

УДК 621.396.96

В.И. Евсеев<sup>1</sup>, О.В. Лавричев<sup>1</sup>, С.В. Хамидулин<sup>2</sup>, В.П. Хранилов<sup>3</sup>**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАТЕРИАЛА ПОДЛОЖЕК НА РАБОЧИЕ ПАРАМЕТРЫ ФИЛЬТРА ГАРМОНИК ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩИХ МОДУЛЕЙ ПРИ СЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**ОАО Арзамасский приборостроительный завод им. П.И. Пландина<sup>1</sup>,  
ОАО ФНПЦ ННИИРТ<sup>2</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>3</sup>

Рассматривается актуальная проблема конструкторско-технологического проектирования микроэлектронной аппаратуры для радиолокации, связанная с влиянием подложек на выходные характеристики интегральных устройств приема-передающих модулей для современных антенных устройств РЛС.

Исследуется модель параметрической чувствительности фильтра гармоник в микрополосковом исполнении, входящего в состав интегрального модуля.

Новизна работы обусловлена использованием компьютерных технологий с целью получения адекватных оценок поведения реальных устройств по их моделям. Оценивается и критически обосновывается выбор математического представления исследуемого устройства.

Полученные результаты и выводы могут использоваться в качестве рекомендаций при разработке перспективных образцов радиолокационной аппаратуры.

*Ключевые слова:* АФАР, фильтр гармоник, подложка.

**Введение**

Прогресс в создании новых типов летательных аппаратов, ставший особенно интенсивным к середине XX века, привел к существенному росту скоростей целей и уменьшению их эффективной поверхности рассеяния. Это потребовало значительного усовершенствования радиолокационных станций (РЛС), как одного из основных средств обнаружения и наблюдения за воздушными целями. Именно в этот период активные фазированные антенные решетки (АФАР) начали широко внедряться в РЛС различного назначения.

Основными активными элементами приема-передающих модулей (ППМ) АФАР [1] являются транзисторы большой мощности, которые для достижения необходимого коэффициента усиления в схеме включаются каскадно. Для достижения наибольшего коэффициента усиления и высокого КПД транзисторы работают в нелинейном режиме, обычно в классе В или С. Особенностью многокаскадного усилителя является также то, что продукты нелинейных преобразований сигналов образуются во всех каскадах так, что в  $n$ -м каскаде присутствует суперпозиция собственных продуктов нелинейности и продуктов, образовавшихся в предыдущих каскадах. Уровень данных искажений влияет на работоспособность ППМ и обязательно оговаривается в технических условиях (ТУ) на изделие, так как этот параметр определяет возможность выполнения требования по электромагнитной совместимости (ЭМС) всей АФАР. Уровень искажений необходимо учитывать при проектировании систем АФАР, а также предусматривать обязательный технологический контроль на ограниченной серии ППМ [1].

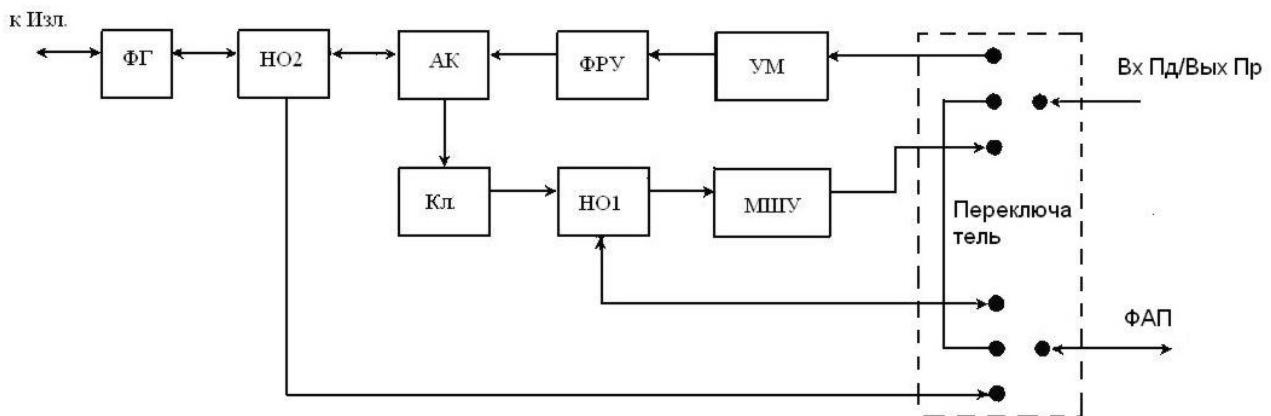
**Схема и характеристики ППМ**

Для обеспечения требований ТУ в конструкции ППМ предусматривают применение фильтра гармоник (ФГ), выполненного на элементах с распределенными параметрами, либо на сосредоточенных элементах в зависимости от частотного диапазона АФАР.

Расположение ФГ зависит от конструкции и типа ППМ. Однако в случае, когда необ-

ходимо понизить уровень высших гармоник, возникающих после антенного коммутатора (АК), ФГ устанавливаются непосредственно на выходе ППМ (рис. 1).

По причине нахождения ФГ непосредственно на выходе ППМ после антенного коммутатора (АК) и направленного ответвителя (НО2), изменение фазы сигнала за счет прохождения через ФГ не учитывается в системе фазовой автоподстройки, что приводит к снижению точности определения местоположения цели. Следовательно, при серийном производстве ФГ для ППМ в составе сегмента АФАР на этапе разработки, необходимо учесть разброс фазовых характеристик ФГ в рабочей полосе частот. Основными техническими требованиями к ФГ для ППМ являются: уровень ослабления высших гармоник; неравномерность коэффициента передачи в полосе пропускания фильтра; стабильность фазочастотной характеристики (ФЧХ) фильтра;



**Рис. 1. Структурная схема ППМ:**

ФГ – фильтр гармоник; НО2 – направленный ответвитель передающей (Пд) части ППМ; АК – антенный коммутатор; НО1 – направленный ответвитель приемника (Пр); КЛ – ключ Пд\Пр; ФРУ – ферритовое развязывающее устройство; УМ – усилитель мощности, МШУ – маломощный усилитель

### **Средства и способы обеспечения характеристик ФГ ППМ при серийном производстве**

Уровень ослабления высших гармоник и неравномерность коэффициента передачи в полосе пропускания формируются на этапе схмотехнического проектирования фильтра и зависят от структуры фильтра, количества звеньев, характеристики фильтра Чебышева, Баттерворта и прочих схмотехнических характеристик и параметров. Конструктивно-технологические факторы, определяемые конструктивными особенностями и реализацией производства ППМ, не оказывают существенного влияния на эти параметры ФГ ППМ.

Стабильность ФЧХ фильтра определяется её изменениями, как в процессе выполнения основных функций, так и под влиянием внешних дестабилизирующих воздействий, и зависит от допусков на рабочие параметры элементов, на основе которых выполнен фильтр для ППМ. Технические требования ФЧХ для приемного канала ППМ устанавливают жесткие ограничения, определяющие её неравномерность в пределах не более  $3^0$ . В противном случае необходимо введение подстройки ФЧХ ППМ до элемента КЛ на схеме ППМ (рис. 1).

Основной источник неравномерности ФЧХ, задающий её стабильность, критически важную для функциональности ППМ для АФАР, определяется статистической неравномерностью воспроизводимости конструктивно-технологических характеристик производственного процесса и рабочих параметров электрорадиоэлементов, передающих трактов и материала подложки несущей платы, составляющей конструктивную основу ППМ. Несмотря на регламентируемые параметры, определенные условиями выбора элементной базы и разра-

ботки конструкции ППМ при их проектировании, в каждом конкретном случае реализации серийного производства ППМ для АФАР, всё же требуется предварительный анализ имеющейся производственной базы и организация входного контроля не только комплектующих элементов, а и материалов, используемых при создании конструкций. Всё это в совокупности, с точки зрения системного анализа производственного процесса, представляет собой группу конструктивно-технологических факторов и определяет, в конечном итоге, качественные показатели производимых ППМ. Следует заметить, что проблема обеспечения стабильности основных характеристик ППМ для АФАР, относящихся к изделиям микроэлектроники, не исчерпывается на этапе их схмотехнического и конструкторского проектирования. Нестабильность параметров элементной базы, материалов и дестабилизирующее воздействие конструктивно-технологических факторов, особенно для опытных партий изделий или при развертывании новых производственных мощностей, приводят к необходимости проработки вопросов нормальной воспроизводимости рабочих характеристик ППМ при любой попытке организовать их серийное производство. Необходимость проверки работоспособности схемы и стабильности критических характеристик в реальных имеющихся производственных условиях становится в этом случае главным условием их успешного серийного производства. Как показывает практика, сложившаяся на промышленных предприятиях приборостроительного профиля [2], подобные проблемы решаются в специализированных подразделениях, имеющих в своем составе специалистов схмотехников и конструкторов-технологов, и оснащенных специализированным оборудованием и средствами вычислительной техники с установленным проблемно-ориентированным программным обеспечением для реализации непрерывной информационной поддержки жизненного цикла профильных изделий средствами CAD, CAE, CAM и PDM в условиях единого информационного пространства.

### Методика и алгоритм расчетов

Основной источник неравномерности ФЧХ для ФГ, выполненного в микрополосковом исполнении, это разброс параметров микрополосковых линий, обусловленный конструктивно-технологическими факторами, и разброс параметров диэлектрического материала.

Решение задачи по исследованию воздействия на рабочие характеристики ФГ конструктивно-технологических факторов при серийном производстве представляется возможным с применением метода анализа параметрической чувствительности ППМ [3]. Цель анализа – выбор материала подложки для изготовления ФГ, выполненного на микрополосковых линиях (МПЛ), и исследование параметрической чувствительности ФГ при серийном производстве.

Исследование параметрической чувствительности ФГ осуществляется в три этапа:

- определение типа модели и программно-алгоритмической реализации, на основе которой строятся последующие решения;
- определение чувствительности характеристик схемы к предельным значениям параметров диэлектрической подложки;
- определение наибольшей чувствительности схемы к разбросу параметров элементов схемы в зависимости от технологии изготовления, либо допусков при применении сосредоточенных элементов.

На примере ФГ для ППМ дециметрового диапазона волн рассмотрена проблема анализа повторяемости характеристик ФГ в зависимости от различных дестабилизирующих факторов и определен максимальный разброс ФЧХ фильтра при серийном производстве. Исследование ФГ произведено средствами специализированной САПР AWR Design Environment.

*Первый этап.* Исходя из критериев выбора типа модели, описанных в [1, 3], выбирается модель на основе схемы замещения (рис. 2).

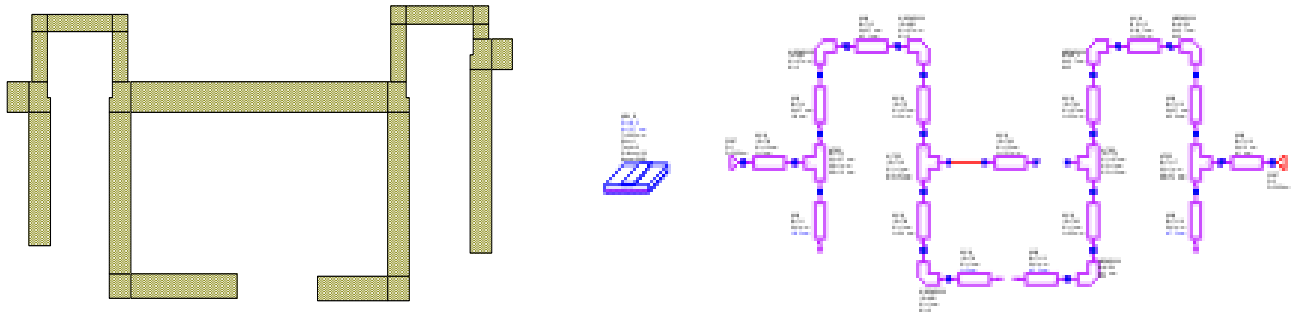
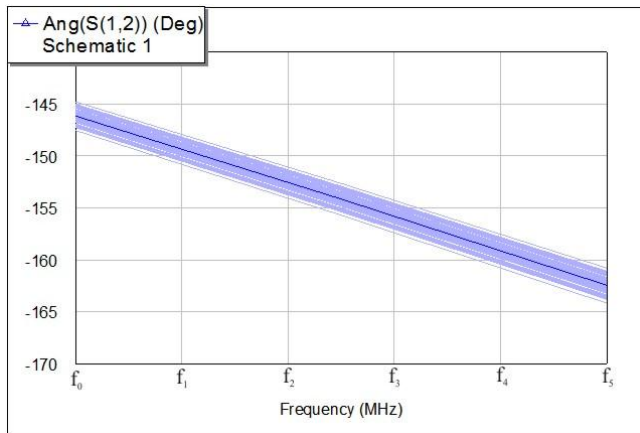
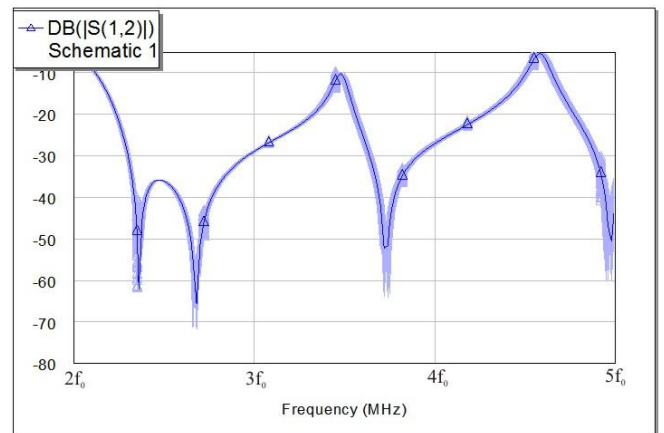


Рис. 2. Модель ФГ, рассчитанная на основе схем замещения

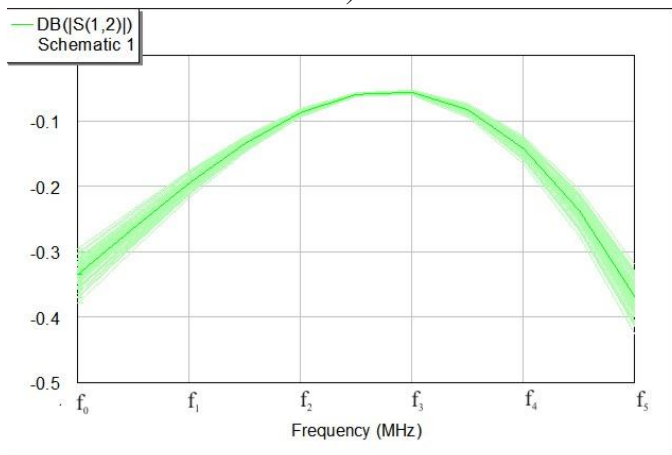
*Второй этап.* Определение чувствительности схемы к предельным значениям параметров диэлектрических подложек из материалов ФЛАН-10, поликор, ДИФЛАР. Данные отечественные материалы наиболее распространены при проектировании СВЧ-аппаратуры на российских предприятиях. Характеристики чувствительности определяются величиной статистического разброса основных параметров ФГ, обеспечивающих его функциональность, относительно их номинальных значений. На приведенных графиках (рис. 3, 4, 5) это наглядно иллюстрируется изображением «размытых» областей значений, сосредоточенных в непосредственной близости к сплошным кривым изменения отображаемых характеристик, соответствующих набором номинальных параметров.



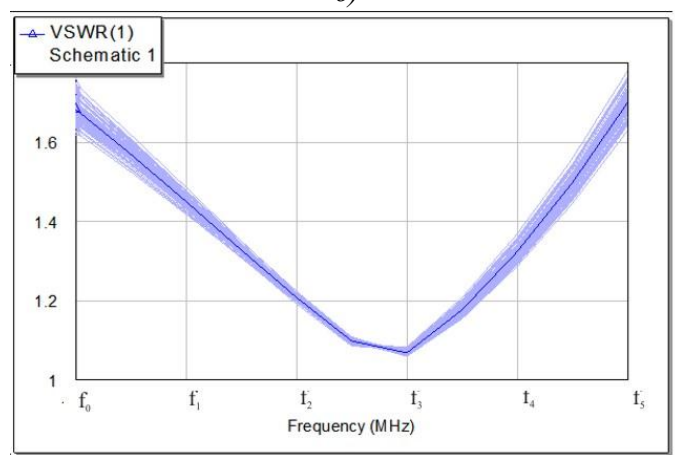
а)



б)



в)



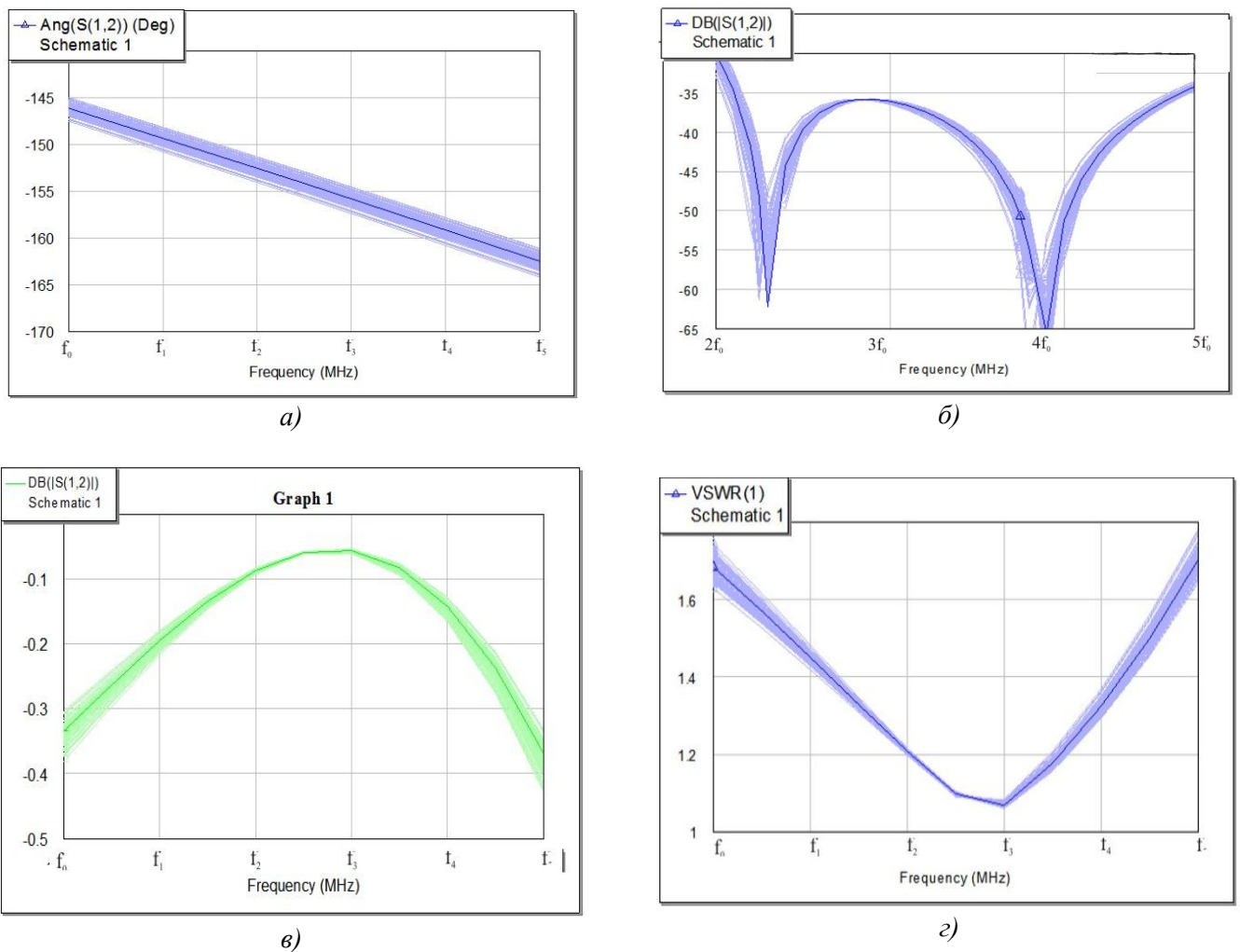
г)

**Рис. 3. Характеристики ФГ на подложке из ФЛАН-10:**

$a$  - фаза коэффициента передачи в рабочей полосе частот;  $b$  - коэффициент передачи;  $v$  - коэффициент передачи в рабочей полосе частот;  $z$  - КСВН в рабочей полосе частот

Полученные результаты исследования параметрической чувствительности основных рабочих характеристик ФГ от частоты: изменение фазы коэффициента передачи в рабочей полосе частот; изменение коэффициента передачи в диапазоне и в рабочей полосе частот; изменение КСВН в рабочей полосе частот приведены на рис. 3, 4 и 5.

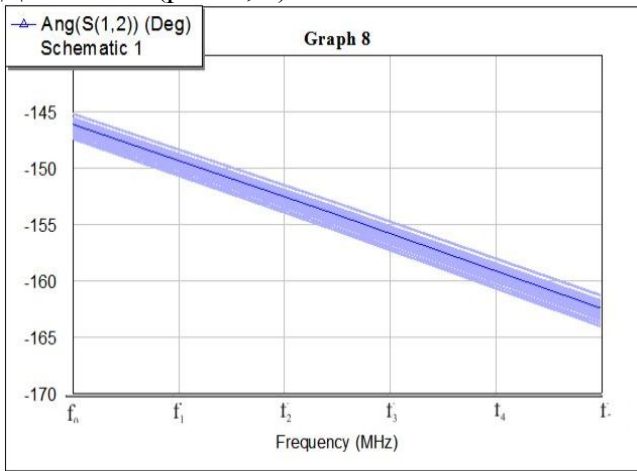
*Третий этап.* Определение наибольшей чувствительности схемы к разбросу параметров МПЛ, обусловленному технологией изготовления при серийном производстве. Ввиду незначительного изменения коэффициента передачи в рабочей полосе частот ФГ (рис. 3  $b$ ,  $v$ , 4  $b$ ,  $v$ , 5  $b$ ,  $v$ ), дальнейший анализ проводится только на основе графиков ФЧХ и КСВ (рис. 6  $a$ ,  $b$ , 7  $a$ ,  $b$ ).

**Рис. 4. Характеристики ФГ на подложке из поликора:**

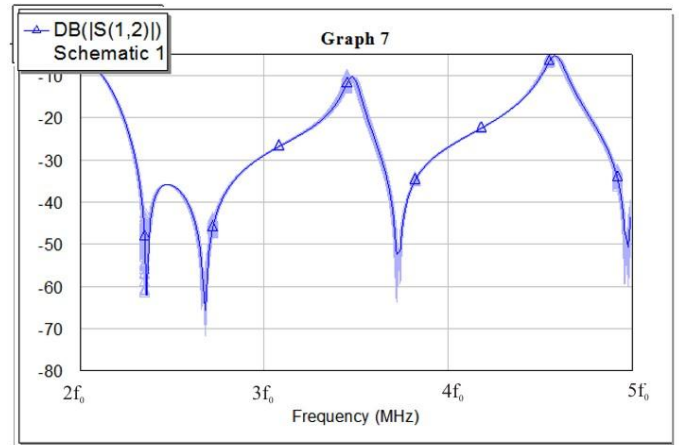
$a$  - фаза коэффициента передачи в рабочей полосе частот;  $b$  - коэффициент передачи;  $v$  - коэффициент передачи в рабочей полосе частот;  $z$  - КСВН в рабочей полосе частот

Результаты исследования, приведенные на рис. 3, 4 и 5, позволяют судить о повторяемости рабочих характеристик схемы под воздействием дестабилизирующих конструктивно-технологических факторов при использовании подложек ППМ из ФЛАН, поликора и ДИФЛАРА с учетом серийного производства. Очевидно, что для ППМ на подложке из ФЛАН обеспечивается достаточно хорошая повторяемость параметров, но анализ ФЧХ показывает разброс фазы прошедшего сигнала более  $3^0$ , что приводит к усложнению конструк-

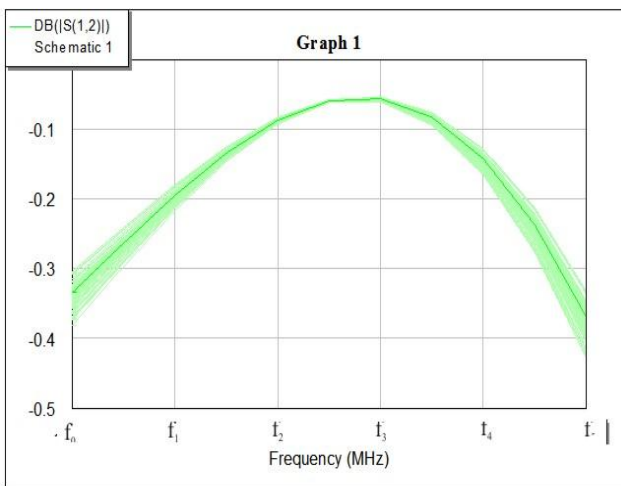
ции ППМ за счет необходимости введения подстройки по приемному каналу. Поэтому дальнейший анализ проводится для ФГ ППМ, реализуемых на подложках из поликора и ДИФЛАРА (рис. 6, 7).



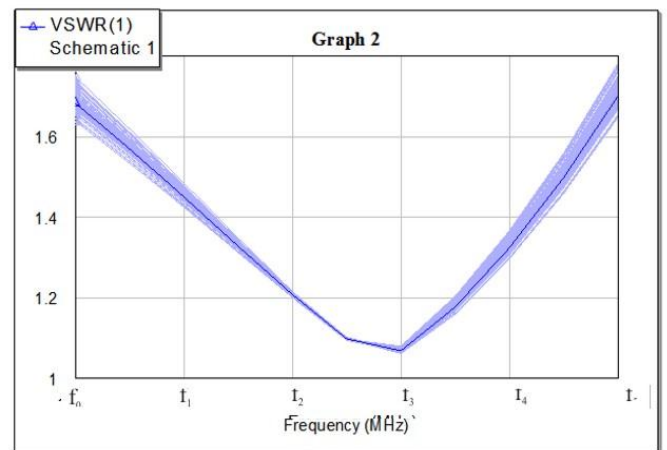
а)



б)



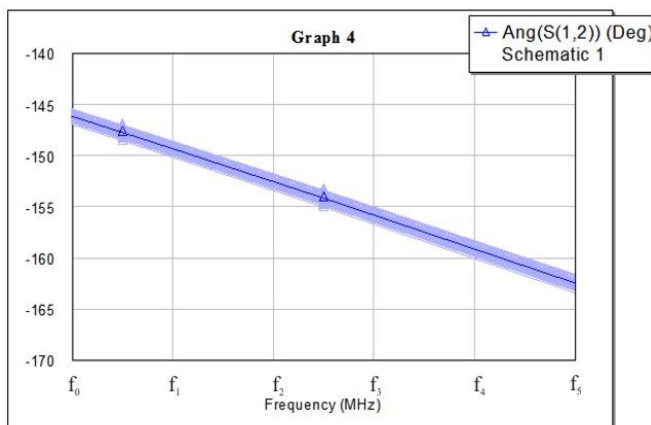
в)



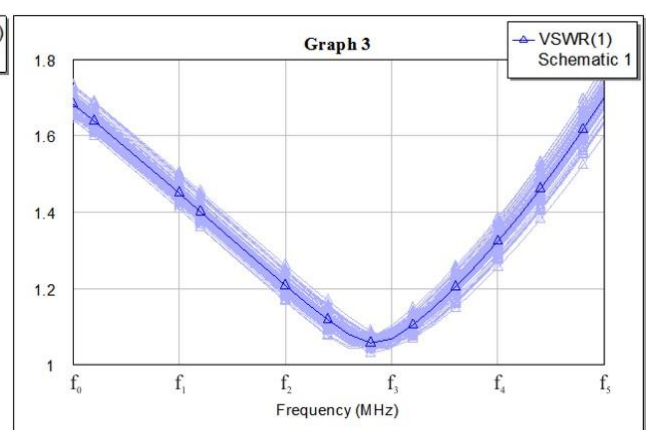
г)

**Рис. 5. Характеристики ФГ на подложке из ДИФЛАРА:**

а - фаза коэффициента передачи в рабочей полосе частот; б - коэффициент передачи; в - коэффициент передачи в рабочей полосе частот; г - КСВН в рабочей полосе частот

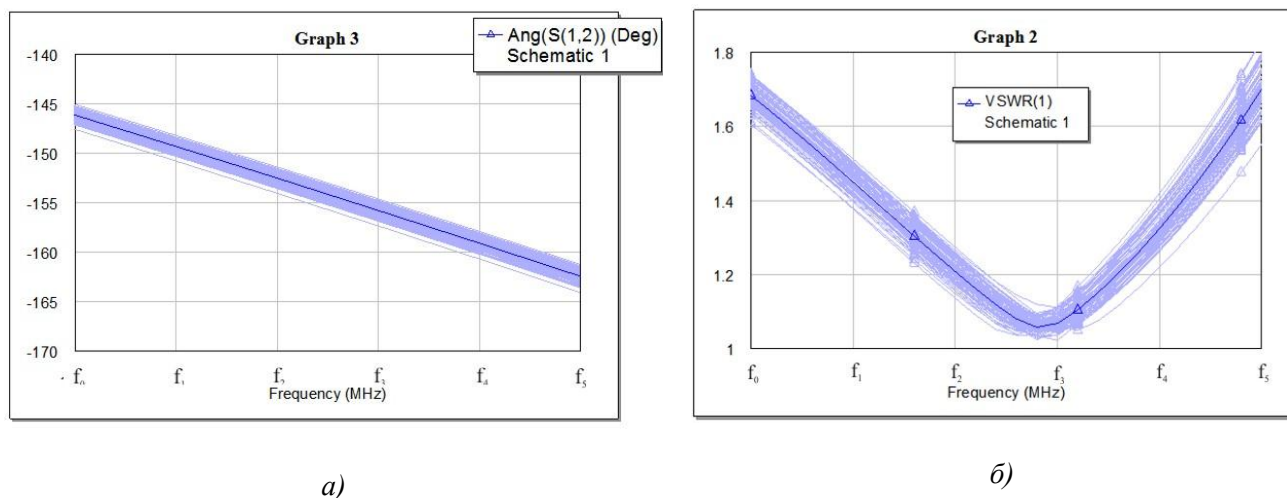


а)



б)

**Рис. 6. Характеристики ФГ на подложке из поликора:**  
 $a$  - фаза коэффициента передачи в рабочей полосе частот;  
 $b$  - КСВН в рабочей полосе частот



**Рис. 7. Характеристики ФГ на подложке из ДИФЛАРА:**

$a$  - фаза коэффициента передачи в рабочей полосе частот;  $b$  - КСВН в рабочей полосе частот

Исходя из приведенных графиков (рис. 6, 7) становится очевидным выбор в пользу поликора, так как изменение ФЧХ, как наиболее критичной к конструктивно-технологическим факторам характеристики для ФГ ППМ на подложке из этого материала, колеблется в пределах менее  $1^0$ , в отличие от ДИФЛАРА, где это изменение находится в пределах от  $1^0$  до  $3^0$ .

### Выводы

Исследование влияния выбора материала подложки на рабочие параметры ФГ ППМ для АФАР при серийном производстве показали, что более стабильные характеристики имеют фильтры, изготовленные на подложках из поликора. Но нельзя не отметить и преимущества ДИФЛАРА, такие как: достаточная стабильность параметров ФГ, меньший разброс диэлектрической проницаемости, большая пластичность по сравнению с поликором, отсутствие ограничений на размеры и более низкая стоимость. Поэтому при проектировании ФГ ППМ выбор делается исходя из первостепенности задач: наибольшей точности параметров или наименьшей стоимости изготовления.

Результаты проведенных исследований получены в ходе реализации Генерального соглашения о сотрудничестве между ОАО АПЗ им. П.И. Пландина и НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Экспериментальные и расчетные данные получены с использованием оборудования и средств вычислительной техники исследовательской лаборатории автоматизированного проектирования радиоэлектронных систем и микроволновых измерений на кафедре «Компьютерные технологии в проектировании и производстве» ИРИТ НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

### Библиографический список

1. Хамидулин, С.В. Основные проблемы создания ППМ с АФК метрового диапазона волн / С.В. Хамидулин, В.П. Хранилов // Информационные системы и технологии: мат-лы. Междунар. науч.-технич. конф. ИСТ-2011 / НГТУ. – Н. Новгород, 2011. С. 132.

2. **Гунин, Л.Н.** Модель внедрения ИПИИ-технологий на предприятиях радиоприборостроения в условиях организационных изменений и ограниченных ресурсов: монография / Л.Н. Гунин, В.П. Хранилов; НГТУ. – Н. Новгород. 2006. – 153 с.
3. **Гупта, К.** Машинное проектирование СВЧ устройств: [пер. с англ.] / Р. Гардж, Р. Чадха. – М.: Радио и связь, 1987. – 432 с.

*Дата поступления  
в редакцию 08.02.2013*

**V.I. Evseev, O.V. Lavrichev, S.V. Khamidulin, V.P. Khranilov**

### **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SUBSTRATE MATERIAL CHOICE ON THE PERFORMANCE PARAMETERS OF A FILTER OF HARMONICAS IN TRANSMIT-RECEIVE MODULES BY SERIAL MANUFACTURING**

We consider the current problem of the process and engineering design microelectronic apparatus of radar equipment associated with the influence of substrate choice for on to output behaviour integrated devices used in transmit-receive modules of an modern aeriels devices of radars – AESA.

The parametric sensitivity of a microstrip filter of harmonicas model, which is part of an integral unit, is investigated.

The novelty of the work consists in the use of computer technology in order to obtain adequate estimates of behavior of real devices based on their models. A mathematical representation of the device under investigation is estimated and its choice is critically justified.

The obtained results and conclusions can be used as recommendations when developing advanced designs of radar equipment.

*Key words:* AESA, microstrip filter of harmonicas, substrate.