

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.2.7>

УДК: 621.372.512

СОГЛАСОВАНИЕ МАЛОГАБАРИТНОЙ ПЛАНАРНОЙ РАМОЧНОЙ АНТЕННЫ, ВЫПОЛНЕННОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА, ПРИМЕНИТЕЛЬНО ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ 5G

П.В. Бойкачев¹, А.А. Сутько¹, А.А. Ержан², В.О. Исаев¹, И.А. Дубовик¹

¹Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»,
220057, Беларусь, Минск, пр-т. Независимости, 220.

²Алматинский Университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, Казахстан,
Алматы, ул. Байтурсынова, д. 126/1

Статья поступила в редакцию 28 февраля 2022 г.

Аннотация. Показана возможность применения мобильной антенны, реализованной на материале на основе фторированного этилен-пропилена в сочетании с гексаферитом стронция SrFe₁₂O₁₉, для современных систем связи пятого поколения, не исключая возможность ее работы в системах второго, третьего и четвертого поколения. Показаны преимущества применения композитных материалов при реализации антенных устройств в технологиях 5G. Произведено широкополосное согласование предложенной антенны с приемопередающим модулем в условиях возмущающих воздействий при ее работе в широком спектре естественных условий эксплуатации мобильного устройства.

Ключевые слова: гексаферит, антенное устройство, согласующее устройство, технологии 5G, широкополосные устройства.

Abstract. The possibility of using a mobile antenna based on a composite material based on fluorinated ethylene-propylene in combination with strontium hexaferite SrFe₁₂O₁₉ for modern fifth generation communication systems is shown, not excluding the possibility of its operation in second, third and fourth generation systems.

The advantages of using composite materials in the implementation of antenna devices in 5G technologies are shown. Broadband matching of the proposed antenna with the transceiver module under the conditions of disturbing influences during its operation in a wide range of natural conditions of operation of the mobile device was carried out.

Key words: hexaferrite, antenna, device, matching device, 5G technologies, broadband devices.

Введение

Мобильная связь стала одной из наиболее успешных инновационных технологий современности. Сегодня мобильный трафик беспрецедентно растет благодаря возросшей популярности интеллектуальных телефонов и других мобильных устройств передачи данных, таких как ноутбуки, нетбуки и др. Увеличение широты пропускания радиоинтерфейса и выделение новых частотных диапазонов играют первостепенную роль при таком экспоненциальном росте. Так, для обеспечения передачи большего объема информации, в современных системах третьего, четвертого и пятого поколения (3G, 4G и 5G) используют широкополосные сигналы (ШПС). К достоинствам этих сигналов относятся: безошибочная передача информации в условиях многолучевого распространения радиоволн и возможность получения ансамбля ШПС, занимающих общую полосу частот. Но ввиду работы на высоких частотах и в широких диапазонах длин волн возрастает затухание ШПС. Связано это с затуханием при распространении радиоволн в пространстве и в трактах радиотехнического устройства.

Целью данной работы является оценка возможности обеспечения высокого уровня передачи мощности ШПС в трактах радиотехнических устройств между приемо-передающим модулем (ППМ) и антенной, реализованной с использованием различных материалов и применением широкополосных согласующих устройств, до зондирования его в пространство в широком спектре естественных условий эксплуатации. Для достижения целей работы предлагается оценить возможность применения материалов с

управляемыми микроволновыми свойствами (диэлектрическая (ϵ) и магнитная проницаемость (μ)), вариации которых изменяет волновое сопротивление и геометрические размеры микрополосковой линии, что расширяет возможности по обеспечению требуемых электромагнитных характеристик мобильного устройства. Компании Huawei и Ericsson предпочитают использовать микроволновые диэлектрические керамические материалы, в то время как ZTE (Zhongxing Telecom Equipment) и Nokia по-прежнему предпочитают миниатюрные металлические полые фильтры [1]. В такой постановке задачи интересным является оценка влияния изменения композитного материала подложки на характеристику уровня коэффициента передачи мощности (КПМ) мобильной антенны в рабочем диапазоне частот, которая, для наглядности, может характеризоваться зависимостью коэффициента стоячей волны (КСВ) от частоты. Целесообразно оценить передачу мощности от ППМ к антенне в реальных условиях их эксплуатации (в корпусе мобильного устройства, в руке, при размещении телефона у головы пользователя).

1. Моделирование мобильной антенны

В качестве примера исследуем малогабаритную планарную рамочную антенну [2] модель которой представлена на рисунке 1. Рассматриваемая антенна подключается с помощью микрокоаксиальной линии с сопротивлением 50 Ом в точке питания А (рисунок 1), а на конце (точка В (рисунок 1)) закороченная полоса изгиба муфты напрямую подключается к пластине заземления через сквозное отверстие в подложке.

Для проверки эффективности работы ППМ и антенны в реальных условиях предлагается реализовать модель данного мобильного антенного устройства в среде моделирования CST STUDIO SUITE 2020, которая предназначена для проектирования, моделирования и оптимизации трехмерных электромагнитных систем. Она используется самыми передовыми технологическими и инжиниринговыми компаниями во всем мире. Программа позволяет решать задачи цифровой обработки сигналов, моделирования программируемых

логических интегральных схем и систем связи в целом, проектирования радиолокационных моделей и многое другое [3].

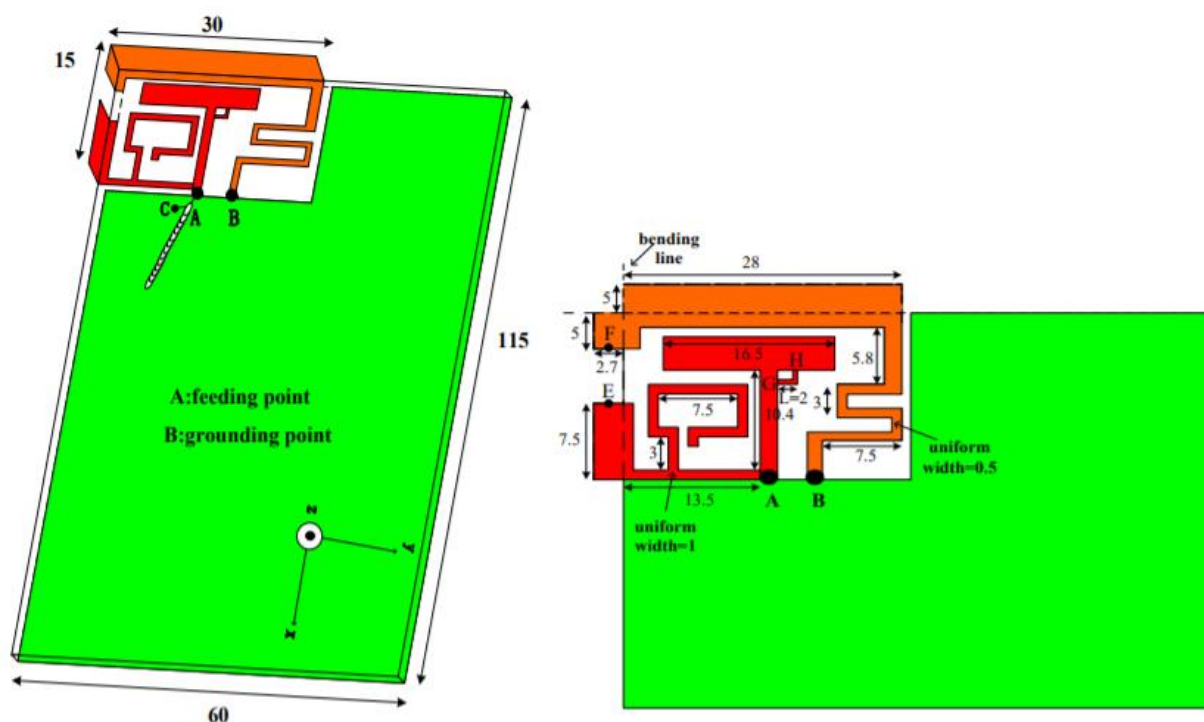


Рис. 1. Вид малогабаритной планарной антенны для работы в WWAN/LTE диапазоне в мобильном телефоне

Для проверки эффективности работы ППМ и антенны в реальных условиях предлагается реализовать модель данного мобильного антенного устройства в среде моделирования CST STUDIO SUITE 2020, которая предназначена для проектирования, моделирования и оптимизации трехмерных электромагнитных систем. Она используется самыми передовыми технологическими и инженеринговыми компаниями во всем мире. Программа позволяет решать задачи цифровой обработки сигналов, моделирования программируемых логических интегральных схем и систем связи в целом, проектирования радиолокационных моделей и многое другое [3].

Представленная мобильная антенна предназначена для работы в WWAN/LTE (830–960 МГц, 1710 – 2690 МГц) диапазонах частот. Рассмотрим возможность применения данной антенны для более широкого диапазона частот, представленного на рисунке 2. Интересной является оценка возможности применения данной антенны для современных систем пятого поколения, не

исключая возможность ее работы в системах второго, третьего и четвертого поколения. В рамках применения данной антенны в системах, используемых 5G, ограничимся исследованием среднего поддиапазона частот (Middle). Этот диапазон является компромиссным между верхним и нижним поддиапазонами 5G и часто используется в мобильных устройствах.

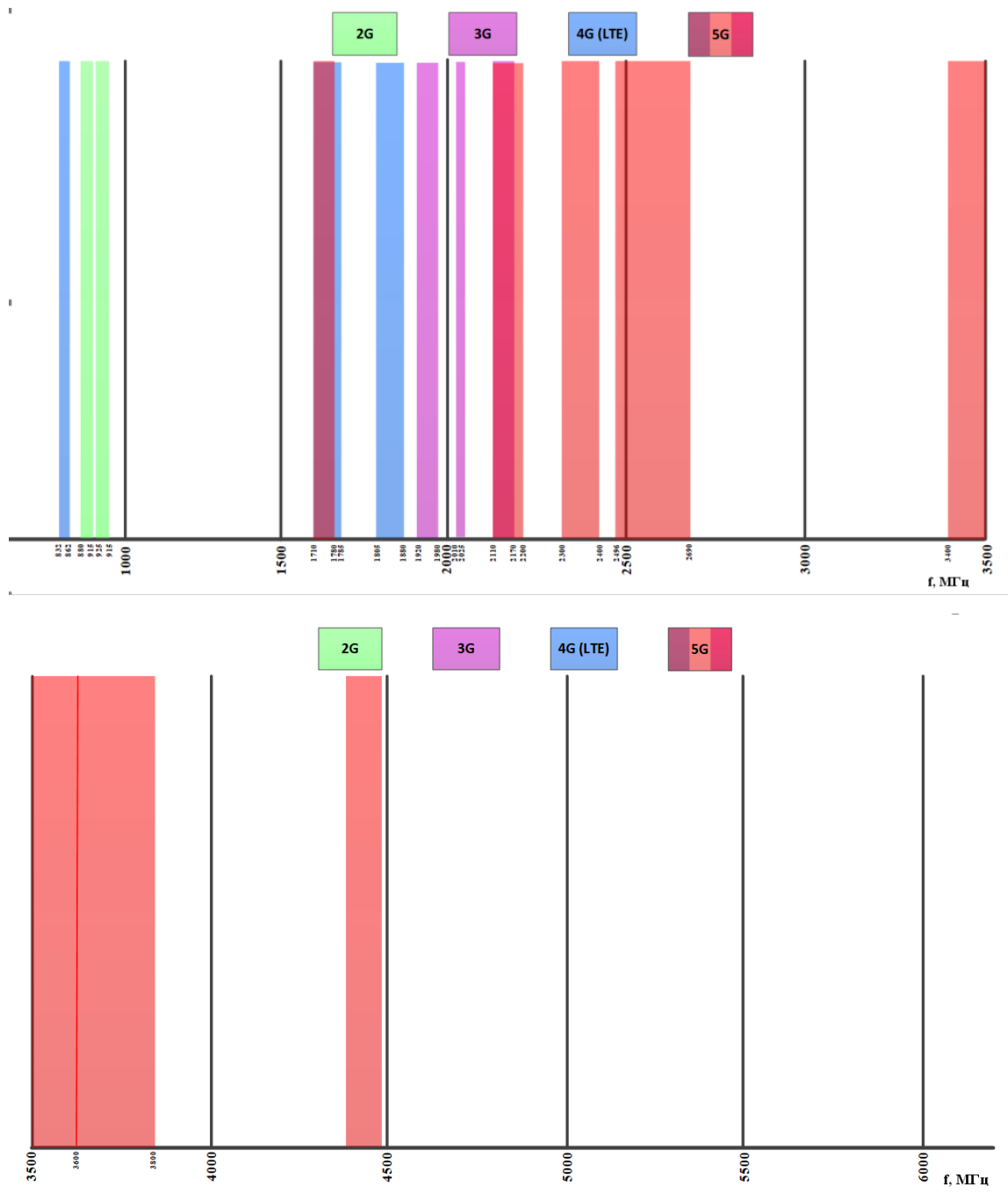
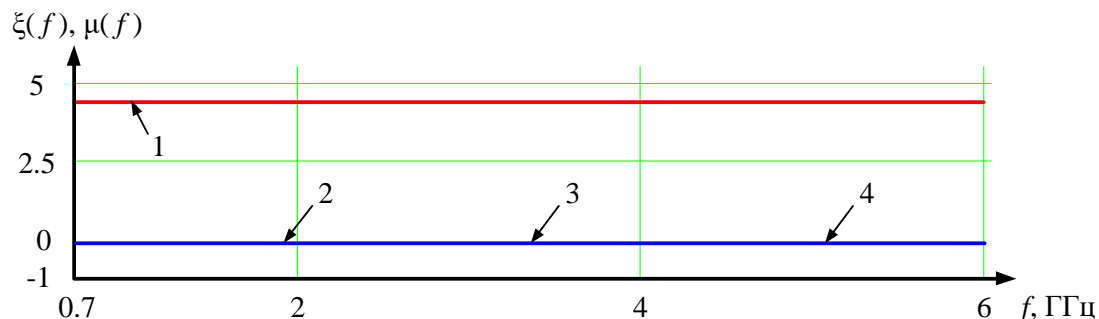


Рис. 2. Диапазоны используемых частот мобильными и другими операторами

В качестве диэлектрической подложки в исследуемой антенне [2] используется базовый материал FR (FR – Flame Retardant)-4 (далее FR-4) с

характеристиками диэлектрической проницаемости от частоты, которые представлены на рисунке 3. Этот огнестойкий материал представляет собой полимерную систему на основе эпоксидной смолы, в качестве армирующей составляющей в которой используется стеклоткань.



1 – реальной составляющей; 2 – мнимой составляющей

Рис. 3. Зависимость диэлектрической проницаемости FR-4 от частоты

Вид модели антенны представлен на рисунке 4.

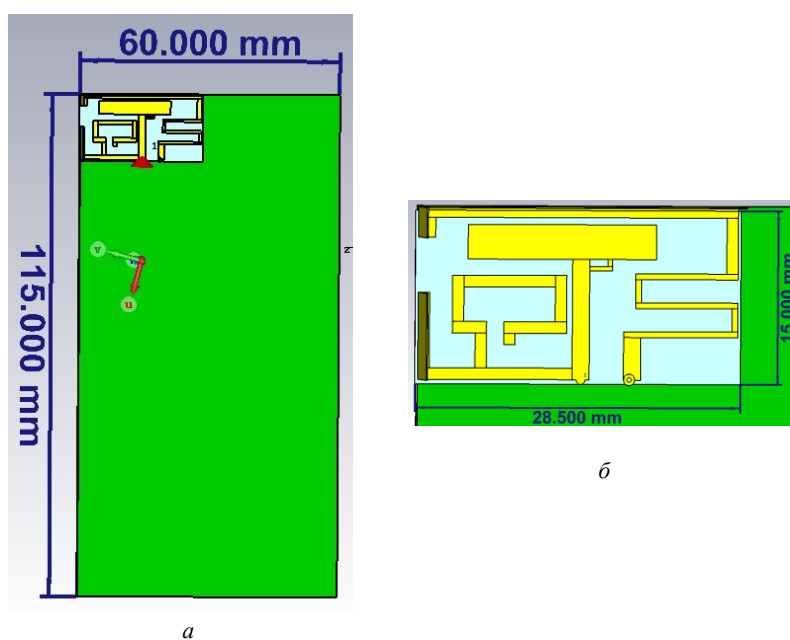


Рис. 4. 3D-модель малогабаритной планарной рамочной антенны WWAN/LTE диапазона частот

При подключении антенны к сигнальному порту ППМ с номинальным сопротивлением 50 Ом функция КСВ принимает зависимость, представленную на рисунке 5.

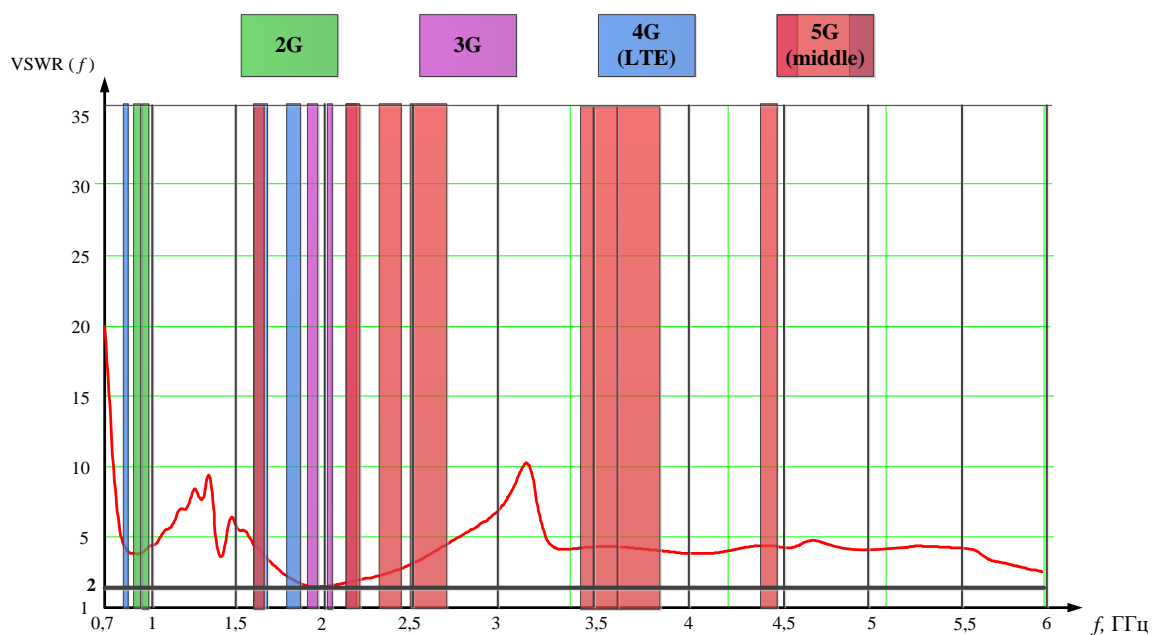


Рис. 5. Зависимость функции КСВ малогабаритной планарной рамочной антенны от частоты

Анализируя кривую на рисунке 5 можно сделать вывод, что данная антенна при подключении ее к сигнальному порту с сопротивлением 50 Ом обеспечивает в диапазоне 830–960 МГц значение КСВ от 3 до 5 и от 1,8 до 5,5 в диапазоне 1710–6000 МГц, что соответствует потерям уровня КПМ в диапазоне 25–50% от максимального. Для приемно-передающей антенны это в большинстве случаев является неприемлемым результатом, так как основной задачей ППМ в связке с антенным устройством является обеспечение высокого и устойчивого уровня передачи мощности и зондирование его в пространство.

Для решения обозначенной проблемы в ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» был разработан композитный материал, состоящий из фторированного этилен-пропилена (ФЭП) в сочетании с гексаферитом стронция ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) в соотношении 50 масс. % на 50 масс. %.

Феррит стронция $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ М-типа с гексагональной структурой и связанные с ним твердые растворы, замещенные диамагнитными ионами, обладают хорошими функциональными свойствами [4]. Превосходная химическая и коррозионная стойкость делает их экологически безопасными и устойчивыми. Сочетание высокой коэрцитивной силы с высокой остаточной

индукцией позволяет получать постоянные магниты с достаточной удельной магнитной энергией.

До недавнего времени гексаферрит широко использовался только в качестве постоянного магнита и в магнитных накопителях высокой плотности с перпендикулярной намагниченностью. В последнее время значительный рост публикаций о гексаферритах М-типа обусловлен перспективами высокочастотного (антенного) применения [5].

Образцы композитов (ФЭП/ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) получали путем смешивания исходных порошков ФЭП и $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ и дальнейшим термическим прессованием. Условия прессования: давление 5 МПа; температура 300 С (температура плавления для ФЭП составляет около 275 С); продолжительность прессования 10 мин. На рисунке 6 представлен внешний вид композитного материала.



Рис. 6. Изображение композитного материала

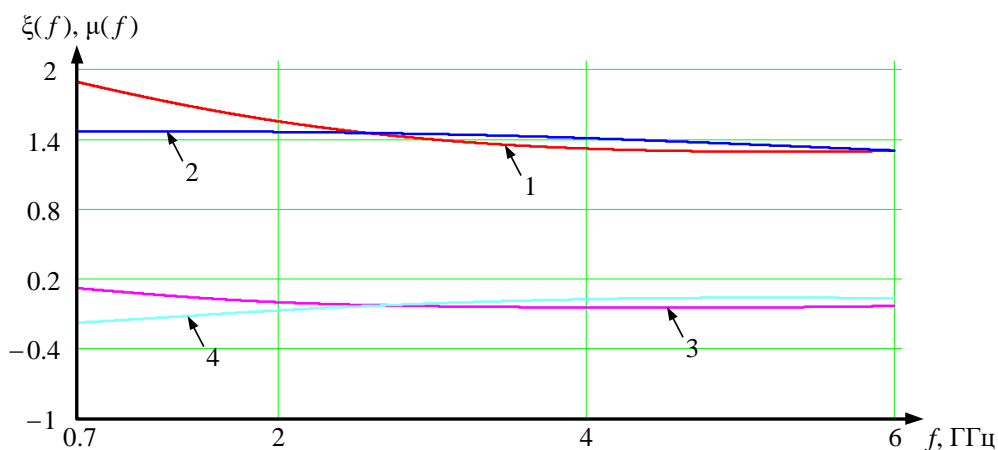
Исходя из того, что данный материал был получен опытным путем, его характеристики были представлены в виде измеренных на дискретном ряде частот реальной и мнимой составляющих диэлектрической и магнитной проницаемости, что качественно не отображает характер рассматриваемых зависимостей. Для качественной оценки характеристик рассматриваемого материала были сформированы аналитические математические модели (АММ) диэлектрической и магнитной проницаемости композиционного материала с высокой степенью адекватности по методике, представленной в [6].

Суть такого моделирования сводится к тому, что комплексные характеристики можно представить в виде дробно-рациональной функции от комплексной частоты ($s=if$) вида:

$$v(s) = \frac{a_0 + a_1s + a_2(s)^2 + \dots + a_k(s)^k}{b_0 + b_1s + b_2(s)^2 + \dots + b_q(s)^q}, \quad (1)$$

где все коэффициенты при s должны быть вещественными и неотрицательными, а высшие степени полинома числителя (k) и знаменателя (q), так же, как и их низшие степени, не могут отличаться более чем на 1. С помощью математического преобразования выражение (1) представляется в виде реальной $\text{Re}v(s)$ и мнимой $\text{Im}v(s)$ части от $v(s)$.

Характеристики данного материала, в виде зависимости диэлектрической и магнитной проницаемости от частоты, представлены на рисунке 7.



1 – реальная составляющая диэлектрической проницаемости; 2 – реальная составляющая магнитной проницаемости, 3 – мнимая составляющая диэлектрической проницаемости, 4 – мнимая составляющая магнитной проницаемости.

Рис. 7. Зависимость диэлектрической и магнитной проницаемости композитного материала, разработанного в ГО «НПЦ НАН Беларуси и материаловедения» от частоты

Применение композитного материала вместо FR-4 в малогабаритной планарной рамочной антенне [2] позволяет обеспечить зависимость функции КСВ от частоты, которая представлена на рисунке 8 (кривая 1), без использования дополнительных устройств согласования РТУ. Сопоставим зависимости функции КСВ малогабаритной планарной рамочной антенны, изготовленной с применением

композитного материала, разработанного ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» (далее – композитный материал) и нанесенной на FR-4 от частоты относительно друг друга на рисунке 9 (кривые 1 и 2 соответственно).

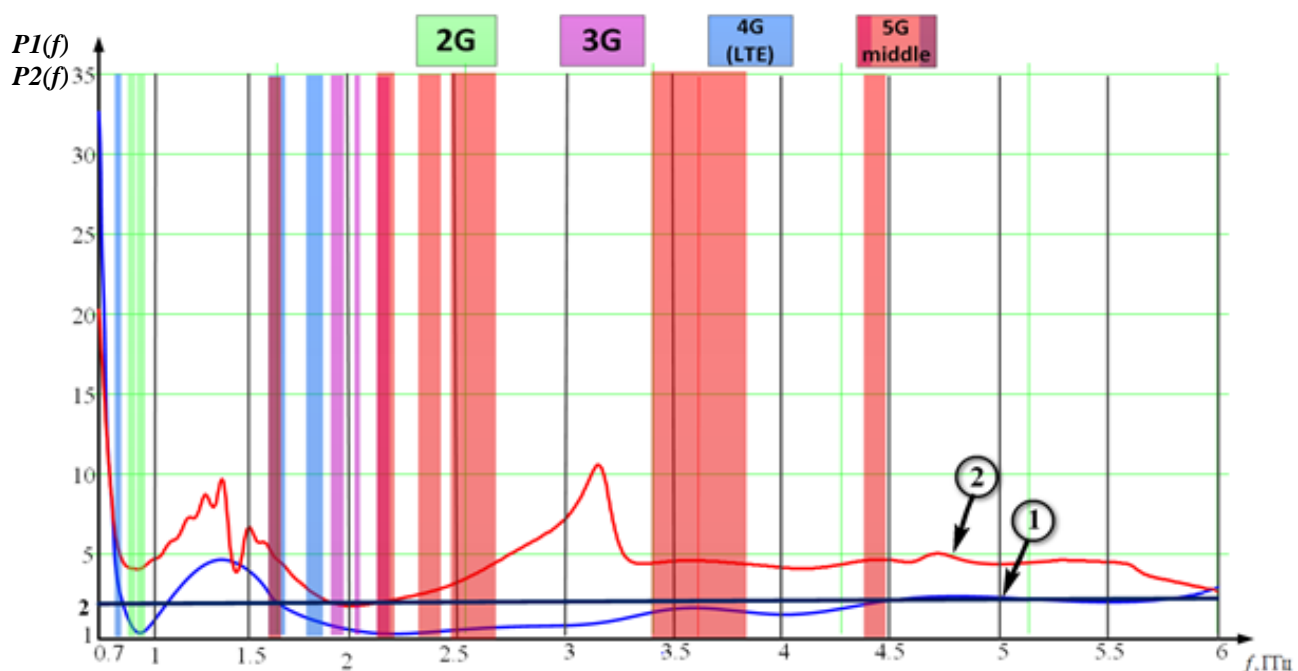


Рис. 8. Зависимость функции КСВ от частоты малогабаритной планарной рамочной антенны, нанесенной на композитный материал ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» (кривая 1) и нанесенной на FR-4 (кривая 2)

Различия приведенных зависимостей КСВ (рисунок 8) предлагается оценить, используя критерий [7, с. 36–38]:

$$K = \int_{f_1}^{f_2} \frac{|P_{1,2}(f) - P_{\text{эт}}(f)|}{f_2 - f_1} df, \quad (2)$$

где $P_{1,2}(f)$ – уровень КСВ антенны на FR-4 и на композитном материале соответственно, $P_{\text{эт}}(f) = 1$ – идеальный уровень КСВ антенны.

Использование данного критерия позволит оценить среднее отличие уровня КСВ антенны по отношению к эталонному значению во всем диапазоне частот и составляет для антенны, изготовленной на материале FR-4 $K_{FR-4} = 4.5$, а на композитном материале $K_{KM} = 1.7$. Сопоставив результаты зависимости функции КСВ малогабаритной планарной рамочной антенны нанесенной на композитный материал и нанесенной на FR-4 от частоты относительно друг друга (рисунок 8), можно сделать вывод о том, что использование композитного материала, вместо

FR-4, позволяет обеспечить лучшее значение КСВ в рассматриваемых диапазонах частот. Это свидетельствует о том, что потери уровня передачи мощности меньше относительно потерь в антенне с применением FR-4.

Целесообразным является оценить диаграммы направленности (ДН) на различных частотах антенны, реализованной с использованием композитного материала.

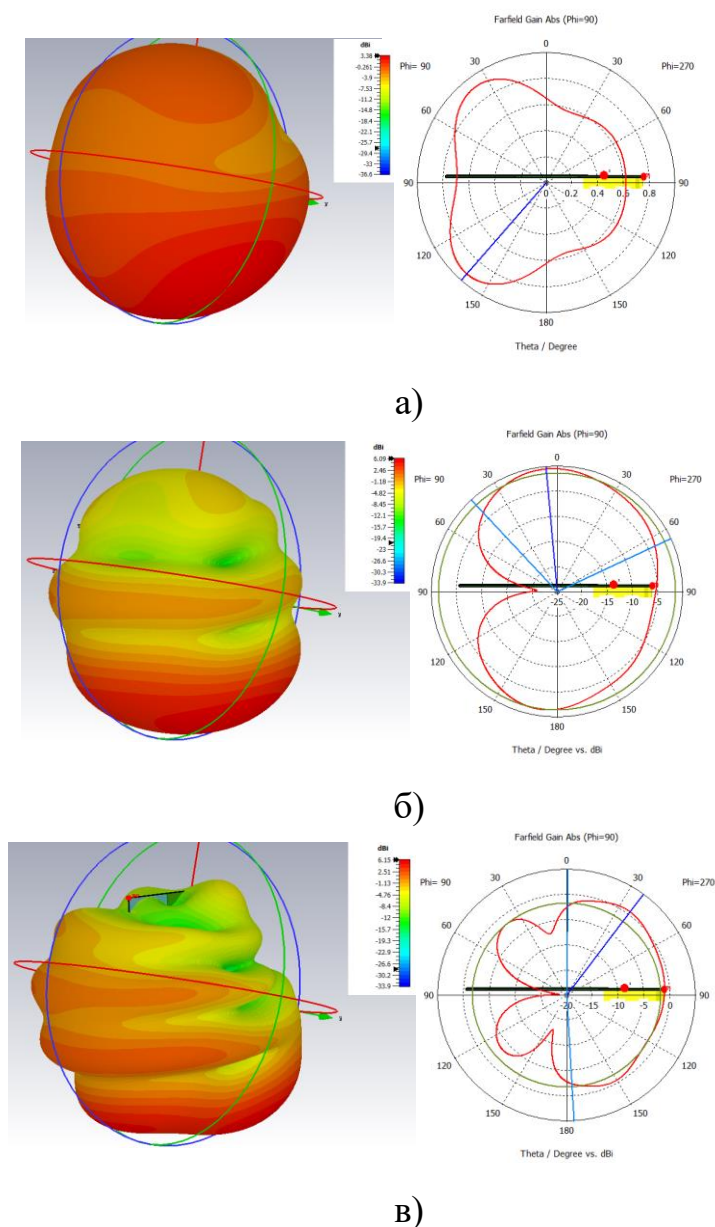


Рис. 9. Диаграмма направленности малогабаритной планарной рамочной антенны, нанесенной на композитный материал ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению» на 2 ГГц (а), 4 ГГц (б) и 6 ГГц (в)

Анализируя диаграммы направленности антенны, реализованной на композитном материале, можно сделать вывод о том, что ее возможно применять для работы в мобильных устройствах. Следует обратить особое внимание на то, что

антенна, представленная на рисунке 1, была рассчитана для материала FR-4 [2] и ее размеры являются оптимальными для данного материала. Но, несмотря на это, применение материала, изготовленного в ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», дает лучшие результаты в рамках исследований, приведенных в работе. Отдельно следует отметить, что все компоненты, используемые при синтезе композитов, не являются дорогостоящими, что открывает широкую перспективу их использования на практике с экономической точки зрения.

2. Оценка передачи мощности от ППМ к антенне в реальных условиях их эксплуатации

Микроволновые свойства большинства материалов находятся в сильной корреляционной зависимости от внешних воздействий, в частности от температуры, влажности, механических воздействий, изменение которых будет влиять на комплексное сопротивление РТУ. Непостоянство импедансных характеристик вышеупомянутых систем в различных условиях их эксплуатации с течением времени и всевозможных внутренних и внешних воздействиях на них, обуславливает высокую сложность решения общей проблемы, обозначенной выше. Следствием этого является то, что системы, которые не учитывают постоянное варьирование своих характеристик с течением времени, при различных внешних и внутренних воздействиях являются, по меньшей мере, неоптимальными при их эксплуатации в широком спектре естественных условий.

Одной из таких характеристик является комплексное сопротивление (импеданс) радиотехнического устройства, изменение величины которого приводит к рассогласованию нагрузки с выходным сопротивлением источника. Данная ситуация особо актуальна для радиотехнических систем, использующих широкополосные и сверхширокополосные сигналы.

Например, известно, что входной импеданс антенны сотового телефона чувствителен к присутствию близлежащих объектов и человеческого тела [8, с. 4]. Типичное изменение импеданса в результате удерживания PIFA антенны [8, с. 5] в руке (рисунок 10) может привести к потерям мощности до 25% [9].

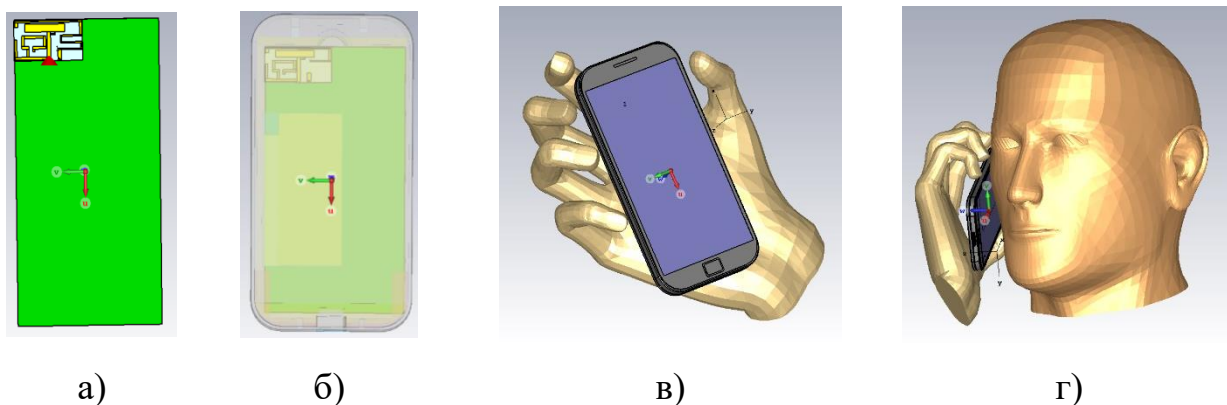


Рис. 10. Вид моделей антенны (а), в корпусе мобильного устройства (б), в руке (в), при размещении телефона у головы пользователя (г)

Интересной является оценка влияния изменения комплексного сопротивления антенны, нанесенной на подложку из композитного материала, на зависимость функции КСВ от частоты, вызванного возмущающими воздействиями и приводящего к отклонению импеданса нагрузки на $\pm 25\%$ от номинального значения. Моделирование произведем для широко используемых в настоящее время частотных диапазонов (3G и 4G, 5G).

На рисунке 11 представлены результаты влияния отклонения импеданса нагрузки на уровень КСВ, полученные в ходе моделирования в среде проектирования и моделирования РЧ/СВЧ компонентов, печатных плат и монолитных интегральных схем AWR Microwave Office [10], где сплошной линией (кривая 2) показаны усредненные результаты без отклонения импеданса антенны (рисунок 10 (а)), а штриховыми линиями с отклонениями импеданса нагрузки на $\pm 25\%$ от номинального значения (ситуации, иллюстрированные на рисунке 10 (б-г)).

Анализ усредненных зависимостей, представленных на рисунке 11, позволяет сделать вывод о том, что отклонение импеданса нагрузки на $\pm 25\%$ от номинального значения приводит к значительному увеличению уровня КСВ. Это уменьшает потенциальные возможности функционирования рассматриваемой антенны в реальных условиях ее эксплуатации.

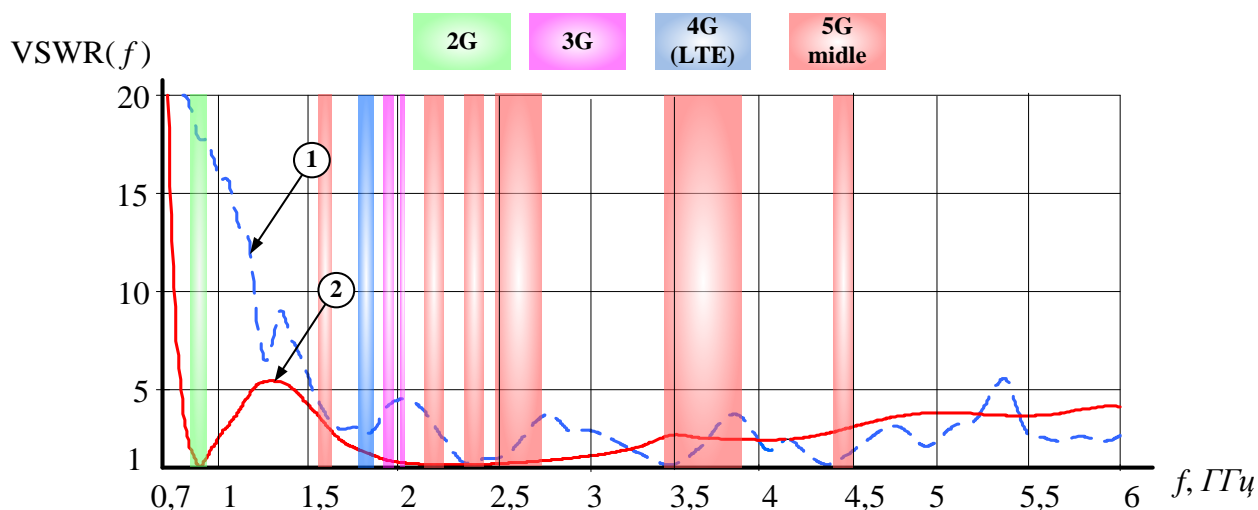


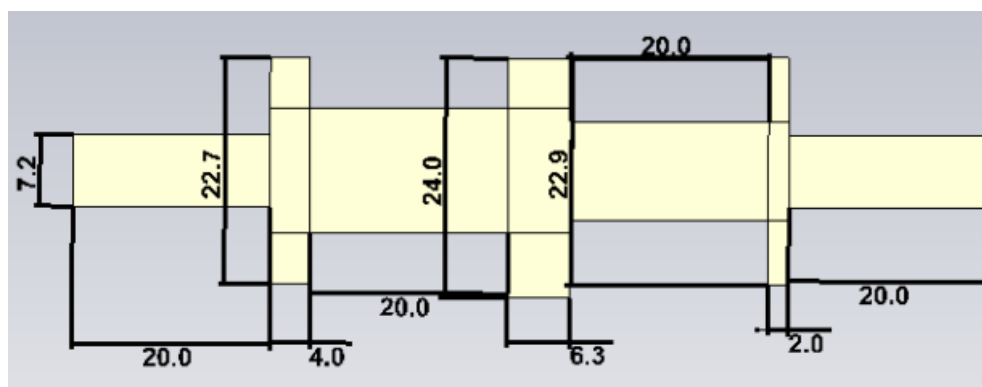
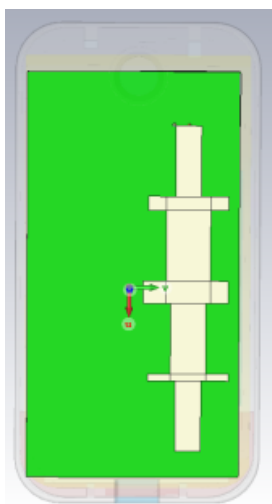
Рис. 11. Зависимость функции КСВ малогабаритной планарной антенны от частоты при отклонении импеданса нагрузки на $\pm 25\%$ от номинального значения (кривая 1), без отклонения (кривая 2)

Для решения данной проблемы с помощью разработанной методики [11, 12], в качестве примера, были синтезированы два вида широкополосных согласующих устройств, обеспечивающих уменьшение инварианта чувствительности. Схемы ШСУ, подключенных к антенне и помещенных в корпус мобильного устройства, с их физическими размерами (указано в миллиметрах) показаны на рисунке 12.

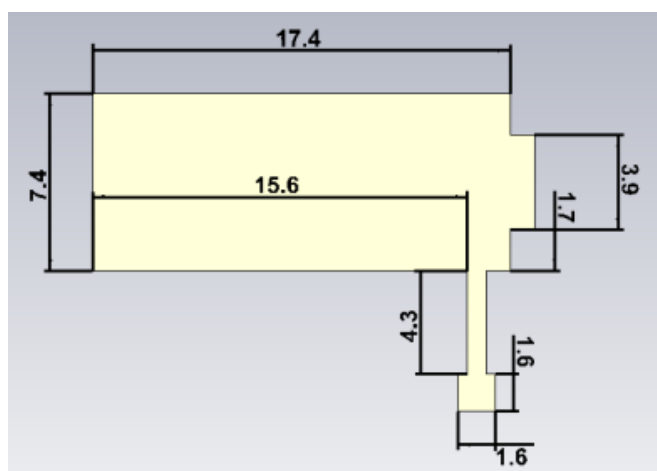
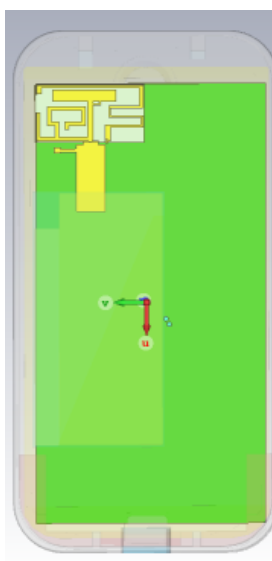
Результаты применения ШСУ в виде зависимости функции КСВ от частоты представлены на рисунке 13, где кривой 1 отображается зависимость функции КСВ антенны без согласования, а кривой 2 с применением согласующего устройства.

Используя выражение (2), произведем оценку уровня КСВ антенны в условиях возмущающих воздействий (рисунок 10, 11) с применением согласующего устройства и без него в интересующих нас диапазонах частот 0.83-0.96 ГГц и 1.7-4.5 ГГц (рисунок 1), для варианта (а) и (б) (рисунок 12). Усредненное, нормированное КСВ антенны с ШСУ, представленной на рисунке 12 (а) составляет $K_{ШСУ(a)} = 4.7$, а на рисунке 12 (б) составляет $K_{ШСУ(a)} = 8.8$. В свою очередь КСВ без согласования $K = 19.6$. Сопоставив результаты зависимости функции КСВ (рисунок 13), можно сделать вывод о том, что использование ШСУ позволяет обеспечить лучшие характеристики

радиотехнического тракта (значение КСВ для варианта ШСУ (а) в 4.2 раза, для варианта ШСУ (б) в 2.2 раза) в рассматриваемых диапазонах частот в широком спектре естественных условий эксплуатации радиотехнического устройства, также применение ШСЦ обеспечивает лучшую избирательность радиотехнического тракта

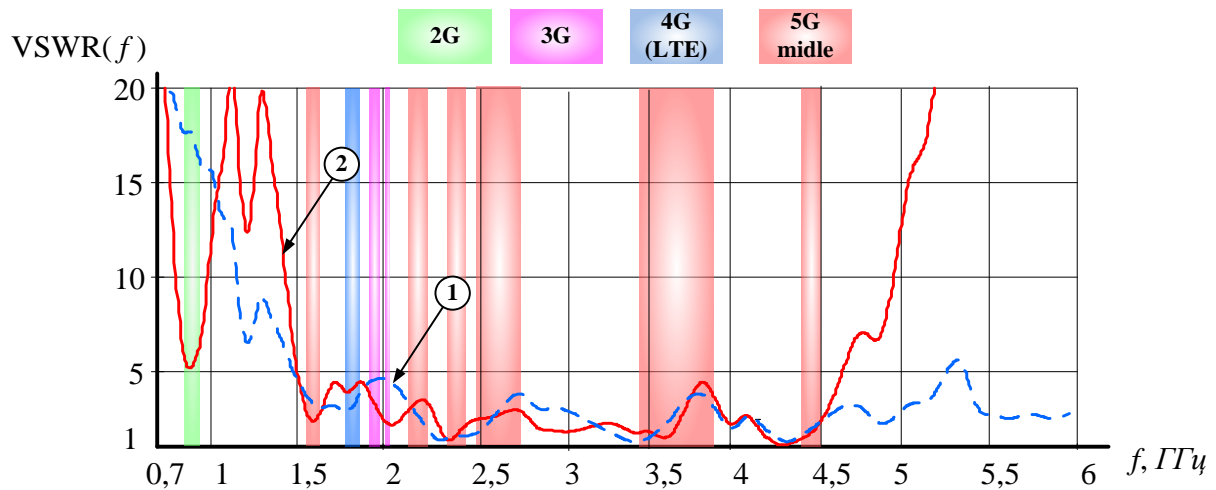


а)

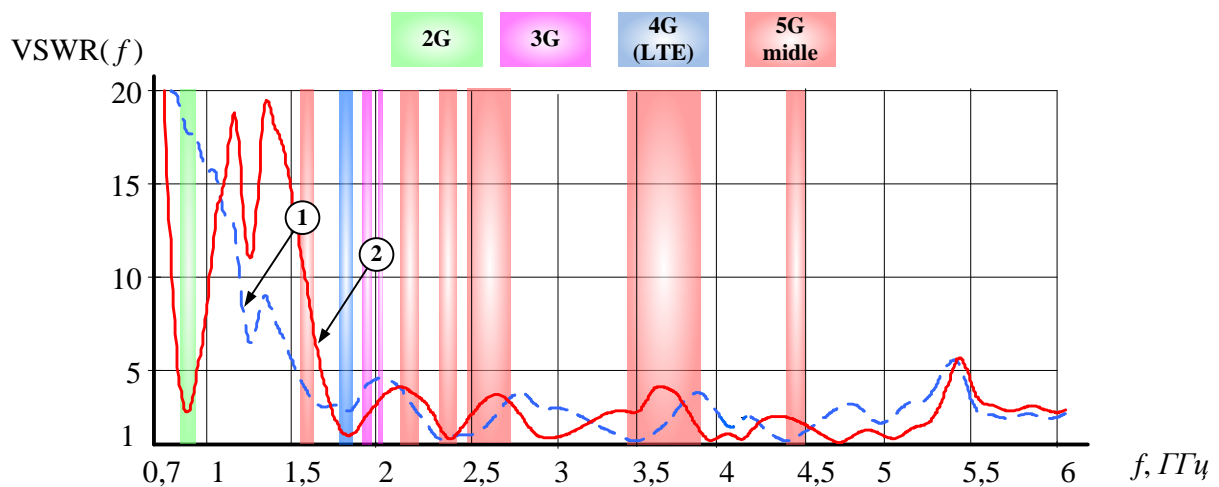


б)

Рис. 12. Электрические схемы ШСУ для малогабаритной планарной рамочной антенны (а) - на тыльной стороне подложки, (б) - со стороны антенны



а)



б)

а – зависимость для реализации ШСУ на рисунке 12 (а);

б – зависимость для реализации ШСУ на рисунке 12 (б).

Рис. 13. Зависимость функции КСВ от частоты кривая (1 – зависимость функции КСВ антенны без согласования, а кривой 2 с применением согласующего устройства)

Заключение

Применение композитного материала ФЭП/ $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, позволяет улучшить характеристики антенн в мобильных устройствах (в рамках проведенных исследований). Следует обратить особое внимание на то, что антенна, представленная на рисунке 2 была рассчитана для материала FR-4, и ее размеры являются оптимальными для данного материала. Однако, несмотря на это, применение разработанного композитного материала дает лучшие результаты в

рамках исследований, приведенных в работе. Отдельно следует отметить, что все компоненты, используемые при синтезе композитов, не являются дорогостоящими, что открывает широкую перспективу их использования на практике с экономической точки зрения.

При работе антенны в реальных условиях ее эксплуатации происходит изменение уровня КСВ в худшую сторону, для решения данной проблемы с использованием новых методик широкополосного согласования синтезированы ШСУ, подключение которых в радиотехнический тракт между ППМ и антенной позволяет обеспечить уменьшение влияния отклонения импеданса нагрузки и сохранить лучший уровень КСВ (в 4.2 и 2.2 раза) по отношению к радиотехническому тракту без согласования.

Автор для переписки: Бойкачев Павел Валерьевич, pashapasha.boi@mail.ru.

Финансирование.

Работа выполнена при (частичной) финансовой поддержке в рамках гранта Президента Республики Беларусь в направлении деятельности, имеющей приоритетное значение для развития Республики Беларусь, в науке, образовании, здравоохранении, культуре. В соответствии с указом Президента Республики Беларусь от 13 сентября №425.

Литература

1. Wang K., Zhou K., Luan X., Hu S., Zhou X., He S., Wang X., Zhou Sc., Chen X. NaTaO₃ microwave dielectric ceramic a with high relative permittivity and as an excellent compensator for the temperature coefficient of resonant frequency. *Ceram. Int.* 2021. V.47. №1. P.121.
2. Yitao S., Naomiao Z., Wang C. Small-size planar printed loop antenna for octa-band WWAN/LTE smartphone application *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series.* 2018. №1074.012090.
3. Курушин А.А., Пластиков А.Н. *Проектирование СВЧ-устройств в среде CST Microwave Studio.* Москва, МЭИ. 2011. 155 с.

4. Trukhanov A.V., Turchenko V.A., Kostishin V.G., Damay F., Porcher F., Lupu N., Bozzo B., Fina I., Polosan S., Silibin M.V., Salem M.M., Tishkevich D.I. The origin of the dual ferroic properties in quasi-centrosymmetrical SrFe_{12-x}In_xO₁₉ hexaferrites. *J. Alloys Compd.* 2021. V.886. P.161249.
5. Trukhanov S.V., Trukhanov A.V., Kostishyn V.G., Panina L.V., Trukhanov A.V., Turchenko V.A., Tishkevich D.I., Trukhanova E.L., Yakovenko O.S., Matzui L. *Dalton Trans.* 2017. V.46. №28. P.9010.
6. Исаев В.О., Бойкачев П.В. Способ нахождения адекватных математических моделей радиотехнических устройств с нестабильным импедансом. *Метрология и приборостроение.* 2021. №1. С.9.
7. Ланнэ А.А. *Оптимальный синтез линейных электрических цепей.* Москва, СВЯЗЬ. 1969. 292 с.
8. Jia-Shiang Fu. *Adaptive impedance matching circuits based on ferroelectric and semiconductor varactors.* University of Michigan. 2009. 93 с.
9. de Mingo J., Valdovinos A., Crespo A., Navarro D., Garc'ia P. An RF electronically controlled impedance tuning network design and its application to an antenna input impedance automatic matching system. *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.* 2004. V.52. №2. P.489-498.
10. *MWO Manual: NI AWR Design Environment v14 Edition.* El Segundo, CA. 2018. 166 p.
11. Дубовик И.А., Бойкачев П.В. Согласующая цепь для широкополосного антенного устройства радиостанции Р-180 на основе инварианта чувствительности функции коэффициента отражения. *Сборник научных трудов НИИ ВС.* 2020. №10. Т.2. С.111-120.
12. Дубовик И.А., Бойкачев П.В., Исаев В.О. Метод синтеза широкополосных устройств с оптимальной характеристикой коэффициента преобразования мощности, согласующих изменяющийся во времени импеданс нагрузки. *Журнал радиоэлектроники.* 2021. №5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.5.1>

Для цитирования:

П.В. Бойкачев, А.А. Сутько, А.А. Ержан, В.О. Исаев, И.А. Дубовик. Согласование малогабаритной планарной рамочной антенны, выполненной с использованием нового композитного материала, применительно для технологий 5G. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.2.7>