

GaAs МИС малошумящего усилителя X-диапазона

Е. Кудабай, А. Салих, В.А. Мосейчук, Д.С. Брагин

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Россия, 634045 г. Томск, ул. Ленина, 40, salikhayatulla327@gmail.com

Аннотация — При разработке активных фазированных антенных решеток (АФАР) немалое значение имеет выбор малошумящего усилителя (МШУ). Цель данной работы заключалась в проектировании монолитно-интегральной схемы (МИС) МШУ X-диапазона (7-13 ГГц) на основе технологии арсенид галлиевого (GaAs) транзистора с повышенной подвижностью электронов (рНЕМТ) для использования в АФАР. При разработке МИС МШУ использовалась библиотека элементов на базе технологического маршрута GaAs рНЕМТ 0,15 мкм с применением САПР AWR Microwave Office. Разработанный усилитель основан на транзисторах с общим истоком с последовательной отрицательной обратной связью (ООС) в виде высокоомного отрезка линии передач, а также с параллельной ООС для согласования коэффициента шума и коэффициента усиления по мощности (КПМ) в соответствии с методикой совмещенного согласования. В результате выполнения работы удалось спроектировать МИС МШУ с коэффициентом усиления не менее 20 дБ. Коэффициент шума усилителя составил 1,5 дБ, коэффициент отражения от входа и выхода составил не более -15 дБ. Итоговые габариты топологии МИС составили 2,55x1,55 мм².

Ключевые слова — арсенид галлия (GaAs), НЕМТ, МШУ, X-диапазон, СВЧ МИС, коэффициент шума, метод совмещенного согласования.

I. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день монолитные интегральные схемы (МИС) получили широкое распространение. Поводом развития МИС является активное продвижение высокоскоростных широкополосных систем передачи данных, активных фазированных антенных решеток, датчиков, работающих на сверхвысоких частотах, сотовой и спутниковой телефонии и т. д. Это вызвало потребность в разработке электронно-компонентной базы высокого качества.

Малошумящие усилители в свою очередь - это один из наиболее важных компонентов приемного тракта, который обеспечивает усиление слабых сигналов без значительного ухудшения соотношения сигнал/шум. Актуальность работы подтверждается проектами по изучению и созданию высокотехнологичной активной фазированной антенной решетки (далее АФАР) на основе современных технологий. АФАР привлекают своим большим запасом надежности: если один приемопередатчик не работоспособен, то это не приводит к поломке всей системы.

Неотъемлемой частью разработки любого МШУ является выбор транзистора. Транзистор с высокой подвижностью электронов (далее НЕМТ) являются наиболее подходящими для СВЧ устройств. В том числе, МШУ. НЕМТ транзисторы – это полевое устройство, с вертикальной архитектурой, которое включает слои из различных материалов, выбранных для формирования канала устройства, в котором электроны физически отделены от своих доноров. Это означает, что используемые полупроводники имеют разную запрещенную зону. Это приводит к большой подвижности электронов, так как их рассеяние на ионизированных примесях уменьшается. Кроме того, большая концентрация электронов формируется в четко определенной плоскости, близкой к поверхности структуры материала. В НЕМТ транзисторах ток течет от истока к стоку под контактом затвора через канал с высокой подвижностью. Это приводит к улучшенным характеристикам высокочастотного шума и усиления по сравнению с обычными полевыми транзисторами [1, 2, 3].

В идеальных условиях два разных материала, используемых для гетероперехода, должны иметь одинаковую постоянную решетки (расстояние между атомами). Однако, на практике постоянные решетки обычно немного отличаются (например, AlGaAs на GaAs), что приводит к дефектам кристалла. В полупроводниках такие дефекты образуют ловушки глубокого уровня, что значительно снижает производительность устройства [4].

Категория транзисторов НЕМТ, где это правило нарушается, называется рНЕМТ или псевдоморфным НЕМТ. Это достигается за счет использования чрезвычайно тонкого слоя одного из материалов. Благодаря такому подходу достигается растяжение кристаллической решетки таким образом, чтобы она соответствовала другому материалу. Этот метод позволяет создавать транзисторы с большей разницей в ширине запрещенной зоны, обеспечивая им лучшую производительность [4].

В настоящее время в ряде стран (таких, как США, Япония и Европейские страны) разработаны и внедрены в промышленное производство гетероструктурные технологии изготовления СВЧ МИС. Производится широкий список разных СВЧ МИС, в том числе, МШУ. Подобные технологии постепенно развиваются и в России. Одной из организаций, работающих в данном направлении в

России, является Национальный исследовательский ядерный университет (НИЯУ) МИФИ. Институт СВЧ полупроводниковой электроники РАН (ИСВЧПЭ РАН, г. Москва) преуспел в разработке опытной (0,1...0,15) мкм НЕМТ (рНЕМТ, mНЕМТ) технологии на основе материалов GaAs, InP и GaN.

В данной статье описывается проектирование МШУ по методике совмещенного согласования с коэффициентом, не превышающим 2 дБ и усилением не менее 20 дБ в диапазоне от 7-13 ГГц с использованием GaAs технологии. Цель данной работы заключалась в разработке МИС МШУ со следующими характеристиками:

- коэффициент усиления не менее 20 дБ;
- выходная мощность не менее 14 дБм;
- коэффициент шума не более 2 дБ;
- коэффициенты отражения по входу и выходу не более -15 дБ.

Компания 50Om Тех. разработала библиотеку элементов AWR Microwave Office на базе предоставленного НИЯУ МИФИ технологического маршрута GaAs рНЕМТ 0,15 мкм. На основе этой библиотеки была выполнена работа.

II. СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

Проектирование микросхемы МШУ выполнено в системе автоматизированного проектирования NI AWR Design Environment с использованием GaAs технологии. МШУ спроектирован в виде двухкаскадного усилителя с применением двух GaAs рНЕМТ транзисторов [5, 6].

Проектирование выполнялось по методике совмещенного согласования, суть которой заключается в том, чтобы достигнуть условий согласования по максимуму коэффициента передачи по мощности (КПМ) и минимуму коэффициента шума (КШ). Однако, в процессе разработки было выявлено увеличение минимума коэффициента, что говорит об увеличении рассогласования по входу и, как следствие, не соответствует максимуму КПМ. В связи с этим присутствует необходимость в совместном согласовании двух определяющих характеристик малошумящего усилителя [7].

Коэффициент шума (NF) многокаскадного МШУ можно рассчитать по формуле Фрииса (1):

$$NF = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_2} + \frac{NF_3 - 1}{G_1 \cdot G_2} + \frac{NF_4 - 1}{G_1 \cdot G_2 \cdot G_3}, \quad (1)$$

где NF_x ($x=1, 2, 3, 4$) - коэффициент шума, а G_x ($x=1, 2, 3, 4$) - коэффициент усиления x -го каскада в линейном режиме.

В процессе анализа выражения (1) можно увидеть, что NF зачастую определяется коэффициентом NF_1 , а NF_1 зачастую определяется входным сопротивлением, т. е. первым каскадом. Помимо NF_1 в процессе проектирования следует учитывать обратные потери,

которые определяют, сколько энергии попадает в МШУ от предстоящего модуля. Одним из самых полезных инструментов для проектирования является Диаграмма Смита. С помощью этой диаграммы можно увидеть, что коэффициент отражения от входа (S_{11}) и оптимальный импеданс шумового согласования (GMN) комплексно сопряжены (Диаграмма В). Это означает, что минимальное шумовое согласование удовлетворено. На основании выражения (1) был сделан вывод о том, что МШУ может быть выполнен в двухкаскадном исполнении. Следовательно, схема будет включать в себя входной (первый) каскад, межкаскадную цепь и выходной (второй) каскад [7, 8].

Так как входной каскад многокаскадного усилителя (в частности, двухкаскадного) вносит большой вклад в общий коэффициент шума микросхемы, необходимо его проанализировать.

Коэффициент отражения от входа рассчитывается по выражению (2) [9]:

$$S'_{11} = S_{11} + \frac{S_{21} \cdot S_{21} \cdot \Gamma_2}{1 - S_{22} \cdot \Gamma_2}. \quad (2)$$

Зная, что импеданс, на который нагружен выход, соответствует коэффициенту отражения Γ_2 , можно заключить, что трансформации входного коэффициента отражения для почти полного совпадения условий согласования по максимуму КПМ и минимуму КШ можно добиться тремя способами (см. рис. 1):

- с помощью изменения параметров самого транзистора (Диаграмма А);
- при включении цепей отрицательных обратных связей (Диаграмма Б);
- нагрузить на оптимальный импеданс, который позволит в полной мере достичь условия согласования по минимуму КШ и максимуму КПМ (Диаграмма В) [6].

Таким образом, выполнив настройку МШУ, описанную выше, путем варьирования оптимальной рабочей точки и периферии транзисторов, глубины отрицательных обратных связей и включения типовой входной согласующей цепи были достигнуты следующие характеристики первого (входного) каскада:

- коэффициент составил шума не более 1.3 дБ;
- коэффициент усиления составил не менее 8 дБ;
- входной коэффициент отражения составил менее -15 дБ.

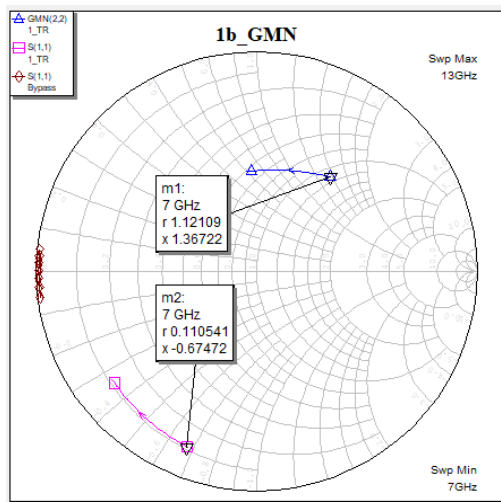


Диаграмма А

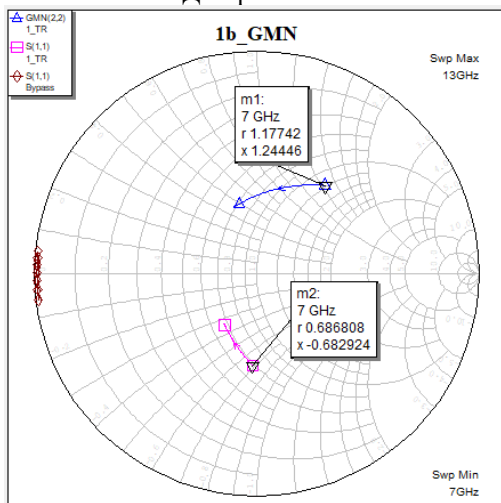


Диаграмма Б

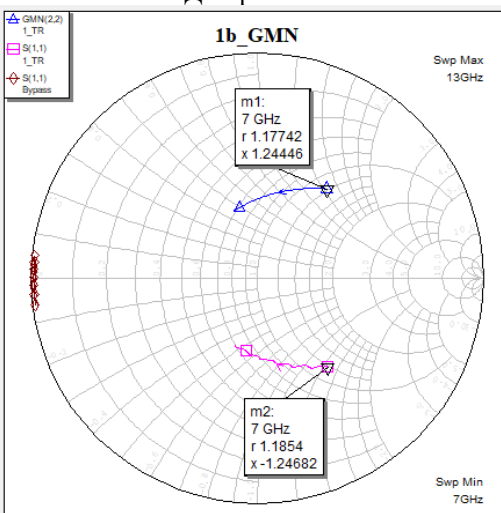


Диаграмма В

Рис. 1. Диаграммы Вольперта Смита с GMN и S11, диаграмма А: только транзистор, диаграмма Б: при введении последовательной ООС, диаграмма В: при оптимальной нагрузке на выходе

Усиление от 8 дБ позволит обеспечить шумовой вклад последующих каскадов в суммарный коэффициент шума, не превышающий 0.3 дБ.

Оптимальная рабочая точка которая соответствует оптимальному согласованию по максимуму коэффициента усиления и минимуму коэффициента шума является: $V_{ds}=2.5$ В, $V_{gs}=-0.33$ В, ток стока при такой рабочей точке и периферии 300 мкм составляет 32 мА (см. рис 2).

Межкаскадная цепь обеспечивает требуемый импеданс, который испытывает первый каскад на выходе транзистора для сохранения достигнутых условий согласования по минимуму шума и максимуму КПМ. Основные цели, которые преследовались при разработке межкаскадной цепи, заключались в следующем:

- обеспечение требуемого коэффициента усиления всей схемы;
- минимизация его неравномерности;
- обеспечить требуемое согласование со вторым каскадом.

Межкаскадная цепь была реализована в виде П-образного звена фильтра высоких частот, включающего в себя цепи питания первого каскада и цепь смещения второго (см. рис. 2).

Основная задача второго каскада заключалась в достижении требуемого коэффициента усиления всего МШУ и обеспечение согласования с нагрузкой. Для того, чтобы выполнить поставленные задачи, была введена типовая выходная согласующая цепь, аналогичная входной. Режим работы транзистора второго каскада выбран следующим: $V_{ds}=3$ В, $V_{gs}=-0.26$ В. Ток стока при таком режиме составил 46 мА. Электрическая схема МШУ представлена на рис. 2.

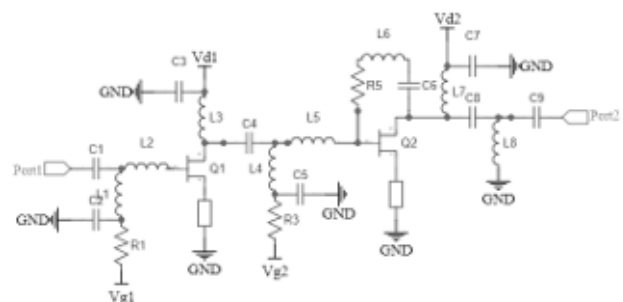


Рис. 2. Электрическая схема малошумящего усилителя

Предлагаемое схемотехническое решение, представленное на рис. 2, основано на использовании реактивной последовательной отрицательной обратной связи в виде высокоомного отрезка линии передачи (эквивалент индуктивности) в истоке транзистора. Такое схемотехническое решение позволило достичь заданных характеристик.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование выполнялось с учетом входных и выходных подводящих 500 мкм вводов [10]. Результаты моделирования (см. также рис. 3):

- коэффициент усиления составил 20 дБ в полосе;
- неравномерность коэффициента усиления составила не более 2 дБ;
- коэффициент отражения по входу и выходу составил не более -15 дБ;
- коэффициент шума в полосе составил не более 1.6 дБ.

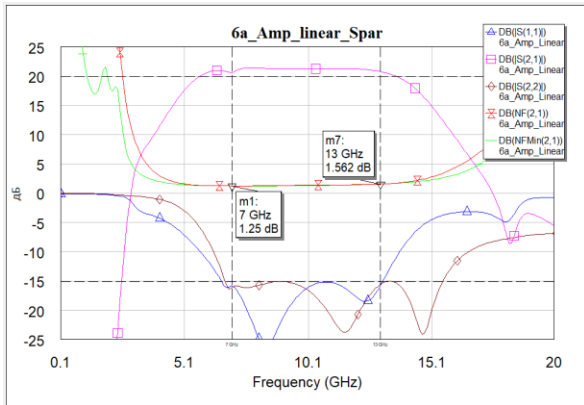


Рис. 3. S21-коэффициент передачи (отличительная черта \square), S11-коэффициент отражения от входа (отличительная черта Δ), S22-коэффициент отражения от выхода (отличительная черта \diamond) и NF-коэффициент шума (отличительная черта \times)

На рис. 4 представлена итоговая топология разрабатываемого МШУ

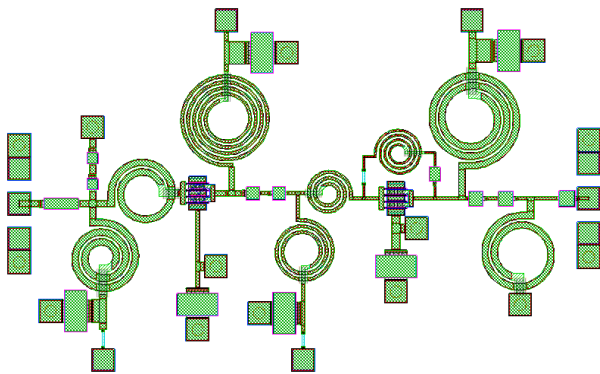


Рис. 4. Итоговая топология с габаритами 2.55x1.55 мм²

На рис. 5 приведены графики выходной мощности и коэффициента усиления по мощности. Уровень выходной мощности с компрессией на 1 дБ составил 14 дБм, а уровень коэффициента усиления – 20 дБ.

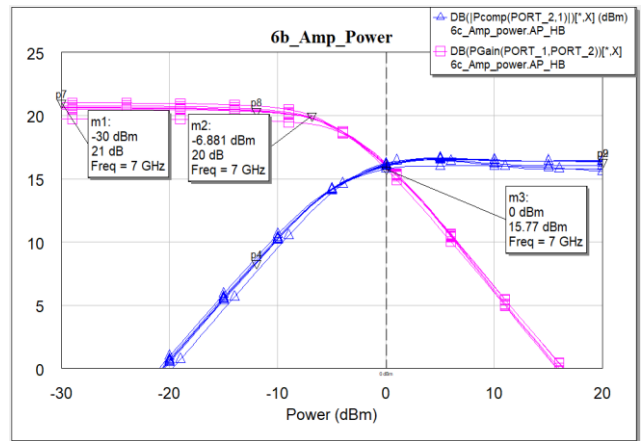


Рис. 5. Выходная мощность с компрессией на 1 дБ (отличительная черта Δ) и коэффициент усиления по мощности (отличительная черта \square)

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы была спроектирована МИС МШУ X-диапазона частот на основе GaAs НЕМТ технологии. Полученная МИС МШУ имеет коэффициент усиления не менее 20 дБ во всей рабочей полосе, приемлемый уровень согласования, высокий уровень выходной мощности. Габариты полученной МИС МШУ составили 2.55x1.55 мм². Результаты, полученные в ходе выполнения работы, могут быть использованы при разработке опытного образца МИС МШУ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием библиотеки проектирования, предоставленной АО "ПКК Миландр" для научно-образовательных целей. Библиотека для САПР AWR Microwave Office создана компанией 500m Tech. на базе технологического маршрута GaAs рНЕМТ 0,15 мкм, разработанного в НИЯУ МИФИ

ЛИТЕРАТУРА

- [1] I.D. Robertson «RFIC and MMIC design and technology». – IEEE, 2001 – 555 с.
- [2] В.Д. Дмитриев, В.М. Коротаев, Д.А. Шишкин «Оценка параметров рНЕМТ СВЧ полевого транзистора по нелинейным критериям» [Электронный ресурс]- Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-parametrov-phemt-svch-polevogo-tranzistora-po-nelineynym-kriteriyam/viewer> (дата обращения: 03.08.2021)
- [3] Патент РФ №201447871/28, 27.11.2014. Р-Немт транзисторная гетероструктура с составным донорным слоем содержащим нанобарьеры AlAs // Патент России №155420. 2015 Бюл.№ 28 / Василевский И.С., Виниченко А. Н., Каргин Н. И., Рында С. М.
- [4] Д.В. Карпухин, П.П. Мальцев, «Монолитная интегральная схема малошумящего усилителя на нитриде галлия для диапазона 57-64 ГГц» [Электронный ресурс] - Режим доступа: https://rtj.mirea.ru/upload/medialibrary/575/5_krapuhinwatermark.pdf (дата обращения: 03.08.2021)
- [5] Мокеров В.Г. «Разработка комплекта монолитных малошумящих усилителей X-диапазона на основе 0,15 мкм GaAs рНЕМТ-технологии», Доклады ТУСУРа 2010 г. – № 2(22). – Ч. 1. – С. 105–117.

- [6] Кондратенко А.В. «Разработка GaAs МИС маломощного усилителя X-диапазона» [Электронный ресурс] - Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_35315285_49060189 (дата обращения: 03.08.2021)
- [7] Кондратенко А.В. «GaAs МИС маломощного усилителя X-диапазона» / Кондратенко А.В., Баров А. А., Арыков В.С. // Микроэлектроника СВЧ: Сборник трудов конференции. Санкт-Петербург, 4–7 июня 2012 г. – Санкт-Петербург: ООО «Технолит», 2012. – Том 1, с. 160 – 164.
- [8] Алмазов-Долженко К. И. Коэффициент шума и его измерения на СВЧ, - М: Научный мир, 2000 г., 240 с.
- [9] Текшев В.Б. «Минимизация изменения коэффициента шума усилителя сканирующей приемной активной фазированной антенной решетки» / В.Б. Текшев, С.Г. Плигин // Электронная техника. Сер. СВЧ-техника. - 1994. Вып. 2(462), С.19-22.
- [10] Дмитриев Е.Е., «Основы моделирования в Microwave office 2009» [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://www.eurointech.ru/products/AWR/Dmitriev_mwo_2009_1.pdf (дата обращения: 03.08.2021)

GaAs MIC X-band Low Noise Amplifier

Y. Kudabay, A. Salikh, V. A. Moseychuk, D.S. Bragin

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

Russia, 634045 Tomsk, st. Lenin, 40, salikhayatulla327@gmail.com

Abstract — When developing active phased antenna arrays (APAA), the choice of a low noise amplifier (LNA) is of great importance. The aim of this work was to design an X-band (7-13 GHz) LNA monolithic integrated circuit (MIC) based on the technology of gallium arsenide (GaAs) transistor with increased electron mobility (pHEMT) for use in APAA. When developing the LNA MIC, a library of elements based on the GaAs pHEMT 0.15 μm technological route in AWR Microwave Office CAD was used. The developed amplifier is based on common-source transistors with serial negative feedback (NFB) in the form of a high-impedance transmission line segment, as well as with parallel NFB to match the noise figure and power gain in accordance with the combined matching technique. As a result of the work, it was possible to design an LNA MIC with gains of at least 20 dB. The noise figure of the amplifier was 1.5 dB, the reflection coefficient from the input and output was no more than -15 dB. The final dimensions of the MIC topology were 2.55x1.55 mm².

Keywords — gallium arsenide (GaAs), HEMT, LNA, X-band, microwave MIC, noise figure, combined matching method.

REFERENCES

- [1] I.D. Robertson «RFIC and MMIC design and technology». – IEEE, 2001 – 555 с.
- [2] V.D. Dmitriev, V.M. Korotaev, D.A. Shishkin «Evaluation of the parameters of pHEMT microwave field-effect transistor by nonlinear criteria» [Electronic resource] - Access mode: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-parametrov-phemt-svch-polevogo-tranzistora-po-nelineynym-kriteriyam/viewer> (access date on 03.08.2021).
- [3] Vasilevsky I.S., Vinichenko A.N., Kargin N.I., Ryndya S.M. P-Hemt tranzistornaya geterostruktura s sostavnym donornym slozem sodержashchim nanobar'yery AlAs [P-Hemt transistor heterostructure with a composite donor layer containing AlAs nanobarriers]. Patent RF, no 1554020, 2015
- [4] «Monolithic Integrated Circuit of Low Noise Gallium Nitride Amplifier for 57-64 GHz» [Electronic resource] - Access mode: https://rtj.mirea.ru/upload/medialibrary/575/5_krapuhinwatermark.pdf (access date 03.08.2021).
- [5] Mokerov V.G. «Development of a set of monolithic low-noise X-band amplifiers based on 0.15 μm GaAs pHEMT technology», Doklady TUSURa 2010. № 2(22). – I. 1. – pp. 105–117.
- [6] Kondratenko A.V. "Development of GaAs MIC low-noise amplifier X-band" [Electronic resource] - Access mode: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_35315285_49060189 (access date 03.08.2021).
- [7] A.V. Kondratenko «GaAs MIC low-noise amplifier X-band», / Kondratenko A.V., Barov A.A., Arykov V.S. // Микроэлектроника СВЧ: Сборник трудов конференции. Санкт-Петербург, 4–7 June 2012. - Санкт-Петербург: ООО «Технолит», 2012. – V. 1, pp. 160 – 164.
- [8] K. Almazov-Dolzhenko «Noise figure and its measurements at microwave frequencies». M.: Nauchnyy mir, 2000, 240 p.
- [9] V.B. Tekshev «Minimization of the change in the noise figure of the amplifier of the scanning receiving active phased array antenna» / V.B. Tekshev, S.G. Pligin // Electronic Engineering. Ser. Microwave technology. - 1994. V. 2(462) pp.19-22.
- [10] Dmitriev E.E., «Basics of modeling in Microwave office 2009» [Electronic resource] - Access mode: http://www.eurointech.ru/products/AWR/Dmitriev_mwo_2009_1.pdf (access date 03.08.2021).