

## Результаты экспериментальных исследований магнитной проницаемости ферритов-шпинелей с предельной намагниченностью насыщения при создании фазовращателей<sup>1</sup>

ЧЕРНИКИН Д.В., НОВИКОВ А.В.

*Актуальность исследования определяется необходимостью создания проходного взаимного ферритового фазовращателя с магнитной памятью, работающего с волнами линейной поляризации в 8-миллиметровом диапазоне. Марка Li-Ti-Zn шпинели с предельной намагниченностью насыщения для сердечника и магнитопроводов фазовращателя, помимо основных параметров материала, выбирается в том числе и с учетом изменения составляющих тензора магнитной проницаемости ненасыщенных ферритов в Ka-диапазоне частот при слабых магнитных полях, установленных экспериментально. Определяется связь между составляющими тензора ферритового материала, измеренными в разных частотных диапазонах. Учитывая особенности работы рассматриваемого типа фазовращателя, предлагается методика определения составляющих тензора магнитной проницаемости в Ka-диапазоне по результатам их измерения в Ki-диапазоне. Правомерность алгоритма пересчета подтверждается результатами математического и физического моделирования фазовращателей.*

*Ключевые слова: ферритовый фазовращатель Ka-диапазона, принцип Реджиа–Спенсера, СВЧ волна с линейной поляризацией, составляющие тензора магнитной проницаемости феррита*

В системах бортовых фазированных антенных решеток (ФАР), работающих с волнами линейной поляризации, используются ферритовые фазовращатели (ФВ) Реджиа–Спенсера [1]. При их создании в различных частотных диапазонах используются Li-Ti-Zn шпинели. В зависимости от заданной полосы рабочих частот ФВ, расположенной в С, X или Ku-диапазонах, выбирается марка феррита с необходимой намагниченностью насыщения  $4\mu M_s$  из соотношения [2]:

$$\frac{\omega_{\text{ЕФМР}}}{\omega} = \frac{g' (H_a + 4\mu M_s)}{\omega} < 1,$$

где  $\omega_{\text{ЕФМР}}$  – частота естественного ферромагнитного резонанса (ЕФМР);  $g'$  – гиромагнитное отношение;  $H_a$  – внутреннее поле анизотропии.

С целью получения максимальной управляемой фазы  $j$  нижняя частота рабочего диапазона ФВ должна находиться в непосредственной близости к  $\omega_{\text{ЕФМР}}$ . В Ka-диапазоне такая возможность отсутствует, поскольку предельно достижимая намагниченность насыщения ферритов со структурой шпинели, определяющая крайний частотный диапазон их применения, не превосходит  $4\mu M_s \approx 5000$  Гс [3].

Поскольку имеющиеся ферриты обладают недостаточной намагниченностью насыщения и ЕФМР ниже на 2,5 октавы относительно рабочей

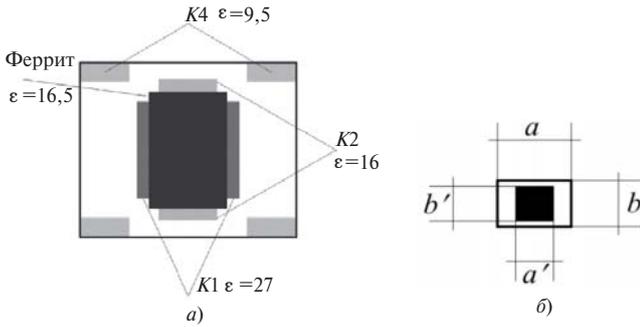
полосы частот ФВ в Ka-диапазоне, становится актуальной априорная информация о поведении компонент тензора ферритового материала сердечника как при изменении поля подмагничивания, так и при изменении частотного диапазона.

Другая трудность при создании ФВ в Ka-диапазоне такова, что при использовании метода масштабирования (подобия) для расчета размеров деталей сложного феррито-керамического заполнения, используемого в фазозадающей части ФВ Реджиа–Спенсера X-диапазона частот [4], керамические детали  $K1$ ,  $K2$  и  $K4$  имеют ничтожно малые размеры (рис. 1,а), которые практически невозможно реализовать.

К тому же подобный подход не учитывает влияния немагнитных зазоров и связанных с ними размагничивающих факторов, способствующих дополнительному сбросу набранной за время управления фазы в ФВ Ka-диапазона. Поэтому функциональные назначения и размеры неоднородностей  $K1$ ,  $K2$  и  $K4$  в регулярной части ФВ X-диапазона (рис. 1,а) должны быть интегрированы и учтены в габаритных размерах единственной ферритовой неоднородности регулярной части ФВ Ka-диапазона (рис. 1,б).

Для этого становится недостаточно известных требований к параметрам литиевых шпинелей ( $B_m$  – максимальная индукция насыщения;  $B_r$  – остаточная индукция;  $H_c$  – коэрцитивная сила;  $e$  – ди-

<sup>1</sup> Статья подготовлена по материалам доклада, сделанного авторами на XV Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» в сентябре 2014 г.



**Рис. 1.** Поперечные сечения регулярной части ФВ, работающих по принципу Реджиа–Спенсера, для различных частотных диапазонов: *a* – X-диапазон; *K1*, *K2*, *K4* – керамические пластины с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ ; *b* – Ka-диапазон; *a'* *b'* – сечение запердельного волновода; *a'c'* *b'c'* – сечение ферритового сердечника с  $\epsilon = 15$

электрическая проницаемость;  $\text{tg}d_e$  – тангенс угла диэлектрических потерь;  $K_{\Pi}$  – коэффициент прямоугольности петли гистерезиса;  $K_{\text{KB}}$  – коэффициент квадратности петли гистерезиса и др.), используемых при создании ФВ, работающих по принципу Реджиа–Спенсера и сформулированных в результате анализа имеющихся паспортных данных нормализованных ферритов [5]. Необходимые требования к ферриту, обладающему предельной намагниченностью насыщения, при прочих одинаковых паспортных параметрах формулируются с учетом задания диапазона изменения компонент тензора при всех условиях эксплуатации ФВ, так как именно они, в конечном счете, и обеспечивают необходимые характеристики всего устройства.

Эта задача решается на этапе математического моделирования с помощью интегрированного программного комплекса (ИПК) «LambdaMDS» [6]. При использовании ИПК в электродинамических расчетах имеется возможность непосредственного учета изменения компонент тензора феррита в зависимости от приложенного магнитного поля на заданной частоте по экспериментальным точкам.

Сложностью разработки ФВ, работающего по принципу Реджиа–Спенсера в 8-миллиметровом диапазоне длин волн, объясняется необходимость использования полученных экспериментальным путем зависимостей компонент тензора от приложенного магнитного поля для одной и той же партии феррита как на этапе математического, так и физического моделирования ФВ. Это повышает достоверность полученных результатов, поскольку аппроксимация параметров петли гистерезиса феррита через его паспортные данные «внутри» известных пакетов программ приводит к неоднозначности в косвенных расчетах дисперсии компонент тензора для Ka-диапазона частот.

В общем виде максимальное значение управляемого фазового сдвига  $j_{\text{max}}$  связано с продоль-

ным размером фазорегулирующей секции ФВ соотношением [7]:

$$j_{\text{max}} = l' (\Gamma(H_{\text{max}}) - \Gamma(H_0)),$$

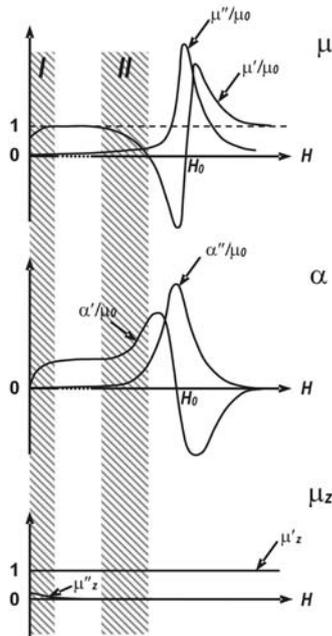
где  $\Gamma(H_{\text{max}})$  и  $\Gamma(H_0)$  – постоянные распространения волн при намагниченном и размагниченном состояниях феррита;  $l'$  – длина ферритового сердечника.

При этом постоянная распространения основного типа волны, помимо приложенного поля, зависит от размеров ферритового сердечника и изменения компонент тензора ферритового материала. Известно, что в ФВ, работающих по принципу Реджиа–Спенсера, изменение постоянной распространения, определяющее  $j_{\text{max}}$ , зависит одновременно от изменения как диагональной  $Dm_{\text{z}}$  так и недиагональной  $Da_{\text{z}}$  компонент тензора магнитной проницаемости феррита при изменении подмагничивающего феррит поля.

Феррит, намагниченный постоянным полем, для переменного электромагнитного поля обладает тензором магнитной проницаемости вида [8]:

$$\hat{\mu} = \begin{pmatrix} m - ja & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m_z \end{pmatrix}$$

где  $m$ ,  $m_z$  – комплексные величины, мнимые части которых характеризуют различные виды магнитных потерь. В отсутствие подмагничивающего поля феррит изотропен; тогда  $a = 0$ ,  $m = m_0$  и  $m_z = 1$ . На рис. 2 показано изменение вещественных ( $m'$ ,  $a'$ ,  $m'_z$ ) и мнимых ( $m''$ ,  $a''$ ,  $m''_z$ ) частей компонент тензора магнитной проницаемости феррита в зависимости от значения подмагничивающего поля [8].



**Рис. 2.** Зависимости вещественных и мнимых частей компонент тензора магнитной проницаемости феррита от поля подмагничивания

Для реализации ФВ, работающего по принципу Реджиа–Спенсера, теоретически подходят два штриховых участка на кривых (рис. 2) по оси изменения поля подмагничивания. Оба они находятся ниже магнитного резонанса (область полей 800 Э и выше). Область I лежит в слабых магнитных полях (от 0 до 20 Э) и характеризуется одновременным ростом  $\mu'$  и  $\alpha'$ . Область II находится в непосредственной близости к магнитному резонансу (от 600 до 700 Э); здесь изменения  $D\mu'$  и  $Da\alpha'$  имеют противоположные знаки.

Изменение компонент в сильных полях, близких к магнитному резонансу, используют при создании ФВ на пониженном сечении [9]. В такой конструкции регулярной части при уменьшении высоты ферритового сердечника  $b\phi$  (рис. 1, б) постоянная распространения основного типа волны квази  $H_{10}$  сначала уменьшается, затем ее падение прекращается. При дальнейшем уменьшении высоты феррита постоянная распространения меняет свой знак и происходит ее обратный рост. При этом фазовый сдвиг возрастает и приобретает противоположный знак.

В области II изменение компонент тензора  $D\mu'$  и  $Da\alpha'$  значительнее, чем в области I, близкой к ЕФМР (частотному резонансу). Это потенциально позволяет получать более высокие значения фазовых сдвигов в существенно более широкой полосе частот. Однако следует учесть, что эта область находится в непосредственной близости к магнитному резонансу ферритового материала и рост фазы сопровождается увеличением потерь в ФВ. Поэтому при использовании этого рабочего участка необходимо задавать дополнительные требования к ферриту, касающиеся как ширины резонансной кривой, так и крутизны ее склона по восходящей ветви. Кроме того, энергопотребление такого ФВ будет существенным, поскольку поле подмагничивания возрастает почти на два порядка.

С практической точки зрения для создания ФВ бортовых ФАР приемлемым считается первый вариант использования изменения компонент тензора в слабых магнитных полях – штриховая область I на рис. 2.

На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости диагональной  $\mu'$  и недиагональной  $\alpha'$  компонент тензора литиевых шпинелей, используемых для сердечника и магнитопроводов серийных ФВ в различных частях X-диапазона частот. Результаты получены резонаторным методом с использованием ферритовых образцов в виде стержней [10]. Видно, что феррит 3С423 обладает наибольшими значениями  $Da\alpha'$  и  $D\mu'$  при изменении поля от 0 до 10 Э.

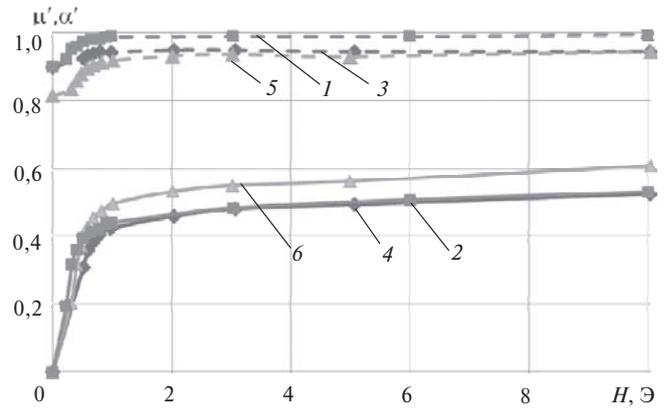


Рис. 3. Вещественные части  $\mu'$  (MU) и  $\alpha'$  (ALFA) компонент тензора ферритов 3С418 (кривые 1 и 2), 3С419 (3 и 4) и 3С423 (5 и 6), измеренные на стержнях квадратного сечения со стороной  $d = 1$  мм в резонаторе  $H_{110}$  круглого сечения (собственная частота резонатора  $f_0 = 9355$  МГц)

На рис. 4 показаны аналогичные зависимости этих же марок ферритов в Ku-диапазоне. Видно, что при увеличении частоты от значения ЕФМР происходит существенное уменьшение  $Da\alpha'$  и  $D\mu'$  ( $\mu' \gg 1$ ).

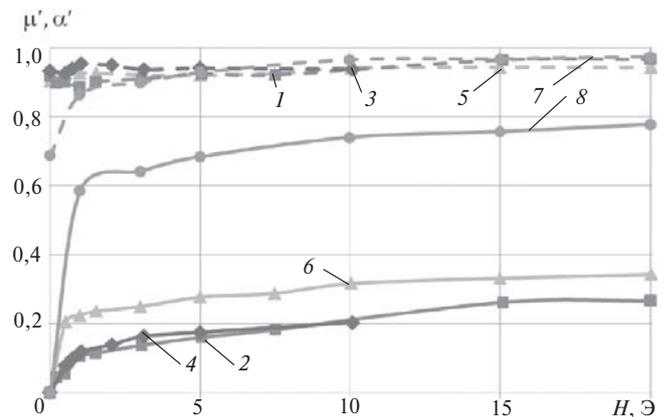


Рис. 4. Вещественные части  $\mu'$  (MU) и  $\alpha'$  (ALFA) компонент тензора ферритов 3С418 (кривые 1 и 2), 3С419 (3 и 4), 3С423 (5 и 6) и 1С412 (7 и 8), измеренные на стержнях квадратного сечения со стороной  $d = 0,5$  мм в резонаторе  $E_{111}$  круглого сечения ( $f_0 = 14917$  МГц)

Поэтому для разработки ФВ в Ku-диапазоне целесообразно использовать ферриты с большей намагниченностью насыщения, обладающие частотным резонансом в непосредственной близости от рабочей полосы, в частности 1С412 (рис. 4).

С целью получения наибольшего значения  $j_{\max}$  при создании ФВ в 8-мм диапазоне длин волн помимо нормализованного 1С412 были изготовлены и экспериментальные ферриты, обладающие предельной намагниченностью насыщения, параметры которых представлены в табл. 1.

Полученные авторами зависимости компонент тензора ферритов из табл. 1 в двухсантиметровом (2-см) диапазоне длин волн с целью определения материалов с наибольшим изменением компонент

Таблица 1 ценными зависимостями в Ку-диапазоне

Марка	Параметр						
	$B_m$ , Гс	$B_r$ , Гс	$H_c$ , Э	$e$	$\text{tg}d_e$	$K_{\Pi}$	$K_{\text{КВ}}$
1СЧ170-5	3420	3150	1,25	14,5	$4 \cdot 10^{-4}$	0,92	—
1СЧ340	3450	3165	1,14	15,0	$2,5 \cdot 10^{-4}$	0,92	—
1СЧ170-7	3658	3330	1,41	15,0	$3 \cdot 10^{-4}$	0,91	0,60
1СЧ380	3202	2795	1,00	15,0	$3 \cdot 10^{-4}$	0,87	0,54
1СЧ170-6	3620	3260	1,16	14,7	$3 \cdot 10^{-4}$	0,90	—
1СЧ12	—	3140	1,12	15,4	$3,4 \cdot 10^{-4}$	—	—

тензора от поля подмагничивания при схожих остальных параметрах показали, что материалы из группы «170», как и нормализованный феррит 1СЧ12, обладают наибольшими изменениями  $\text{Da}\phi$  и  $\text{Dm}\phi$

Сравнение в разных частотных диапазонах значений компонент тензора, измеренных в непосредственной близости к ЕФМР, позволяет утверждать, что с ростом частоты вещественная часть недиагональной компоненты  $a\phi$  растёт, поскольку с уменьшением  $I_0$  используется материал с более высокой намагниченностью насыщения.

В силу известных технологических ограничений при разработке ФВ в 8-мм диапазоне можно использовать ферриты, представленные в табл. 1, в 2-см диапазоне. Материалы этой группы имеют намагниченность насыщения, близкую к максимально возможной, и удовлетворяют требованиям для создания ФВ, работающих по принципу Реджиа–Спенсера в Ку-диапазоне.

Использование резонаторного метода для получения зависимостей компонент тензора феррита от поля при переходе в 8-мм диапазон длин волн даже при наличии современной контрольно-измерительной аппаратуры сопряжено с рядом сложностей:

в практической реализации высокочастотных измерительных резонаторов типов волн  $E_{111}$  ( $H_{110}$ ) для 8-мм диапазона;

в изготовлении ферритовых образцов необходимых размеров для проведения измерений в 8-мм диапазоне с использованием резонаторного метода;

в появлении значительной погрешности измерений, связанной как с принципиальным уменьшением абсолютных значений  $\text{Da}\phi$  и  $\text{Dm}\phi$  ферритов при переходе в миллиметровый диапазон длин волн, так и обусловленной первыми двумя обстоятельствами.

При переходе в 8-мм диапазон значения  $\text{Da}\phi$  и  $\text{Dm}\phi$  для этих материалов в слабых полях подмагничивания будут уменьшаться по сравнению с полу-

частот, поскольку рабочий диапазон частот ФВ находится значительно выше по частоте. Очевидно, выбирая максимально «активный» феррит по критерию максимальных значений  $\text{Da}\phi$  и  $\text{Dm}\phi$  в Ку-диапазоне, получаем максимально возможную, хотя и меньшую, «активность» и при работе этого материала в Ка-диапазоне частот.

Следует отметить, что обеспечить необходимое значение  $j_{\text{max}}$  увеличением длины ферритового сердечника ФВ Реджиа–Спенсера не всегда возможно, поскольку это приводит к уменьшению рабочей полосы частот. Дело в том, что

этим ФВ свойственно наличие резонансов потерь распространяющихся в регулярной части квази волн, причем расстояние между резонансами на амплитудно-частотной характеристике обратно пропорционально длине ФВ. Поэтому актуальной является разработка математической модели ферритового ФВ для этого диапазона.

Модель является инструментом, позволяющим получить расчетным путем наибольшее приращение постоянной распространения, рассчитанной для регулярной части сердечника единичной длины в заданной частотной точке в зависимости от геометрических размеров запердельного волновода, сердечника и параметров феррита. Достоверность результатов при использовании математической модели повышается, когда в электродинамических расчетах непосредственно используются данные о зависимости компонент тензора магнитной проницаемости феррита от подмагничивающего поля в Ка-диапазоне. Иными словами, для математического моделирования необходимо получить абсолютные значения изменения компонент тензора от поля подмагничивания непосредственно в Ка-диапазоне, располагая имеющимися экспериментальными данными в Ку-диапазоне частот.

Для понимания такой возможности представляет интерес проследить зависимость изменения компонент тензора при переходе из Х-диапазона в Ку-диапазон частот. На рис. 5 представлены зависимости компонент тензора  $m\phi = m\phi(H)$  и  $a\phi = a\phi(H)$  для феррита 3СЧ19 на двух частотах разных диапазонов.

При изменении поля подмагничивания от 0 до 10 Э, когда наступает состояние насыщения, ферритовый материал обладает следующими значениями компонент тензора:

$f_0$ , МГц	$\text{Da}\phi$	$\text{Dm}\phi = m_{\text{max}} - m\phi$
9355	0,5225	$0,9424 - 0,8967 = 0,0457$
14918	0,2033	$0,9544 - 0,9343 = 0,0201$

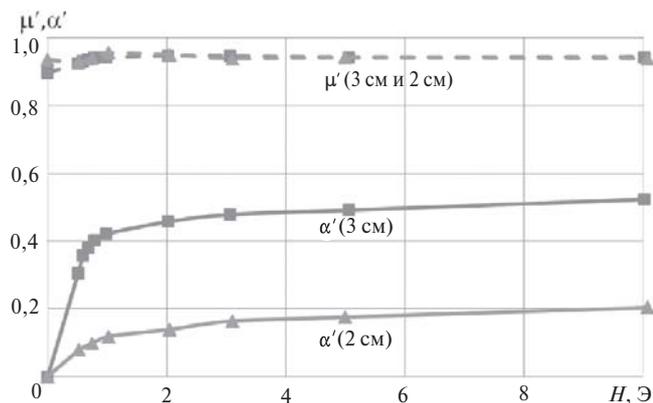


Рис. 5. Вещественные части  $\mu'$  (MU) и  $\alpha'$  (ALFA) компонент тензора феррита 3СЧ19, измеренные в резонаторах круглого сечения  $H_{110}$  ( $f_0 = 9355$  МГц – 3 см) и  $E_{111}$  ( $f_0 = 14917$  МГц – 2 см)

Измерения выполнялись резонаторным методом на стержнях из феррита 3СЧ19 ( $\epsilon = 16,2 + j0,0057$ ) квадратного сечения со стороной 1 мм и 0,5 мм соответственно. Значение  $K_a = 2,5701$  и  $K_m = 2,2736$  – коэффициенты пересчета изменения недиагональной и диагональной компонент тензора из X- в Ку-диапазон. Получив экспериментально зависимости компонент тензора ферритов в X-диапазоне (рис.3), можно определить, на сколько изменятся их значения при использовании этого материала в Ку-диапазоне без дополнительных измерений, результаты которых представлены на рис. 4.

Вводя аналогичные коэффициенты и используя экспериментальные данные зависимостей компонент тензора магнитной проницаемости ферритов, полученные экспериментально в Ку-диапазоне, можно пересчитать компоненты для использования в математической модели ФВ Ка-диапазона.

С другой стороны, в первом приближении для инженерных расчетов можно определить подобный коэффициент, используя отношение длин волн в волноводе стандартных сечений на заданных частотах. В качестве примера рассмотрим использование феррита 1СЧ-170-5 в реальных макетах ФВ в Ку- и Ка-частотных диапазонах. Расчетным путем для ФВ Ку-диапазона определим структуру заполнения регулярной части (рис. 1,б), аналогичную ФВ Ка-диапазона, с одной ферритовой областью:

значение частоты $f_0$ , ГГц	13,7	34,0
сечение регулярной части, мм <sup>2</sup>	7,3' 5,8	2,9' 2,4
сечение сердечника, мм <sup>2</sup>	3,75' 3,90	1,51' 1,54

Длина волны в волноводах стандартных сечений 16 мм' 8 мм и 7,2 мм' 3,4 мм через длину волн в свободном пространстве  $l_0$  составляет, соответственно, 28,8714 и 11,1652 мм, откуда коэффициент пересчета  $K_1 = 2,5858$ . Расчетным путем (табл. 2) определены изменения постоянных рас-

пространения в размагниченном и намагниченном состояниях в трех частотных точках диапазона (нижней  $f_H$ , средней  $f_0$  и верхней  $f_B$ ) для ФВ из одного и того же материала сердечника 1СЧ-170-5 с идентичной структурой заполнения.

Таблица 2

Частотные точки диапазона	Приращение постоянной распространения ДГ, рад/мм	
	Ка-диапазон	Ку-диапазон
$f_H$	0,4235	0,4316
$f_0$	0,4364	0,4380
$f_B$	0,4480	0,4439

На основании данных табл. 2 при длине сердечника около 30 мм для обоих ФВ из разных частотных диапазонов получаем примерно одинаковое значение максимального фазового сдвига  $j_{\max} \gg 740^\circ$  в их рабочей полосе частот без учета «сбрасываемой» фазы. Этот результат подтвержден экспериментально. Использование в Ка-диапазоне такой же длины ферритового сердечника, как и в Ку-диапазоне частот, объясняется недостаточным для миллиметрового диапазона значением намагниченности насыщения материала сердечника.

**Выводы.** 1. При проектировании ФВ, работающих по принципу Реджиа-Спенсера в 8-мм диапазоне длин волн, необходимо учитывать частотные и магнитные зависимости диагональных и недиагональных компонент тензора магнитной проницаемости материалов, используемых в ферритовых сердечниках.

2. Экспериментально установлено, что наибольшим изменением компонент тензора магнитной проницаемости ферритового сердечника при изменении поля подмагничивания от размагниченного до намагниченного состояния в Ка-диапазоне обладают ферриты с максимальным изменением  $D\mu'$  и  $Da\alpha'$  и в Ку-диапазоне частот.

3. Изменение мнимых частей  $D\mu''$  и  $Da\alpha''$ , определяющих потери в феррите, практически не влияет на уровень СВЧ потерь в ФВ, которые определяются в основном его конструкцией.

4. Существует связь между компонентами тензора ферритового материала, измеренными в разных частотных диапазонах. Поэтому ввиду сложности получения компонент тензора феррита при анализе работы ФВ в Ка-диапазоне необходимые данные для проведения эскизных расчетов можно получить экспериментально для соответствующих компонент этого же материала в Ку-диапазоне частот с последующим пересчетом. Правомерность та-

кого подхода подтверждена расчетом и экспериментом.

5. Достоверность результатов, полученных на основе экспериментальных данных компонентов тензора конкретной партии феррита, выше, чем полученные эмпирически в [11] выражения для комплексных компонент тензора магнитной проницаемости ненасыщенных ферритов по их паспортным данным.

6. Окончательно марка феррита для использования в ФВ может быть выбрана на основании анализа полученных экспериментально фазовременных характеристик и значения СВЧ потерь в диапазонах рабочих частот и температур на макетах ФВ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Синани А.И.** Состояние и перспективы развития теории и техники антенных систем с электронным управлением лучом. — В кн.: Радиолокационные системы специального и гражданского назначения. 2012–2014/Под ред. Ю.И. Белого. — М.: Радиотехника, 2013, с. 21–42.
2. **Argentina G.M., Baba P.D.** Microwave Lithium Ferrites: An Overview. — IEEE Transactionson Microwave Theory and Techniques, 1974, vol. MTT-22, No. 6, pp. 652–658.
3. **Сафантиевский А.П.** Пути создания параметрических рядов поликристаллических СВЧ феррошпинелей. Ферритовые СВЧ приборы и материалы. — Тезисы докладов X Всесоюзной научно-технической конференции по сверхвысокочастотной ферритовой технике, 1978, т. II, с. 51–53.
4. **Патент на изобретение №2207666 (РФ).** Сверхвысокочастотный фазовращатель/ Е.И. Старшинова, 2002.

*Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 8, pp. 38–44.*

## Results from Experimental Investigations of the Magnetic Permeability of Spinel Ferrites with the Limiting Saturation Magnetization in Developing Phase Shifters

D.V. CHERNIKIN and A.V. NOVIKOV

*The importance of studying this problem isstemming from the need to develop a transmission mutual ferrite phase shifter with magnetic memory operating with linear polarization waves in the 8-mm band. The type of Li-Ti-Zn spinel with the limiting saturation magnetization fort h ephase shifte rcore and magnetic circuitsis selected, apart from considering the main parameters of material, also taking into account variation of the magnetic permeability tensor components of nonsaturated ferrites in the Ka frequency band in weak magnetic fields, which are determined experimentally. Interrelation between the ferrite material tensor components measured in different frequency bands is determined .With dueregard to the specific featur espertinent to operation of theconsidered type of phase shifter, a procedure is proposed for determining the magnetic permeability tensor components in the Ka band based on the results of their measurements in the Ku band.The validity of the recalculation algorithm is confirmed by the results obtained from mathematical modeling of phase shifters.*

*Key words: ferrite phase shifter in the Ka band, Reggia–Spenser principle, linearly polarized microwave, ferrite magnetic permeability tensor components*

#### REFERENCES

1. **Sinani A.I.** *Sbornik «Radiolokatsionnye sistemy spetsial'nogo i grazhdanskogo naznacheniya (2012–2014)» – in Puss./Pod red. Yu.I. Belogo (Collection «The radar systems of special and civil purposes*

5. **Старшинова Е.И., Черникин Д.В.** Дополнительные требования к ферритовым материалам при совершенствовании фазовращателей типа Реджиа–Спенсера. — Электричество, 2011, № 3, с. 57–61.

6. **Батов П.Л., Доброжанская О.Л., Феоктистов В.Г.** Система математического моделирования и проектирования СВЧ-устройств и ФАР — «LambdaMDS». — Антенны, 2008, № 5, с. 49–57.

7. **Устройства СВЧ и антенны.** Проектирование фазированных антенных решеток: Учебное пособие для вузов/Под ред. Д.И. Воскресенского. — М.: Радиотехника, 2012, 744 с.

8. **Никольский В.В.** Теория электромагнитного поля. — М.: Высшая школа, 1964, 384 с.

9. **Патент США № 3654574.** Buck D. Reciprocal phase shifter exhibiting negative phase shift, 1972.

10. **Никольский В.В.** Измерение параметров ферритов на сверхвысоких частотах, ч. I. — Радиотехника и электроника, 1956, т. 1, вып. 4, с. 447–468.

11. **Покусин Д.Н., Залесский М.Ю.** Уточнение формулы для компонентов тензора магнитной проницаемости ненасыщенных ферритов. Ферритовые СВЧ приборы и материалы. — Тезисы докладов X Всесоюзной научно-технической конференции по сверхвысокочастотной ферритовой технике, 1978, т. II, с. 113–116.

[11.12.14]

*Авторы: Черникин Дмитрий Владимирович окончил Московский энергетический институт в 1988 г. Инженер ОАО «Научно-исследовательский институт приборостроения им. В.В. Тихомирова».*

*Новиков Александр Валерьевич окончил Московский институт стали и сплавов в 1983 г. Заместитель начальника цеха по производству ферритов ОАО «Конструкторское бюро–1».*

(2012–2014)». Edit. by Yu. I. Belov). Moscow, Publ. Radiotekhnika, 2013, pp. 21–42.

2. **Argentina G.M., Baba P.D.** Microwave Lithium Ferrites: An Overview. — IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1974, vol. MTT-22, No. 6, pp. 652–658.

3. **Safant'yevskii A.P.** *Tezisy dokladov X Vsesoyuznoi nauchno-tekhnicheskoi konf. «Ferritovye sverkhvysokochastotnye pribory i materialy»* – in Russ. (Proc. of X All-Union Scientific and Technical Conf. «Ferrite ultra-high frequency instruments and materials»), 1978, vol. II, pp. 51–53.
4. **Patent naizobreteniy RF No. 2207666.** *Sverkhvysokochastotnyi fazovrashchatel' (Patent for invention RF No. 2207666. Ultra-high frequency phase-shifter)*/E. I. Starshinova, 2002.
5. **Starshinova E.I., Chernikin D.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2011, No. 3, pp. 57–61.
6. **Batov P.I., Dobrozhanskaya O.L., Feoktistov V.G.** *Antenny – in Russ. (Antenns)*, 2008, No. 5, pp. 49–57.
7. **Ustroistva SVCh i anteny. Proektirovaniye fazirovannykh antennykh reshetok/Pod red. D.I. Voskresenskogo** (Ultra-high frequency and antenns. Design phased arrays)/ Edit. By D.I. Voskresenskii). Moscow, Publ. Radiotekhnika, 2012, 744 p.
8. **Nicol'skii V.V.** *Teoriya elektromagnitnogo polya (Theory of electromagnetic field)*. Moscow, Publ. Vysshayashkola, 1964, 384 p.
9. **Patent USA No. 3654576.** Reciprocal phase shifter exhibiting negative phase shift, 1972.
10. **Nicol'skii V.V.** *Sbornik «Radiotekhnika i elektronika» – in Russ. (Collection «Radioelectronics and electronics)*, 1956, vol. 1, iss. 4, pp. 447–468.
11. **Pokusin D.N., Zalesskii M. Yu.** *Tezisy dokladov X Vsesoyuznoi nauchno-tekhnicheskoi konf. «Ferritovye sverkhvysokochastotnye pribory i materialy»* – in Russ. (Proc. of X All-Union Scientific and Technical Conf. «Ferrite Ultra-high frequency instruments and materials»), 1978, vol. II, pp. 113–116.

*Authors: Chernikin Dmitrii Vladimirovich (Zhukovskii, Moscow region, Russia) – Engineer of JSC «V.V. Tekhomirov Research Institute of Instrument Design».*

*Novikov Aleksandr Valer'yevich (Moscow, Russia) – Deputy Head of the Shop, JSC «Design Department-1».*