитуда и фаза высокочастотного напряжения генератора СВЧ, работающего в режиме воздействия внешнего сигнала, $\omega_{\text{п}}$ – угловая частота.

Для нахождения амплитуды U_{a1} и фазы φ составлены следующие укороченные уравнения генератора СВЧ:

$$\frac{dU_{a1}}{dt} = -\frac{\omega_0}{2Q_{\text{H}}} (U_{a1} - U_{a0}) - E_{\text{п}} \cdot \cos\varphi, \quad (2)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{\omega_0}{2Q_{\text{H}}} \left[\left(\frac{\omega_{\text{п}} - \omega_0}{\omega_0} \right) \cdot 2Q_{\text{H}} + \frac{U_{a0}}{U_{a1}} \cdot \text{tg}\theta + \frac{E_{\text{п}}}{U_{a1}} \cdot \sin\varphi \right],$$

где θ – угол запаздывания первой высокочастотной гармоники относительно напряжения U_{a0} .

Найдена амплитуда высокочастотного напряжения U_{a1} и выведено фазовое уравнение генератора, находящегося под внешним воздействием:

$$U_{a1} = U_{a0} + E_{\text{п}} \cos\varphi, \quad (3)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = (\omega_{\text{п}} - \omega_{\text{Г}}) - \frac{\omega_0 E_{\text{п}}}{2Q_{\text{H}} U_{a0}} \sin\varphi, \quad (4)$$

где $\omega_{\text{Г}} = \omega_0 \left(1 - \frac{\text{tg}\theta}{2Q_{\text{H}}} \right)$.

С учетом (4) уравнение (1) будет иметь вид

$$\begin{aligned}
 u &= U_{a0} \sin(\omega_n t - \varphi) + E_{\mathcal{H}} \sin(\omega_n t - \varphi) \cos \varphi = \\
 &= -U_{a0} [\sin \omega_n t (b_1 \sin z + b_2 \sin 2z)] - U_{a0} [\cos \omega_n t (a_0 + a_1 \cos z + a_2 \cos 2z)] + \\
 &+ \frac{1}{2} E_{\mathcal{H}} \sin \omega_n t + \frac{1}{2} E_{\mathcal{H}} \sin(\omega_n t - 2\varphi) = -\frac{U_{a0}}{2} b_1 [\cos(\omega_n t - z) - \cos(\omega_n t + z)] - \\
 &- \frac{U_{a0}}{2} b_2 [\cos(\omega_n t - 2z) - \cos(\omega_n t + 2z)] - a_0 U_{a0} \cos \omega_n t - \frac{U_{a0}}{2} a_1 [\cos(\omega_n t - \\
 &- z) + \cos(\omega_n t + z)] - \frac{U_{a0}}{2} a_2 [\cos(\omega_n t - 2z) + \cos(\omega_n t + 2z)] + \frac{1}{2} E_{\mathcal{H}} \sin \omega_n t + \\
 &+ \frac{1}{2} E_{\mathcal{H}} [\sin \omega_n t \cdot \cos 2\varphi - \cos \omega_n t \sin 2\varphi], \quad (5)
 \end{aligned}$$

где $z = \Omega t - \gamma$;

Решение уравнения (4) может быть получено путем его прямого интегрирования:

$$t = \int_0^{\varphi} \frac{d\varphi}{(\omega_n - \omega_r) - \frac{E_{\mathcal{H}} \omega_0}{2Q_n U_{a0}} \sin \varphi} \quad (6)$$

Интеграл от тригонометрических функций (6) для случая $|\omega_n - \omega_r| < \frac{E_{\mathcal{H}} \omega_0}{2Q_n U_{a0}} \sin \varphi$ равен

$$\cos \varphi = \frac{(1 - q^2) \cos \psi - q \sqrt{1 - q^2} \sin \psi}{(1 + q^2) \cos \psi - q \sqrt{1 - q^2} \sin \psi}, \quad (7)$$

$$\text{где } q = \frac{E_{\mathcal{H}} \omega_0}{2Q_n U_{a0} \cdot |\omega_n - \omega_r|}; \quad \psi = \Omega t; \quad \Omega = |\omega_n - \omega_r| \sqrt{1 - q^2}.$$

Представление фазового угла генератора в виде выражения (7) существенно облегчает отыскание выражения для спектра выходных колебаний генератора при неполной его синхронизации. Вводя новые обозначение: $\sin \psi = \sqrt{1 - q^2}$, $\cos \psi = q$ и изменяя знак дроби на «минус», приведем это равенство к виду

$$\cos \varphi = -\frac{\sqrt{1 - q^2} \sin(\Omega t - \gamma)}{1 - q \cos(\Omega t - \gamma)}. \quad (8)$$

Тогда

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = \frac{q + \cos z}{1 + q \cos z}, \quad (9)$$

$$\text{Соответственно } \cos 2\varphi = \cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi = 2\cos^2 \varphi - 1 = 2 \frac{(1-q^2) \sin^2 z}{(1+q \cos z)} - 1, \quad (10)$$

$$\sin 2\varphi = 2 \sin \varphi \cdot \cos \varphi = -2 \frac{\sqrt{1-q^2} \sin z (q - \sin z)}{(1+q \cos z)^2}. \quad (11)$$

Функции $\sin \varphi$ (9) и $\cos 2\varphi$ (10) периодические, могут быть разложены в ряд Фурье, функции $\cos \varphi$ (8) и $\sin 2\varphi$ (11) периодические, также могут быть разложены в ряд Фурье: a_0, a_1, b_1, b_2 , а также c_0, c_1, c_2, d_1, d_2 с учетом того, что $a_1 = b_1, a_2 = b_2, c_1 = d_1, c_2 = d_2$.

После разложения выражение (5) может быть преобразовано к виду

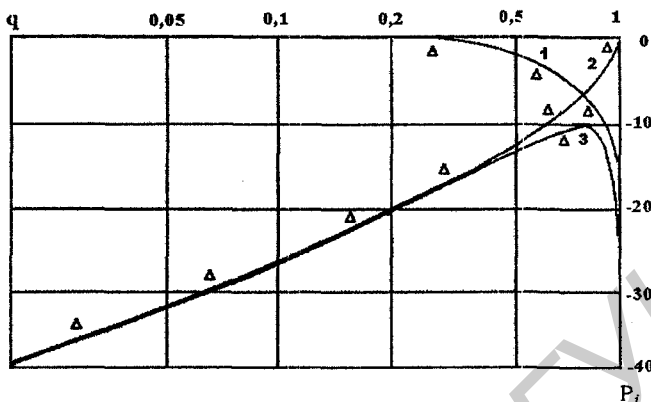
$$u = \sqrt{(a_0 U_{a0})^2 + \frac{E_n^2}{4} (1+c_0)^2} \cdot \cos[\omega_n t + \arctg \frac{E_n (1-c_0)}{a_0 U_{a0}} - \pi] + a_1 U_{a0} \cos(\omega'_1 t + \gamma - \pi) + a_2 U_{a0} \cos[(2\omega'_1 - \omega_n) t + 2\gamma - \pi] + 2c_1 E_n \cos[(2\omega_n - \omega'_1) t - 2\gamma - \frac{\pi}{2}] + c_2 E_n \cos[(3\omega_n - 2\omega'_1) t - 3\gamma - \frac{\pi}{2}], \quad (12)$$

где $a_0, a_1, b_1, b_2, c_0, c_1, c_2, d_1, d_2$ – коэффициенты разложения в ряд Фурье;

ω'_1 – новое значение генерируемой частоты автономного генератора, образовавшееся из-за воздействия внешнего сигнала, то есть произошло своеобразное «подтягивание» частоты генерации ω_Γ к частоте воздействующего сигнала ω_n .

В диссертации проанализировано влияния амплитуды помехи на уровень образовавшихся комбинационных составляющих генератора СВЧ. При учете всех членов соотношения (5) спектр выходных колебаний автогенератора содержит комбинационные составляющие третьего и более высоких порядков $2\omega_n - \omega'_1, 3\omega_n - 2\omega'_1$ и т.п. На рисунке 1 приведены расчетные и экспериментальные зависимости уровней интермодуляционных составляющих.

Анализ выражения (12) показывает, что спектр выходных колебаний генератора содержит как суммарные, так и разностные комбинационные составляющие третьего и более высоких порядков. Об этом свидетельствуют и экспериментальные исследования. Например, при расчете уровень комбинационной составляющей третьего порядка $2\omega_n - \omega'_1$ (при $q = 0,3$) относительно мощности сигнала на выходе генератора составил – 45дБ. Анализ показал что, точность расчетных соотношений при учете амплитуды помехи несколько повышается (примерно на 1,5–2дБ), очевидно, нет необходимости пользоваться уточненными расчетными соотношениями из-за их громоздкости. Для практического использования достаточно применять упрощенные расчетные выражения при условии, что $E_n \ll U_{a0}$, которое всегда обеспечивается в реальной практике.



1 – полезный сигнал $P\omega_r$; 2 – сигнал помехи $P\omega_n$; 3 – комбинационная составляющая третьего порядка на частоте $2\omega_r' - \omega_n$; $\Delta\Delta\Delta$ – результаты эксперимента; сплошными линиями обозначены результаты расчета

Рисунок 1 – Зависимость уровней интермодуляционных составляющих P_i от параметра q

Используя расчетные соотношения, определяющие спектр выходных колебаний автогенератора (АГ), оценим его восприимчивость. В соответствии с рисунком 1 при небольших уровнях воздействующей помехи, например $P\omega_n = -30$ дБ (0,001) уровень составляющей на частоте помехи будет примерно равным уровню комбинационной составляющей третьего порядка на частоте $2\omega_r' - \omega_n$. Поэтому в дальнейшем при оценке восприимчивости АГ за уровень комбинационной составляющей третьего порядка может быть принят уровень сигнала на частоте $2\omega_r' - \omega_n$. Таким образом при $P\omega_n = -30$ дБ получим:

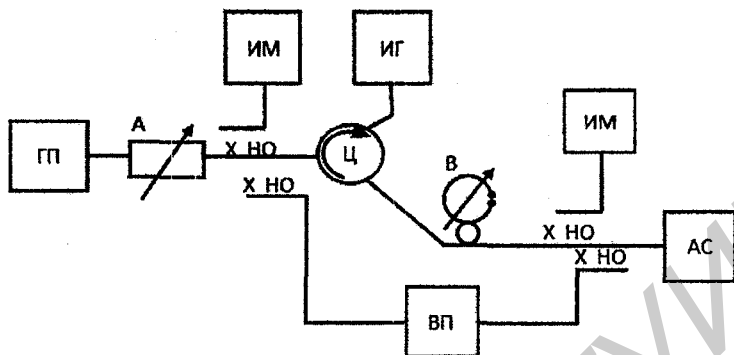
$$\frac{U_{\text{пвых}}}{U_{\alpha, \text{вых}}} = \sqrt{\frac{P\omega_n}{P\omega_r}} = \sqrt{0,001} = 0,0317,$$

где $U_{\text{пвых}}$, $U_{\alpha, \text{вых}}$ – амплитуды сигналов на частоте помех ω_n и генерации ω_r' соответственно.

Так как $\frac{U_{\text{пвых}}}{U_{\alpha, \text{вых}}} = \frac{1 - \sqrt{1 - q^2}}{q}$, отсюда $q = 0,0634$

Так как $P_{\text{АГ}} = \frac{1}{q}$, то $P_{\text{АГ}} \approx 16$. (13)

Экспериментальные исследования проводились на установке, структурная схема которой приведена на рисунке 2.



ГП – генератор СВЧ помеховый; ИМ – измеритель мощности; ИГ – испытываемый генератор СВЧ; ИМ – измеритель мощности; АС – анализатор спектра; А – аттенуатор; ВП – волноводный переключатель; В – волномер; НО – направленные ответвители; Ц – циркулятор

Рисунок 2 – Структурная схема экспериментальной установки для исследования воздействия помехи на АГ

В *третьей главе* проведено исследование восприимчивости синхронизированного генератора СВЧ (СГ) при различных отношениях амплитуд помехи и синхронизирующего сигнала. Наиболее изучаемым является характерный для практики случай является, когда $n = \frac{E_n}{E_c} < 0,3$, для которой проведено сравнение восприимчивости СГ и АГ к воздействию ЭП, где E_c -уровень синхронизирующего сигнала.

Известно, что в установившемся режиме при полном захватывании частоты генератора его фазовое уравнение имеет вид

$$\varphi = \arcsin \frac{\Delta\omega_c}{\alpha_c}, \quad (14)$$

где $\Delta\omega_c = \omega_c - \omega_T$ – частотная расстройка между колебаниями синхронизирующего сигнала ω_c и сигнала генератора ω_T ;

$$\alpha_c = \frac{E_c \omega_c}{2Q_H U_0} \text{ – полосу захватывания частоты АГ .}$$

Если в АГ помимо синхронизирующей ЭДС поступает помеховый сигнал, с частотой ω_n и амплитудой E_n , то внешнее воздействие на АГ можно представить двухчастотным колебанием, структура которого имеет вид

$$e(t) = E_c \cos \omega_c t + E_n \cos \omega_n t = E_{cn} \cos(\omega_c t + \Psi'), \quad (15)$$

$$\text{где } E_{cn} = E_c \sqrt{1 + n^2 + 2n \cos \Omega}, \quad \Omega = \omega_n - \omega_c$$

$$\Psi' = \operatorname{arctg} \frac{n \sin \Omega t}{1 + n \cos \Omega t},$$

$$\omega_{\text{ст}} = \frac{d(\omega_c t + \Psi')}{dt} = \omega_c + \frac{n^2 \Omega + n \Omega \cos \Omega t}{1 + n^2 + 2n \cos \Omega t},$$

Представим фазовый угол СГ Φ как функцию, зависящую от трех величин: генерируемой частоты ω_{Γ} , частоты ω_c и амплитуды E_c синхронизирующего сигнала.

$$\varphi = \arcsin \frac{(\omega_c - \omega_{\Gamma})}{\alpha_c}. \quad (16)$$

Если под влиянием внешних причин (в частности, помехового сигнала), каждая из трех переменных получит колебание приращения $\Delta \omega_{\Gamma}, \Delta \omega_c, \Delta E_c$, то для определения нового значения фазы Φ выражение (16) можно разложить в ряд Тейлора.

Построение нового фазового уравнения генератора при воздействии на него двухчастотного сигнала, один из которых является помеховым, проведем при следующих допущениях:

1) частоты синхронизирующего сигнала ω_c и автогенерации ω_{Γ} в исходном состоянии равны: $\omega_c = \omega_{\Gamma}$;

2) анализ ограничим рассмотрением нескольких первых членов ряда Тейлора.

Введем новое обозначение:

$$a) \quad \varphi = f(\omega_{\Gamma} + \Delta \omega_{\Gamma}, (\omega_c + \Delta \omega_c), (E_{\text{ст}} - E_c)) - f(\omega_{\Gamma}, \omega_c, E_c), \quad (17)$$

$$b) \quad \omega_{\Gamma} - \omega_{\Gamma} = \frac{d\varphi}{dt}, \quad (18)$$

где ω_{Γ} — новое значение генерируемой частоты, образовавшейся в генераторе в результате воздействия на него двухчастотного сигнала,

В связи с малостью $n \ll 1$ и в силу первого допущения, а также введенных новых обозначений, получим новое фазовое уравнение генератора:

$$\varphi + \alpha_c (2 - \sqrt{1 + n^2 + 2n \cos \Omega t}) \cdot \varphi - n \cos \Omega t = 0. \quad (19)$$

В результате решения этого уравнения и соответствующих преобразований выражение для фазы генератора СВЧ при воздействии на него двухчастотного сигнала θ примет вид

$$\varphi = \beta_{\Gamma} \cos(\Omega t - \operatorname{arctg} \frac{\Omega}{\alpha_c}), \quad (20)$$

$$\text{где } \beta_{\Gamma} = \frac{n \Omega}{\sqrt{\alpha_c^2 + \Omega^2}}.$$

С учетом выражения (20) аналитическое соотношение для мгновенного напряжения на выходе генератора находящегося под двухчастотным воздействием можно записать в следующем виде:

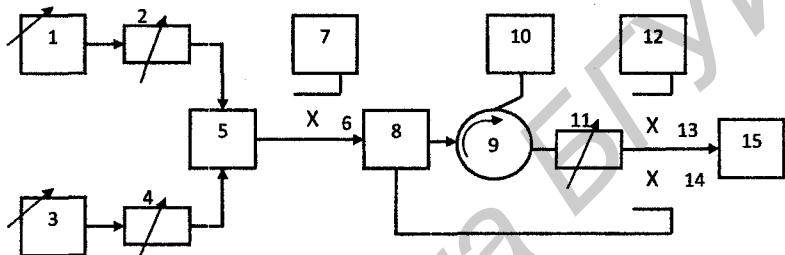
$$u(t) = U_{\alpha} \cos[\omega_c t + \beta_T \cos(\Omega t - \arctg \frac{\Omega}{\alpha_c})]. \quad (21)$$

После тригонометрических преобразований запишем соотношение (21) в виде

$$u(t) = J_0(\beta_T)U_{\alpha} \cos \omega_c t - J_1(\beta_T) \sin[(2\omega_c - \omega_n)t + \arctg \frac{\Omega}{\alpha_c}] + J_1(\beta_T)U_{\alpha} \sin(\omega_n t + \arctg \frac{\Omega}{\alpha_c}), \quad (22)$$

где – коэффициенты $J_0(\beta_T)$, $J_1(\beta_T)$, $J_2(\beta_T)$... $J_n(\beta_T)$ являются функциями Бесселя первого рода разных порядков (1, 2...n) с индексом β_T в качестве аргумента.

Экспериментальные исследования восприимчивости СГ при воздействии на него электромагнитной помехи проводились на установке, структурная схема которой изображена на рисунке 3.



1 – генератор СВЧ; 2,4,11 – аттенюаторы; 3 – генератор СВЧ помеховый; 5 – Н-тройник; 6,13,14 – направленный ответвитель; 7,12 – измеритель мощности; 8 – волноводный переключатель, 9 – циркулятор; 10 – испытываемый генератор; 15 – анализатор спектра

Рисунок 3 – Структурная схема экспериментальной установки для исследования восприимчивости синхронизированного генератора СВЧ

Известно, что относительное значение амплитуды помехи на выходе СГ при $n=1$ определяется следующим соотношением:

$$\frac{U_{\text{пввых}}}{U_{\alpha_0 \text{вых}}} = J_1\left(\frac{\alpha_c}{2\Omega}\right) \quad (23)$$

При малых значениях аргумента $\beta_T = \frac{\alpha_c}{2\Omega} \ll 1$ функция Бесселя первого порядка

$J_1(\beta_T) \approx \frac{\beta_T}{2}$, с учетом данного допущения, запишем равенство:

$$\frac{U_{\text{пввых}}}{U_{\alpha_0 \text{вых}}} = \frac{\alpha_0}{4\Omega} = 0,0317, \quad (24)$$

следовательно, восприимчивость СГ при $n = 1$

$$P_{\text{СГ}} = \frac{\Omega}{\alpha_c} = 7,87 \approx 8. \quad (25)$$

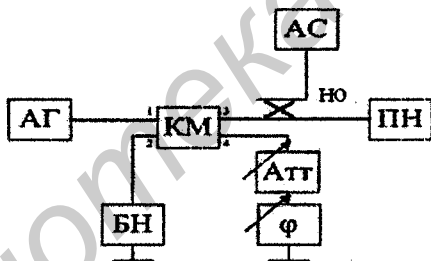
Установлено, что при снижении амплитуды внешнего воздействия то есть при уменьшении p_{ACT} до $n \ll 1$, восприимчивость генератора к помехам также снижается от 8 до 1. Можно найти величину n , при которой восприимчивость генератора $p_{ACT}=1$. В соответствии с (25) получим

$$\frac{n}{2\sqrt{\left(\frac{\alpha_c}{\Omega}\right)^2 + 1}} = 0,032 \text{ при } \frac{\alpha_c}{\Omega} = 1, \text{ откуда } n = 0,064 \cdot 1,41 = 0,087 \approx 0,09.$$

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод, что у разработчика передающих устройств имеется возможность уменьшения восприимчивости выходного каскада путем соответствующего выбора значения n .

Четвертая глава посвящена анализу режима самосинхронизации колебаний в генераторах СВЧ как способа снижения уровней интермодуляционных составляющих. Синтезирована новая схема генератора СВЧ с внешней дополнительной обратной связью, обладающая такими отличительными особенностями от существующих, как меньшие габариты, небольшое число соединений в цепи обратной связи и т.д.

Предлагаемая схема генератора с модернизированной цепью ВДОС приведена на рисунке 4.



АГ – автогенератор; КМ – квадратурный мост; АС – анализатор спектра;
НО – направленный ответвитель; ПН – полезная нагрузка; АтТ – аттенуатор;
φ – фазовращатель; БН – балластная нагрузка

Рисунок 4 – Структурная схема устройства управления частотой автогенератора СВЧ

В отличие от существующих схем генератора СВЧ с ВДОС в цепь внешней дополнительной обратной связи вместо ферритового циркулятора и направленного ответвителя включен квадратурный мост, что существенно упростило конструкцию цепи ВДОС. В основу теоретического исследования работы новой схемы генератора положено предположение об идентичности процессов, происходящих в генераторе СВЧ при введении цепи ВДОС и затягивании частоты генератора при соединении его напрямую с нагрузкой. Об этом факте говорят экспериментальные зависимости частоты генератора от величины фазы и

значения мощности в петле обратной связи, в точности повторяющие кривые затягивания частоты (рисунок 5).

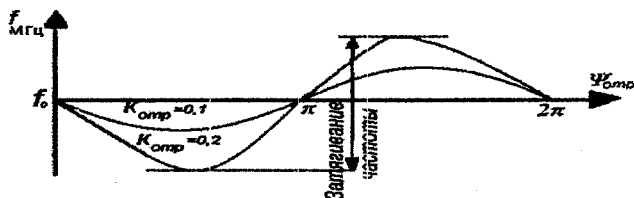


Рисунок 5 – Кривые изменения частоты генератора СВЧ для различных значений модуля коэффициента отражения

Это позволило проводимость петли ВДОС выразить так же, как при анализе влияния нагрузки генератора СВЧ на его частоту – через модуль $K_{отпр}$ и $\Psi_{отпр}$ коэффициента отражения по напряжению на входе волноводной линии, соединяющей генератор с цепью ВДОС. При малых значениях активных и реактивных параметров выходного устройства генераторного прибора, трансформирующего эту проводимость к колебательной системе генератора, проводимость ВДОС будет равна [5–А]

$$Y_{\text{ВДОС}}^* = \frac{Y_{\text{ВХ}}^*}{\alpha_T^2} = \frac{Y_0 (1 - K_{\text{отпр}}^2 + j2K_{\text{отпр}} \sin \Psi_{\text{отпр}})}{\alpha_T^2 (1 + K_{\text{отпр}}^2 + j2K_{\text{отпр}} \cos \Psi_{\text{отпр}})}, \quad (26)$$

где α_T – коэффициент трансформации выходного устройства генератора;

Y_0 – волновая проводимость фидерной линии.

С учетом вышеизложенного получены укороченные уравнения генератора СВЧ с ВДОС [2–А]:

$$\frac{dU_{a1}}{dt} = -\frac{\omega_0}{2Q_H} \left[U_{a1} - U_{a0} - \frac{Q_H}{Q_{\text{ВН}}} U_{a1} \frac{(1 - K_{\text{отпр}}^2)}{(1 + K_{\text{отпр}}^2 + 2K_{\text{отпр}} \cos \psi)} \right], \quad (27)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{\omega_0}{2Q_{\text{Л}}} \left[\frac{\omega_T - \omega_0}{\omega_0} 2Q_H - \text{tg} \theta + 2 \frac{Q_H K_{\text{отпр}} \sin \psi_{\text{отпр}}}{Q_{\text{ВН}} (1 + K_{\text{отпр}}^2 + 2K_{\text{отпр}} \cos \psi)} \right], \quad (28)$$

где $Q_H = \frac{C_p \omega_0}{G_p}$, $Q_{\text{ВН}} = \frac{C_p \omega_0 \alpha_T^2}{Y_0}$.

В установившемся режиме

$$\frac{dU_{a1}}{dt} = \frac{d\varphi}{dt} = 0. \quad (29)$$

Подставляя (29) в уравнение (28), найдем полосу перестройки частоты генератора СВЧ с ВДОС при изменении $\psi_{\text{отр}}$ в петле обратной связи:

$$\Delta f = -\frac{f_0}{Q_{\text{вн}}} \cdot \frac{K_{\text{отр}} \sin \psi_{\text{отр}}}{(1 + K_{\text{отр}}^2 + 2K_{\text{отр}} \cos \psi)} \quad (30)$$

На рисунке 6 изображены экспериментальная 2 и расчетная 1 кривые перестройки частоты генератора. При проведении анализа $K_{\text{отр}} = 0,3$.

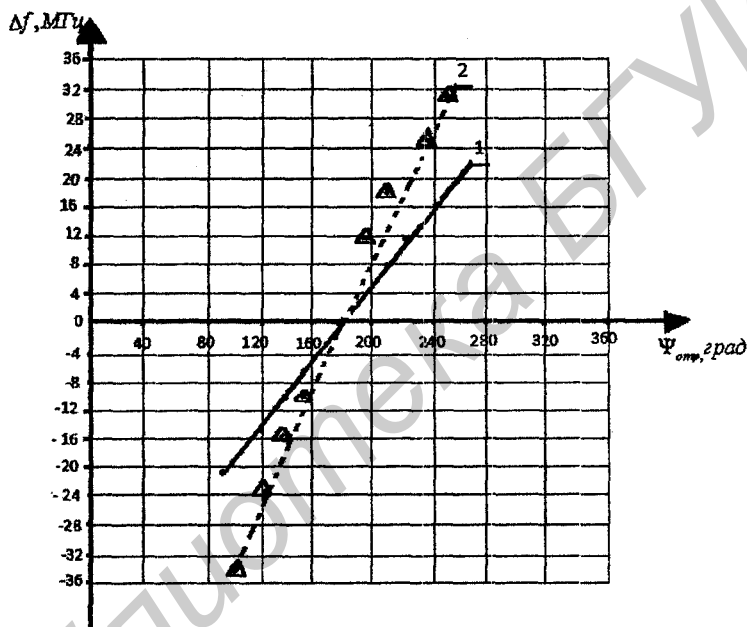
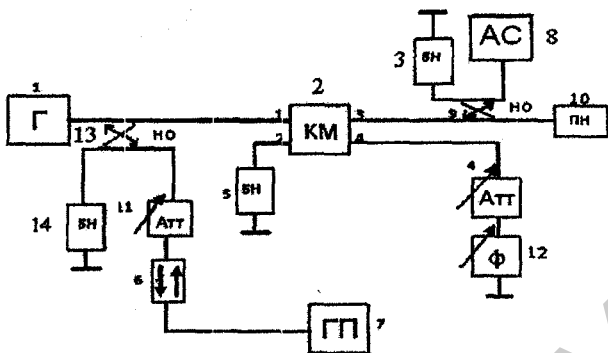


Рисунок 6 – Расчетная 1 и экспериментальная 2 характеристики перестройки частоты генератора СВЧ с ВДОС

Кроме анализа перестроечных характеристик исследованы также стабилизационные свойства генератора СВЧ с ВДОС. В диссертации приведены спектрограммы, снятые с помощью анализатора спектра типа Е4407В. Из этих спектрограмм следует, что внешняя дополнительная обратная связь позволяет изменить частотные флуктуации генератора новой конструкции.

Оценка влияния электромагнитной помехи на генератор СВЧ с ВДОС произведена экспериментально с помощью измерительной установки, структурная схема которой изображена на рисунке 7.



1 – испытываемый генератор СВЧ; 2 – квадратурный мост;
 3,5,14 – балластная нагрузка; 12 – фазовращатель; 6 – ферритовый
 вентиль; 7 – генератор СВЧ помехового сигнала; 8 – анализатор спектра; 9,13 – направленный
 ответвитель; 10 – полезная нагрузка; 11,4 – аттенюатор волноводный

**Рисунок 7 – Структурная схема измерительной установки
 для измерения восприимчивости генератора СВЧ с ВДОС**

Полученные результаты показывают, что применение режима самосинхронизации ($K_{отр} = 0,3$) уменьшает частотные флуктуации более чем на 12 дБ и снижает восприимчивость генератора СВЧ по сравнению с автономным режимом до 50 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Основным результатом диссертационной работы является теоретическое и экспериментальное исследование восприимчивости автономного, синхронизированного и самосинхронизированного генераторов СВЧ к внешнему воздействию. Разработан критерий оценки реакции генератора на воздействие внешней электромагнитной помехи в виде параметра восприимчивости [1–А, 6–А, 10–А]. Теоретически и экспериментально определено, что восприимчивость вышеназванных трех типов генераторов соответственно составляет: $p_{AG} = 16$, $p_{САГ} = 8$, $p_{ССАГ} = 9$ при условии, что уровень наибольшей интермодуляционной составляющей не превышает минус 30 дБ. Из сопоставления этих цифр видно, что автономный генератор СВЧ наиболее восприимчив к воздействию внешней электромагнитной помехи [4–А, 11–А, 12–А].

2. Разработан уточненный метод расчета спектра побочных выходных колебаний интермодуляционного типа, учитывающий амплитуды колебаний, расположенных на частотной оси со стороны помехового воздействия, а также

10–А. Ашамис, А.О. Экспериментальный анализ влияния самосинхронизации на восприимчивость генератора СВЧ при воздействии на него помехи / А.О. Ашамис, А.М. Бригидин // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы XX Междунар. конф., Севастополь, 13–17 сент. 2010 г. / МГИ НАН Украины. – Севастополь, 2010. – С. 950–951.

11–А. Ашамис, А.О. Синтез частот на основе автогенератора СВЧ с внешней дополнительной обратной связью / А.О. Ашамис, А.М. Бригидин // Современные средства связи: XV Междунар. науч.-техн. конф., Минск, Беларусь, 28–30 сент. 2010 г. / БГУИР. – Минск, 2010. – С. 47.

12–А. Ashames, A.O. Influences of synchronization on the susceptibility of oscillators of the microwave to external effects / A.O. Ashames // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2011: материалы VII Междунар. молодежной науч.-техн. конф., Севастополь, Украина 11–15 апр. 2011 г. / МГИ НАН Украины. – Севастополь, 2011. – С. 392.

13–А. Ашамис, А.О. Улучшение электромагнитной совместимости за счет демодуляции сигналов с FSK с использованием спектральных оценок / А.О. Ашамис, В.Т. Першин // Современные средства связи: тез. докл. XVI Междунар. науч.-техн. конф., Минск, Беларусь, 27–29 сентября 2011г. / БГУИР. – Минск, 2011. – С. 56.

РЭЗІЮМЭ

Ашаміс Абдэльхакім Аман

Успрымальнасць генератараў ЗВЧ-дыяпазона да ўздзеяння знешняй электрамагнітнай перашкоды

Ключавыя словы: электрамагнітная сумяшчальнасць, радыёперадавальная прыстасаванне, генератар ЗВЧ, самасінхранізацыя, знешняя дадатковая зваротная сувязь, інтэрмадуляцыйнае выпраменьванне, ваганне, успрымальнасць, перашкод.

Мэта працы: Мэтай дысертацыйнай працы з'яўляецца аналіз уздзеяння знешніх электрамагнітных перашкод на генератар ЗВЧ і распрацоўка мер па зніжэнню ўспрымальнасці генератара да такога уздзеяння.

Метады даследавання: элементы тэорыі электрамагнітнай сумяшчальнасці, тэорыя сінхранізацыі, рады Фур'е і Тэйлора, дыферэнцыяльныя ўраўненні, дыферэнцыяльнае і інтэгральнае злічэнне, эксперыментальны аналіз.

Атрыманныя вынікі і іх навізна: Абгрунтаванне крытэрыя ацэнкі рэакцыі генератара ЗВЧ на ўздзеянне знешняга электрамагнітнай перашкоды ў выглядзе параметру успрымальнасці, заснаванае на адначасовым уліку параметраў генератара і перашкоды, частотнага разнесу паміж карысным і перашкодамі сігналамі, што дазволіла выкарыстоўваць дадзены крытэрыі для якаснай і колькаснай ацэнкі працаздольнасці генератарных прылад ва ўмовах знешніх уздзеянняў. Тэарэтычнае і эксперыментальнае абгрунтаванне мадыфіцыраванага метаду разліку пабочных выхадных ваганняў інтэрмадуляцыйнага тыпу ЗВЧ генератараў, заснаванага на дадатковым уліку складнікаў выхаднага спектру, размешчаных з боку перашкоды, што дало магчымасць больш дакладна вызначыць спектр генераваных пабочных ваганняў для павышэння эфектыўнасці размеркавання і выкарыстання радыёчастотнага рэсурсу. Сінтэз схемы генератара ЗВЧ з знешняй дадатковай зваротнай сувяззю (ЗДЗС), адрознай заменай ферытавых цыркулятара і накіраванага адгаворнага квадратурнага моста, што дазволіла знізіць агульныя выдаткі на стварэнне ланцуга ЗДЗС пры захаванні асноўных рабочых характарыстык генератара.

Ступень выкарыстання: сінхранізаваныя генератары ЗВЧ дыяпазона выкарыстоўваліся пры правядзенні эксперыментальных даследаванняў умоў безперашкоднай працы радыёэлектронных сродкаў радыёлакацыйнай і сухапутнай службаў 4-га пакалення у г. Гродна і ўкаранёныя ў навучальны працэс у Беларускай дзяржаўнай універсітэце інфарматыкі і радыёэлектронікі.

Вобласць ужывання: сістэмы абароны радыёперавальных прыстасаванняў ад уздзеяння знешніх электрамагнітных перашкод.

РЕЗЮМЕ

Ашамис Абдельхаким Омран

Восприимчивость генераторов СВЧ-диапазона к воздействию внешней электромагнитной помехи

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, радиопередающее устройство, спектр, генератор СВЧ, самосинхронизация, внешняя дополнительная обратная связь, интермодуляционное излучение, колебание, восприимчивость, частичное увеличение частоты, помеха.

Цель работы: целью диссертационной работы является анализ воздействия внешних электромагнитных помех на генератор СВЧ и разработка мер по снижению восприимчивости генератора к такому воздействию.

Методы исследования: элементы теории электромагнитной совместимости, теория синхронизации, ряды Фурье и Тейлора, дифференциальные уравнения, дифференциальное и интегральное исчисление, экспериментальный анализ.

Полученные результаты и их новизна: обоснование критерия оценки реакции генератора СВЧ на воздействие внешней электромагнитной помехи в виде параметра восприимчивости, основанное на одновременном учете параметров генератора и помехи, частотного разнеса между полезным и помеховым сигналами, что позволило использовать данный критерий для качественной и количественной оценки работоспособности генераторных устройств в условиях внешних воздействий. Теоретическое и экспериментальное обоснование модифицированного метода расчета побочных выходных колебаний интермодуляционного типа СВЧ генераторов, основанного на дополнительном учете составляющих выходного спектра, расположенных со стороны помехи, что позволило более точно определить спектр генерируемых побочных колебаний для повышения эффективности распределения и использования радиочастотного ресурса. Синтез схемы генератора СВЧ с внешней дополнительной обратной связью, отличающейся заменой ферритового циркулятора и направленного ответвителя квадратурным мостом, что позволило снизить общие затраты на создание цепи ВДЭС при сохранении основных рабочих характеристик генератора.

Степень использования: синхронизированные генераторы СВЧ диапазона использовались при проведении экспериментальных исследований условий беспомеховой работы радиоэлектронных средств радиолокационной службы и сухопутной службы 4-го поколения в г. Гродно и внедрены в учебный процесс в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники.

Область применения: системы защиты радиопередающих устройств от воздействия внешних электромагнитных помех.

SUMMARY

Ashames Abdelhakim Omran

Susceptibility of generators of the microwave of a range to influence of an external electromagnetic barrier

Keywords: Electromagnetic compatibility, Radio passing arrangement, Spectrum, The generator of the microwave, Self-synchronization, External additional feedback, intermediation radiation, Fluctuation, Susceptibility, Partial increase of frequency, Barrier.

Objective: The aim of the thesis is to analyze the effects of electromagnetic interference on the microwave generator and the development of measures to reduce the susceptibility of the generator in such an impact.

Research Methods: Elements of the theory of electromagnetic compatibility, the theory of synchronization, numbers Fure and Taylor, the differential equations, differential and integral calculus, the experimental analysis.

Obtained results and their novelty: Justification criterion of reaction microwave generator to an external electromagnetic interference as a parameter sensitivity, based on the simultaneous consideration of the generator parameters and noise frequency separation between the useful and interfering signals, which allowed the use of this criterion for the evaluation and assessment of efficiency of generator devices in the external influences. Theoretical and experimental study of a modified method for the calculation of side output oscillations intermodulation type of microwave generator, based on additional allowance components of the output spectrum, located by the noise, thus more accurately determine the spectrum of vibrations generated by side to improve the distribution and use of the radio resource. Synthesis microwave oscillator circuit with external additional feedback other than replacing the ferrite circulator and directional coupler quadrature bridge, thus reducing the overall cost of building the chain WED while maintaining the basic performance of the generator.

Extent of Usage: The synchronized generators of the microwave of a range were used at carrying out of experimental researches of conditions whit out noise works of radio-electronic means of radar-tracking service and overland service of 4th generation in a of Grodno and introduced in educational process at the Belarus state university of computer science and radio electronics.

Application filed: Systems of protection of radio passing arrangements from influence of external electromagnetic barriers.

Ашамис Абдэльхакам Омран

**ВОСПРИИМЧИВОСТЬ ГЕНЕРАТОРОВ СВЧ-ДИАПАЗОНА
К ВОЗДЕЙСТВИЮ ВНЕШНЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОМЕХИ**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 19.12.2012.	Формат 60x84 ¹ / ₁₆ .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.	Заказ 665.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровки, 6