

Особенности построения резистивных смесителей диапазона крайне высоких частот

Белкин М. Е., Белкин Л. М.

Рассматриваются общие принципы построения резистивных смесителей КВЧ диапазона в монолитном исполнении на основе гетероструктурных полевых транзисторов. Анализируются особенности наиболее перспективной схемы смесителя с субгармонической накачкой, в которой для смешения входного и гетеродинного сигналов используется частота в чётное число раз выше частоты сигнала внешнего гетеродина. В результате прямого сравнения на базе компьютерного проектирования диодного и транзисторного вариантов построения получивших наибольшее развитие в последние годы смесителей на двукратной частоте гетеродина подтверждены данные публикаций относительно их потерь преобразования и получены новые данные о сравнительно лучшей линейности и уровнях развязок входов и выхода транзисторного варианта. Даны рекомендации по оптимальному применению исследованных вариантов.

Современное развитие монолитных интегральных схем (МИС) радиоприёмных устройств характеризуется освоением диапазона крайне высоких частот (КВЧ, 30-300 ГГц), хотя пока деятельность разработчиков аппаратуры в основном сосредоточена в его нижней части, в районе 30-60 ГГц. Ключевым узлом этих устройств (как и любого супергетеродинного радиоприёмника), во многом определяющим его общие технико-экономические показатели, является рассматриваемый в данной статье смеситель. Цель работы состоит в выборе оптимальной схемы его построения с учётом монолитного исполнения и рабочих частот в КВЧ диапазоне.

Общие принципы построения смесителей КВЧ диапазона

Несмотря на то, что в настоящее время общая теория смесителей достаточно хорошо разработана и на её базе реализовано большое число разнообразных схем, отмеченные выше тенденции к повышению рабочей частоты, а также интенсивное развитие СВЧ элементной базы на основе арсенид-галлиевых гетероструктурных полевых транзисторов (ГПТ) привели к ужесточению основных требований и, как следствие, модернизации уже существующих и появлению новых вариантов схем. Среди них одним из наиболее перспективных вариантов для построения МИС КВЧ диапазона считается так называемый резистивный смеситель с субгармонической накачкой (sub-harmonic pumping, СГН), в котором для смешения входного и гетеродинного сигналов используется частота в чётное число раз выше частоты сигнала внешнего гетеродина. Данная частота в отличие от традиционных СВЧ смесителей на гармониках формируется за счёт соответственного увеличения числа параллельно включённых активных элементов, которые управляются соответствующим образом сдвинутыми по фазе гетеродинными сигналами.

Общие достоинства резистивных смесителей на основе ГПТ, как известно [1], состоят в лучшей линейности по сравнению со смесителями на основе диодов с барьером Шоттки, практически нулевой токе потребления, в отсутствии дробовых шумов (то есть коэффициент шума смесителя равен его потерям преобразования), увеличении развязки входов и выходов по сравнению с активным вариантом. Кроме

того, применение резистивного смесителя КВЧ диапазона на основе СГН позволяет использовать гетеродин с лучшими технико-экономическими показателями (большей мощностью, меньшими шумами), а также обеспечить более высокие показатели по развязке гетеродинного и сигнального входов и гетеродинных входов и выходов промежуточной частоты (ПЧ).

Основные схемотехнические особенности резистивного смесителя на ГПТ по сравнению с другими вариантами построения заключаются в отсутствии постоянного напряжения смещения на стоке, внешнем управлении сопротивлением канала с помощью смещения затвора, использовании схемы с общим истоком при включении гетеродинного входа в цепь затвора, а входа высокой частоты (ВЧ) и выхода ПЧ – в цепь стока. Благодаря этому активный элемент действует как нелинейный резистор, сопротивление которого в выключенном состоянии транзистора достигает единиц МОм·мм, а во включенном – единиц Ом·мм.

Для увеличения уровней развязки и ослабления по «зеркальному каналу» так же, как и в диодных смесителях, используются балансные схемы [1]. Одним из её вариантов можно считать широко исследуемый в последние годы для рабочих частот КВЧ диапазона резистивный смеситель с СГН, который в подавляющем большинстве работ реализуется на двукратной частоте гетеродина (ДЧГ), что обеспечивает минимальный уровень усложнения схемы. Его преимущество по сравнению с накачкой на основной частоте состоит в подавлении чётных гармоник гетеродина и входного сигнала, основной недостаток – в увеличении (на 2-3 дБ) потерь преобразования. Схема такого смесителя может быть реализована на основе как транзисторных, так и диодных активных элементов. В основе принципа работы транзисторного варианта лежит противофазная подача сигнала гетеродина, например, вдвое меньшей частоты на затворы пары транзисторов с общим истоком. Стоки транзисторов соединены параллельно и к этой общей цепи через соответствующие фильтры подсоединяются вход ВЧ и выход ПЧ. Схема реализации резистивного смесителя с ДЧГ на основе ГПТ в диодном включении более простая, что предопределило её более широкое распространение. Её основным элементом является антипараллельная диодная пара, которая может быть включена параллельно либо последовательно с источниками сигналов и нагрузкой.

Сравнение диодной и транзисторной схем построения МИС смесителей КВЧ диапазона

Как известно, наиболее важными параметрами смесителя являются потери преобразования и линейность. Последний параметр обычно определяется как уровень входной мощности, при котором потери преобразования увеличиваются на 1 дБ, либо как относительный уровень интермодуляционных искажений третьего и пятого порядков. Прежде всего, с целью количественного определения достигнутых параметров МИС резистивных смесителей с ДЧГ КВЧ диапазона был проведён поиск по публикациям в зарубежной научной периодике и материалах конференций по СВЧ тематике. Чтобы иметь возможность сопоставления только современных достижений, глубина поиска была ограничена 10 годами. Анализ зарубежных работ по резистивным смесителям с ДЧГ на основе технологии гетероструктурных полевых транзисторов показал, что в КВЧ диапазоне исследования преимущественно проводятся для смесителей с двумя вариантами включения активных элементов: транзисторное с общим истоком и диодное с объединением истока и стока. Наиболее типичные результаты его отдельно для диодной и транзисторной схем реализации представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры МИС смесителей КВЧ диапазона с накачкой на двукратной частоте гетеродина

№ п/п	Диапазон сигнала, ГГц	Диапазон ПЧ, ГГц	Потери преобразования, дБ	Мощность гетеродина, дБм	Габариты МИС, мм	Источник
На основе ГПТ в диодном включении (закорочены исток и сток)						
1	17,5...33	2,5-4	10-12	10	1,3x1,1	[2]
2	78-114	0,5-10	10-14	10	1,5x2,0	[3]
3	23-37	1,0	9,5-14	13	0,9x0,9	[4]
На основе ГПТ в транзисторном включении (с общим истоком)						
4	34-40	1-5	9,5-13	5	1,1x2,1	[5]
5	26,5-29,5	1,7-2,45	11-14	13	1,0x2,0	[6]
6	75-88	2,5	14-18	5	1,5-1,0	[7]

Из приведённых в таблице данных можно сделать следующие выводы:

- типичные потери преобразования в КВЧ диапазоне как в диодном, так и в транзисторном включении составляют 9,5-14 дБ. При этом отсутствует возможность их сравнения. Из-за влияния разбаланса плеч пассивных мостовых схем в транзисторном смесителе потери могут увеличиться до 18 дБ (п. 6 табл. 1);

- требуемая для обеспечения этих потерь типичная мощность гетеродина изменяется в широких пределах от 5 до 13 дБм.

Из проведённого анализа можно сделать следующие общие выводы:

- потери преобразования в диодном и транзисторном включениях нелинейного элемента имеют примерно одинаковое значение;

- данные по потерям преобразования получены при значительном разбросе мощностей гетеродина, что не даёт возможности корректного сопоставления;

- среди публикаций отсутствуют исследования по прямому сравнению вариантов построения схемы МИС смесителей КВЧ диапазона с накачкой на двукратной частоте гетеродина, а также данные, характеризующие уровень их линейности.

Следовательно, для корректного сравнения двух анализируемых вариантов схемы смесителя по вышеуказанным основным параметрам необходимы дополнительные исследования с использованием одних и тех же транзисторов и идентичных уровней мощности и частот гетеродина и сигнала.

Автоматизированное проектирование МИС смесителей с ДЧГ КВЧ диапазона

Ниже приведены результаты проектирования МИС резистивного смесителя с ДЧГ 8 мм диапазона, в котором в качестве нелинейного элемента использован разработанный в ИСВЧПЭ РАН GaAs гетероструктурный полевой транзистор с двумя затворами длиной порядка 0,1 мкм и шириной 75 мкм (частота отсечки порядка 60 ГГц). Проектирование осуществлялось с помощью электронной САПР AWR Microwave Office в режиме большого сигнала методом гармонического баланса.

В ходе проектирования прежде всего была выбрана нелинейная модель транзистора. Наши оценки показали, что среди множества стандартных моделей полевых транзисторов в библиотеке элементов Microwave Office оптимальной для данного случая является так

называемая модель Иланда (Yhland), которая благодаря симметричной структуре специально рекомендована для проектирования СВЧ резистивных смесителей [8]. Для проведения расчётов были выбраны полоса несущих частот смесителя $34,8 \pm 0,5$ ГГц, частота гетеродина $16,65$ ГГц, полоса промежуточных частот $1,5 \pm 0,5$ ГГц. Мощность гетеродина была выбрана по результатам его проектирования [9] на уровне $11,5$ дБм. Определение (экстракция) параметров эквивалентной схемы транзистора осуществлялось стандартным методом [8] в режиме большого сигнала с учётом режима работы смесителя путём согласования данных расчёта и измерения вольт-амперных и вольт-фарадной характеристик при различных смещениях на затворе и стоке и малосигнальных S-параметров в рабочем частотном диапазоне. Верификация модели, проведённая на постоянном токе и в СВЧ диапазоне, показала отклонение расчётных и измеренных характеристик в пределах 5% . Более подробно результаты разработки специализированной модели ГПТ для резистивного смесителя описаны в [10].

Разработанные принципиальные схемы резистивного смесителя с ДЧГ, выполненного на GaAs подложке толщиной 100 мкм, с согласованием импедансов при помощи микрополосковых линий представлены на рис. 1 (ГПТ в диодном включении) и рис. 2 (ГПТ в транзисторном включении).

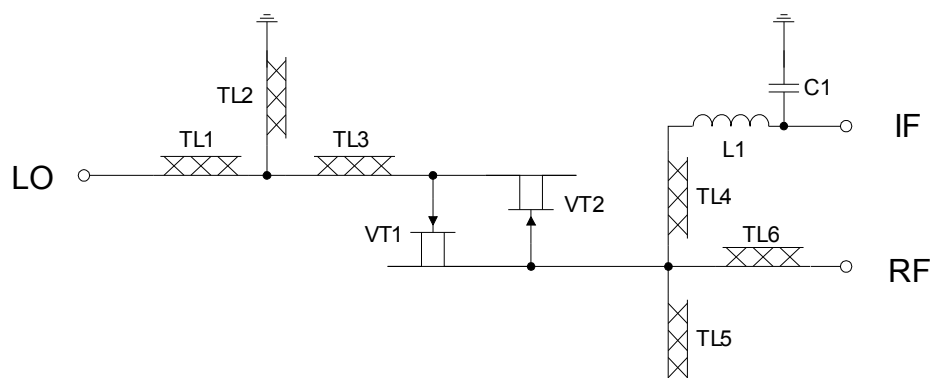


Рис. 1

Принципиальная схема резистивного смесителя диапазона КВЧ с накачкой на двукратной частоте гетеродина на основе ГПТ в диодном включении

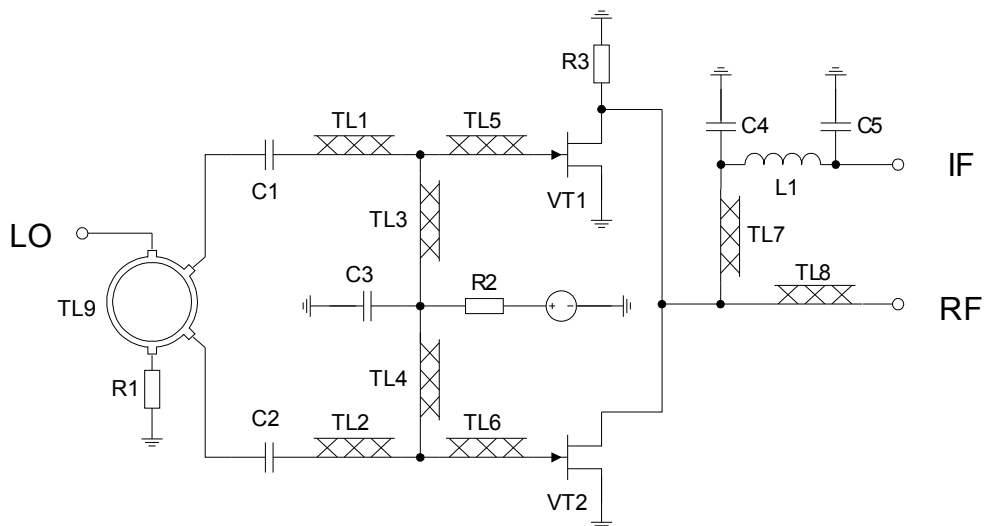


Рис. 2

Принципиальная схема резистивного смесителя диапазона КВЧ с накачкой на двукратной частоте гетеродина на основе ГПТ в транзисторном включении (минимальные потери преобразования при напряжении смещения затворе $-0,36$ В)

Результаты расчёта характеристики эффективности преобразования (обратная потерям преобразования) в нелинейной схеме (гармонический баланс) смесителей в транзисторном и диодном включениях при мощности гетеродина 11,5 дБм и мощности сигнала -30 дБм представлены на рис. 3.

Как следует из рисунка, величина эффективности преобразования в транзисторной схеме получилась на уровне -11,5 дБ, а в диодной – -15...-16 дБ, что согласуется с вышеприведёнными оценками (см. табл. 1). Можно также отметить, что в транзисторной схеме легче обеспечивается согласование в более широкой полосе, чем в диодной.

Результаты моделирования амплитудной характеристики эффективности преобразования на средней частоте диапазона частот сигнала представлены на рис. 4.

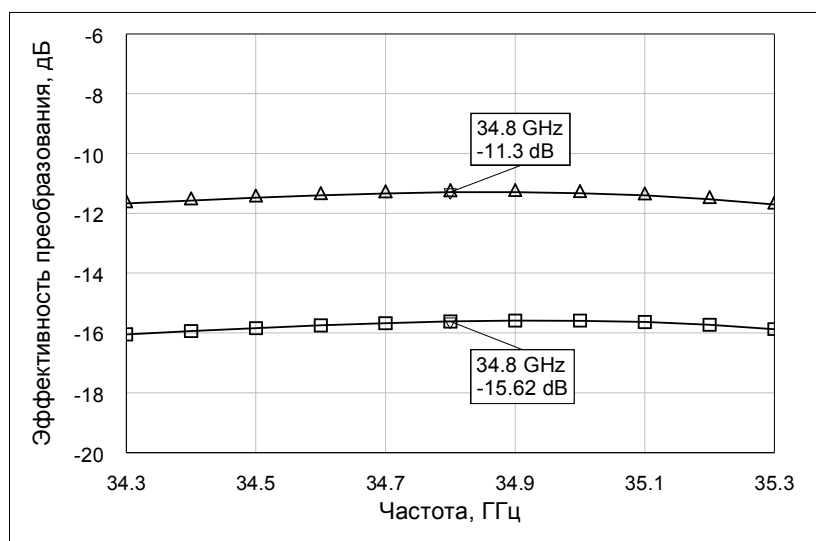


Рис. 3
Результаты моделирования характеристики эффективности преобразования смесителя (квадраты - диодная схема; треугольники - транзисторная схема)

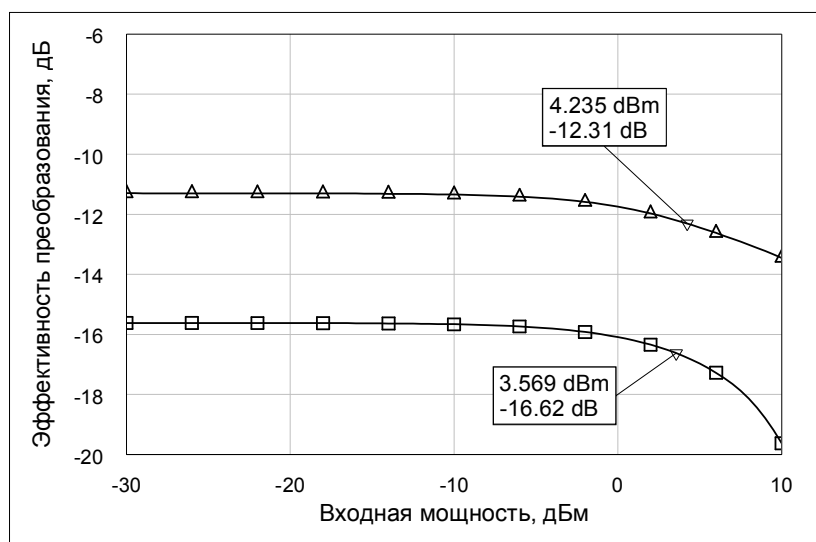


Рис. 4
Амплитудная характеристика эффективности преобразования (квадраты - диодная схема; треугольники - транзисторная схема)

Как следует из рисунка, спроектированный диодный смеситель обладает несколько худшей линейностью по сравнению с транзисторным вариантом, однако у обоих она достаточно высокая.

Полученная разность нелинейности амплитудной характеристики диодного резистивного смесителя с ДЧГ по сравнению с транзисторным вариантом подтверждается рис. 5 и рис. 6. На рисунках представлены результаты моделирования характеристики

интермодуляционных искажений третьего и пятого порядков при подаче на вход двух сигналов одинаковой мощности -5 дБм с частотами 34,8 и 34,9 ГГц, которые с двукратной частотой гетеродина 33,3 ГГц формируют сигналы промежуточной частоты соответственно 1,5 и 1,6 ГГц. Как следует из рисунков, минимальное отношение сигнала к уровню интермодуляционных искажений третьего порядка получилось около 35 дБ для диодного смесителя и около 40 дБ для транзисторного смесителя. Кроме того, минимальное отношение сигнала к уровню интермодуляционных искажений пятого порядка составляет около 59 дБ для диодного смесителя и около 60 дБ для транзисторного смесителя.

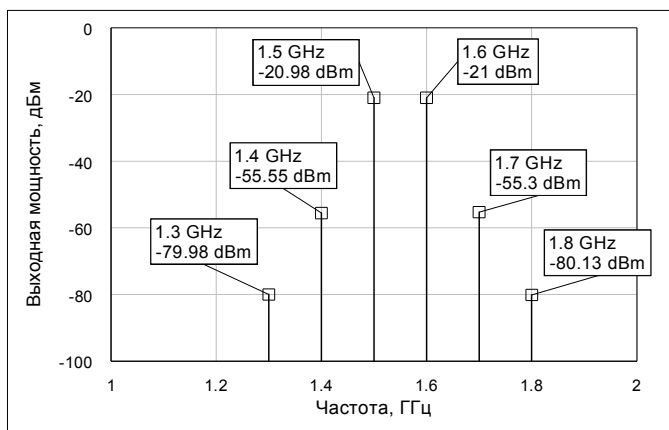


Рис. 5

Интермодуляционная характеристика на выходе диодного смесителя

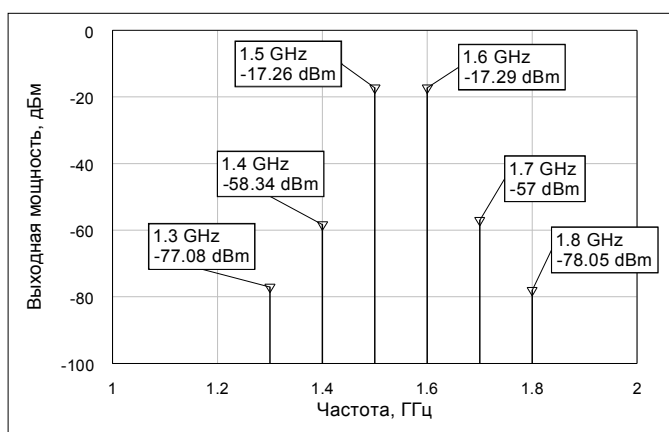


Рис. 6

Интермодуляционная характеристика на выходе транзисторного смесителя

Остальные параметры спроектированных смесителей приводятся в таблице 2.

Таблица 2

Основные параметры спроектированных смесителей

Вариант построения	Потери, дБ	$P_{\text{вх.лин}}$, дБм	КСВН по входам и выходу	Развязка, дБ					Габариты кристалла, мм
				$L_{Г-с}$	$L_{2Г-с}$	$L_{Г-ПЧ}$	$L_{2Г-ПЧ}$	$L_{с-ПЧ}$	
Транзисторный	11,3	4,2	≤ 2	50	25	>50	>50	50	1,6x2,3x0,1
Диодный	15,6	3,6	$\leq 2,5$	3	>50	38	>50	>50	1,2x2,3x0,1

Обозначения: $P_{\text{вх.лин}}$ – входная мощность, при которой потери увеличиваются на 1 дБ; $L_{Г-с}$ – ослабление гетеродинного сигнала на входе ВЧ; $L_{2Г-с}$ – ослабление двукратной частоты гетеродина на входе ВЧ; $L_{Г-ПЧ}$ – ослабление гетеродинного сигнала на выходе ПЧ; $L_{2Г-ПЧ}$ – ослабление двукратной частоты гетеродина на выходе ПЧ; $L_{с-ПЧ}$ – ослабление ВЧ сигнала на выходе ПЧ.

Заключение

В результате прямого сравнения на базе компьютерного проектирования диодного и транзисторного вариантов построения МИС резистивных смесителей диапазона КВЧ с использованием одних и тех же транзисторов при идентичных уровнях мощности, частотах гетеродина и сигнала и модельных экспериментов по исследованию их основных параметров:

- получено соответствие данным публикаций о величине уровней потерь преобразования в смесителях аналогичного типа;

- получены новые данные о сравнительно меньших потерях преобразования, лучшей линейности и уровнях развязок входов и выхода транзисторного варианта, что объясняется возможностью оптимизации этих и других параметров смесителя за счёт регулировки напряжений смещения затворов транзисторов.

Таким образом, при выборе оптимальной схемы построения смесителя КВЧ диапазона в монолитном или гибридном исполнении на основе гетероструктурных полевых транзисторов с затвором Шоттки рекомендуется учитывать следующие соображения: диодный вариант следует применять в случаях, когда основными критериями являются простота схемы построения и габаритные размеры кристалла, а транзисторный – когда необходимо обеспечить оптимальные параметры, такие как потери преобразования, линейность, КСВН, развязки по входам и выходу смесителя.

Авторы выражают благодарность Ю. В. Фёдорову за предоставление экспериментальных данных по использованному транзистору и полезные обсуждения.

Литература

1. Maas S.A. Nonlinear Microwave and RF Circuits. – Artech House, 2003. – 582 pp.
2. Deng K.L., et.al. Broad-band monolithic GaAs-based HEMT diode mixers. Asia-Pacific Microwave Conference, 2000, p. 1135–1138.
3. Hwang Y.-J., et.al. A 78-114 GHz monolithic subharmonically pumped GaAs-based HEMT diode mixer. - IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2002, v. 12, No 6, p. 209-211.
4. Lin C.-H., et.al. A 23-37 GHz miniature MMIC subharmonic mixer. - IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2007, v. 17, No 9, p. 679-681.
5. Ang K.S., et.al. A millimeter-wave monolithic sub-harmonically pumped resistive mixer. Asia Pacific Microwave Conference Proceedings. 1999, v. 2, p. 222-225.
6. Yeh P.-C., Liu W.-C., Chiou H.-K. Compact 28-GHz subharmonically pumped resistive mixer MMIC using a lumped-element high-pass/band-pass balun. - IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2005, v. 15, No 2, p. 62-64.
7. Lei M. F., Wu P. S., Huang T.W., and Wang H. Design and analysis of a miniature W-Band MMIC subharmonically pumped resistive mixer. - IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digests, Jun. 2004, p. 235–238.
8. Yhland K., et. al. A symmetrical nonlinear HFET/MESFET model suitable for intermodulation analysis of amplifiers and resistive mixers. - IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2000, v. 48, No 1, p. 15-22.
9. Белкин М. Е., Лопарев А. В. Компьютерное проектирование монолитной интегральной схемы сверхвысокочастотного генератора на гетероструктурных полевых транзисторах. - Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы, вып.1(224), 2010, с. 45-52.
10. Belkin M. E., Belkin L. M. Singularities of GaAs Microwave High Electron Mobility Transistor (HEMT) Modeling in Passive Regime. Fifth International Conference ICFM-2009 Digests, Crimea, Partenit, Oct. 5-10, 2009, p. 463.