

\* \* \*

## Дополнительные требования к ферритовым материалам при совершенствовании фазовращателей типа Реджиа—Спенсера

СТАРШИНОВА Е.И., ЧЕРНИКИН Д.В.

*Разработка бортовых фазированных антенных решеток (ФАР) в значительной степени была достигнута благодаря созданию миниатюрных, взаимных, быстродействующих ферритовых фазовращателей (ФВ) типа Реджиа—Спенсера. Показаны требования к ферритам для ФВ, обладающим свойствами, необходимыми для создания высокочастотных ФВ с расширенной полосой рабочих частот и увеличенным уровнем пропускаемой мощности для всех условий эксплуатации.*

**Ключевые слова:** фазовращатель Реджиа—Спенсера, материал ферритов, фазовый сдвиг, намагнитченность насыщения, прямоугольность петли гистерезиса

*Successful construction of on-board phase-locked antenna arrays became possible in many respects owing to the development of compact mutual quick-response Reggia—Spencer ferrite phase shifting devices. Requirements placed on ferrites for phase shifting devices having properties necessary for constructing high-Q phase shifting devices with a broadened band of working frequencies and increased level of transmitted power for all operating conditions are indicated, the list of which includes high saturation magnetization  $4M_s$ , low anisotropic field, increased residual induction  $B_r$ , highly rectangular hysteresis loop, increased value of dielectric constant, and large width of the spin wave line.*

**Key words:** Reggia-Spencer phase shifting device, materials of ferrites, phase shift, saturation magnetization, rectangularity of hysteresis loop

В ОАО «Научно-исследовательский институт приборостроения» одновременно с проведением работ по развитию технологии и изучению системных вопросов построения активных фазированных решеток (АФАР) продолжают начатые в 60-х годах исследования, направленные на совершенствование методов проектирования и производства

пассивных ФАР на основе ферритовых фазовращателей (ФВ) с магнитной памятью.

Создание специалистами НИИП первых в мире бортовых антенных систем с электронным управлением луча во многом стало возможным в результате разработки и последующему серийному освоению миниатюрных, взаимных, быстродействующих

ферритовых ФВ типа Реджиа–Спенсера модифицированных [1]. Такие ФВ рассчитаны для работы в X-диапазоне на волне с линейной поляризацией и обеспечивают непрерывное изменение фазового сдвига и магнитную память при минимальных потерях и энергии перемагничивания. В качестве материала для ферритовых сердечников применялись первоначально магний-марганцевые шпинели 3СЧ15, а позднее – литиевые 3СЧ18, 3СЧ19 и 3СЧ23. За период с 1965 г. по настоящее время с их использованием разработаны и серийно освоены более 20 типов ФВ. В [2] определены размеры деталей и показаны основные закономерности, позволяющие получить заданную рабочую полосу частот  $\pm 10\%$ , свободную от резонансов потерь, свойственных этому типу ФВ, и обеспечить высокую стабильность управляемого фазового сдвига, слабо зависящего от частоты и климатических воздействий в пределах этой полосы.

Высокие электрические характеристики ФВ, выполненных на основе запредельных волноводов с продольно-намагниченным ферритовым стержнем, обеспечены сложным феррито-керамическим заполнением регулярной части волновода (рис. 1).

В результате оригинальных решений [2] и комплекса мер по стабилизации параметров ферритов [3] этот вид ФВ нашел массовое применение в бортовых ФАР. Ввиду известных ограничений количество ФВ для таких ФАР меньше, чем для ФАР наземного базирования, поэтому конструкторы предъявляют более жесткие требования к техническим характеристикам таких ФВ, которые на практике вместе с другими узлами ФАР обеспечивают высокие параметры излучения РЛС.

В статье рассмотрены вопросы, связанные с выбором ферритового материала для сердечника ФВ типа Реджиа–Спенсера модифицированного (рис. 1) и формулировкой требований к техническим параметрам материалов, для дальнейшего совершенствования характеристик ФВ этого типа и расширения областей их использования в ФАР различных частотных диапазонов.

Известно, что для бортовых ФАР первостепенное значение имеют масса, габариты и энергопотребление ФВ. Для обеспечения заданных параметров излучения ФАР фазовращатели должны иметь высокую добротность. Для этого желательно использовать ферриты с максимально возможной намагниченностью насыщения  $4\mu M_s$ , которая определяет фазовую активность ФВ для заданного частотного диапазона. Учитывая значительный температурный диапазон работы ФВ ( $-50, +70^\circ\text{C}$ ), первостепенное значение имеет температурная стабильность этого параметра. С этой целью рекомен-

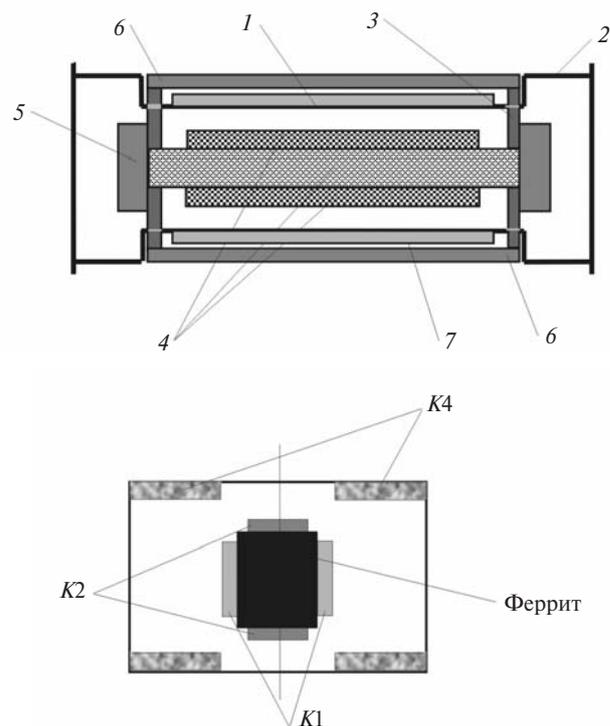


Рис. 1. Эскиз конструкции и сечение регулярной части фазовращателя: 1, 2 – корпус; 3 – ферритовый стержень; 4 – диэлектрические пластины K1, K2, K4; 5 – согласователь; 6 – магнитопроводы; 7 – катушка

дуется выбирать феррит с максимально низким температурным коэффициентом намагниченности насыщения ( $\alpha_{M_s}$ ) и максимально высокой температурой Кюри ( $T_C$ ). Такие материалы обладают более пологой характеристикой  $4\mu M_s (t^\circ\text{C})$  в рабочем интервале температур. Ферриты на основе литиевой шпинели наиболее предпочтительны для ФВ типа Реджиа–Спенсера, поскольку, с одной стороны, они, как и другие, отличаются широким спектром значений намагниченности (1000, 5000 Гс), с другой, за счет присутствия в составе ионов лития обладают самыми высокими значениями температуры Кюри – до  $570^\circ\text{C}$  [3].

Нужно, однако, отметить, что литиевые шпинели появились значительно позднее, а первые ФВ этого типа были освоены серийно с использованием магний-марганцевых ферритов. Обладая приемлемым сочетанием технических параметров, таких как намагниченность насыщения, прямоугольность петли гистерезиса, коэрцитивная сила, диэлектрические и магнитные потери и т.д., эти материалы имеют относительно невысокую  $T_C$  и низкую температурную стабильность параметров, сопровождаемую некоторой нестабильностью в получении заданных параметров феррита между партиями. Поэтому только с появлением литиевой шпинели первоначально на одном из головных ведомствен-

ных предприятий, а впоследствии и на фирмах-производителях в середине 80-х годов прошлого века удалось добиться приемлемой температурной стабильности всего комплекса параметров ферритов, необходимой для работы ФВ, и одновременно нужной повторяемости этих параметров между партиями ферритов.

Так как на низких частотах можно применить феррит с невысокой намагниченностью насыщения  $4\pi M_s$ , то один из путей получения требуемого фазового сдвига в С-диапазоне – увеличение длины ферритового сердечника, например, для фарадеевского ФВ. Однако для ФВ типа Реджиа–Спенсера такой путь приводит к сужению полосы частот, заключенной между резонансами волны  $E_{11}$  (рис. 2), расстояние между которыми обратно пропорционально длине ФВ [1].

Известно, что феррит обладает двумя характерными резонансами: магнитным и частотным. Поскольку ФВ как прибор СВЧ принципиально работает в слабых магнитных полях до 50 Э, то влияния магнитного резонанса, который наступает в зависимости от марки материала при полях около 800 Э, не происходит. Однако, стремясь получить большое значение намагниченности насыщения, что и определяет способность ФВ обрабатывать фазовый сдвиг  $\approx 360^\circ$  при всех климатических воздействиях, разработчики сталкиваются с проблемой вхождения другого – частотного или естественного ферромагнитного резонанса (ЕФМР) – в рабочую полосу частот со стороны нижней частоты рабочей полосы (рис. 2). Особенно это проявляется в области отрицательных температур, в которой намагниченность насыщения возрастает, что неизбежно приводит к смещению границы ЕФМР вверх по частоте и увеличению потерь в ФВ. Желая обеспечить заданную рабочую полосу частот при ограниченном С-диапазоном значении намагниченности

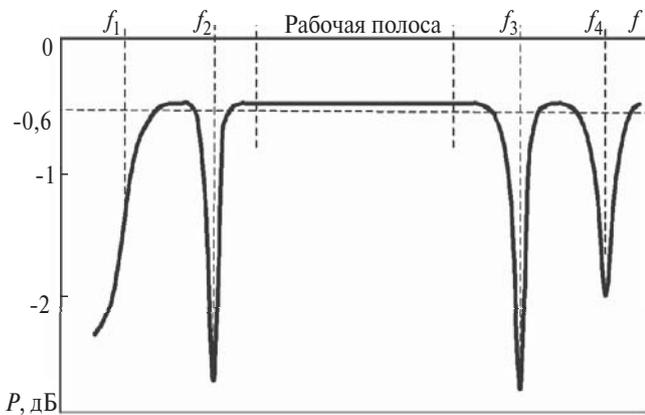


Рис. 2. Частотная зависимость потерь фазовращателей:  $f_1$  – за- предельность (отсечка волны  $H_{10}$ );  $f_2, f_3$  – резонансы волны  $E_{11}$ ;  $f_4$  – резонанс волны  $H_{01}$

и невозможности увеличивать размеры материала, приходится выбирать феррит, обладающий повышенной крутизной ЕФМР и, как следствие, минимальным значением поля анизотропии  $H_A$ . Уменьшение  $H_A$  дает возможность применять ферриты с более высоким значением  $4\pi M_s$ , что приводит к увеличению фазы на единицу выбранной длины ферритового сердечника. Появляется реальная возможность создания в С-диапазоне ФВ типа Реджиа–Спенсера, что ранее было проблематичным. Сотрудничество с ОАО «Завод «Магнетон» в последние годы позволило разработать такой ФВ на базе опытной модификации феррита 4СЧ14, максимально снизив рабочую частоту при заданной полосе частот для всех климатических воздействий.

Установлено, что для ферритовых материалов, используемых в приборах нерезонансного типа, а также в управляемых устройствах, работающих в состоянии остаточной намагниченности, какими являются ФВ с магнитной памятью, важное значение имеют параметры, определяющие петлю гистерезиса магнитного материала (рис. 3): индукция насыщения  $B_m$ , остаточная индукция  $B_r$ , коэрцитивная сила  $H_c$ , коэффициент прямоугольности  $K_{пр}$ , коэффициент квадратности  $K_{кв}$ , поле трогания  $H_T$ .

С целью максимального использования одного из главных свойств ферритовых ФВ – магнитную память – необходимо стремиться обеспечивать значение  $K_{пр} = (B_r/B_m)$  близким к 1. По значению  $K_{пр}$  можно судить об эффективности применения феррита в ФВ. Поскольку управляемый фазовый сдвиг пропорционален остаточной индукции  $B_r$ , желательно, чтобы значение  $K_{пр}$  было больше 0,9. Наибольшими значениями  $K_{пр}$  обладают ферриты шпинели. Гранаты имеют меньшую прямоугольность петли гистерезиса и большее значение коэф-

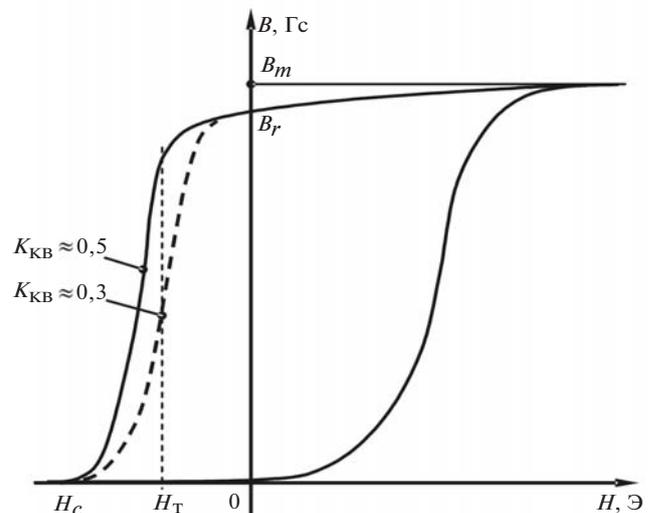


Рис. 3. Процесс перемagnetизации ферритового сердечника

фициента магнитоотрицательности. Это обстоятельство нужно иметь в виду при учете влияния механических нагрузок на скрутку и растяжение, которые неизбежно присутствуют при сборке ФВ и их монтаже в ФАР. Кроме того, значение  $K_{\text{пр}}$  уменьшается с увеличением магнитоотрицательности, поэтому последний параметр должен быть минимален.

Как и у ФВ других типов, энергия, затрачиваемая на перемагничивание ферритового сердечника определяется площадью петли гистерезиса, которая, в свою очередь, зависит от коэрцитивной силы  $H_c$ . Разработчики стремятся сделать площадь петли как можно меньше, т.е. понизить значение  $H_c$ , чтобы уменьшить энергию, затрачиваемую на перемагничивание. Однако значение  $H_c$  влияет на способность реальной конструкции ФВ «удерживать» память в магнитопроводе из-за наличия технологических зазоров при сборке конструкции. Может оказаться, что значения  $H_c$  будет недостаточно для обеспечения этого важного свойства ферритового ФВ, придется выбирать между затрачиваемой энергией перемагничивания и качеством магнитной памяти. Наиболее оптимальным для разрабатываемых конструкций ФВ типа Реджиа–Спенсера является значение  $H_c = 1,1$  Э.

Коэффициент квадратности петли гистерезиса, определяемый как значение отношение поля трогания к коэрцитивной силе, характеризует устойчивость состояния остаточной намагниченности к воздействию магнитных помех. Энергию, затрачиваемую на управление работой ФВ, можно оптимизировать, выбрав материал с  $K_{\text{КВ}} = (H_T/H_c) \gg 0,5$  (см. рис. 3) при сохранении  $0,9 \leq K_{\text{пр}} \leq 1$ . В результате спад на участке кривой гистерезиса между точками  $B_r$  и  $H_c$  через точку  $H_T$  получается максимально пологим, а следовательно, более пологий становится и кривая тока управления. Таким образом достигается более плавное управление процессом продольного намагничивания и, как следствие, более точная установка фазы при уменьшении затрачиваемой энергии на управление.

Учитывая требование минимального энергопотребления на один ФВ, желательно выбирать феррит с минимально возможным  $H_T$ , а значение  $K_{\text{КВ}}$  близким к 0,3 при максимально высоком значении  $B_r$ . Такая возможность появилась только в последние годы. Следует отметить, что разрабатываемые ФВ имеют так называемый УТ-способ управления. Иными словами, продольное намагничивание ферритового стержня обеспечивается либо изменением напряжения на обмотках катушек, либо с помощью изменения длительности импульсов протекающего в этих обмотках тока. В нашем случае происходит

управление работой ФВ по второму типу при стабильном значении  $U$ .

При разработке ФВ с продольно намагниченным сердечником, расположенным по оси передельного волновода, одним из главных параметров является относительная диэлектрическая проницаемость феррита  $\epsilon$ . Она определяет способность материала «втягивать» в себя и «удерживать» СВЧ поле, т.е. чем выше значение  $\epsilon$ , тем в большей степени обеспечивается необходимая фазовая активность. При прочих равных параметрах шпинели обладают наибольшей диэлектрической проницаемостью, значение которой доходит до 17.

Непосредственно связан с  $\epsilon$  тангенс диэлектрических потерь  $\text{tg}d_e$ . Этот параметр определяется размерами кристаллической структуры материала и обусловлен в основном технологией изготовления феррита: чем меньше  $\text{tg}d_e$ , тем меньше потери СВЧ сигнала в феррите. Используя современное оборудование, реально достигнутые значения  $\text{tg}d_e \gg 10^{-4}$ .

При разработке ФВ для мощных СВЧ трактов (решение задачи увеличения дальности обнаружения РЛС или в случае проектирования «разреженной» ФАР, содержащей ограниченное число ФВ) необходимо учитывать магнитные потери при высоком уровне мощности, связанные с процессами возбуждения спиновых волн: чем выше ширина линии спиновых волн феррита  $\Delta H_k$ , тем устойчивее феррит к воздействию СВЧ мощности.

Наиболее распространенный метод повышения  $\Delta H_k$  ферритов-шпинелей – введение в состав феррита быстрорелаксирующих ионов редкоземельных элементов. Однако это может привести к снижению намагниченности насыщения и потери фазовой активности. Одновременно этот процесс сопровождается ростом потерь СВЧ сигнала в рабочей полосе частот при низком и среднем уровнях мощности. Так, экспериментально было установлено (рис. 4), что в X-диапазоне частот для серийно освоенного ФВ на базе феррита марки ЗСЧ23 при увеличении  $\Delta H_k$  с 2 до 6,8 Э происходит увеличение с 40 до 57 Вт порога критического уровня средней мощности. При этом возникают нелинейные явления, вызванные появлением высших типов спиновых волн и приводящие к значительному росту потерь в одиночном ФВ. Однако увеличение  $\Delta H_k$  сопровождалось увеличением с 0,6 до 1,0 дБ потерь и при низком уровне мощности, которые не носят лавинообразного характера, но оказывают влияние на параметры излучения ФАР. Необходимо продолжить работы по созданию ферритов с повышенными значениями  $\Delta H_k$  без ухудшения дру-

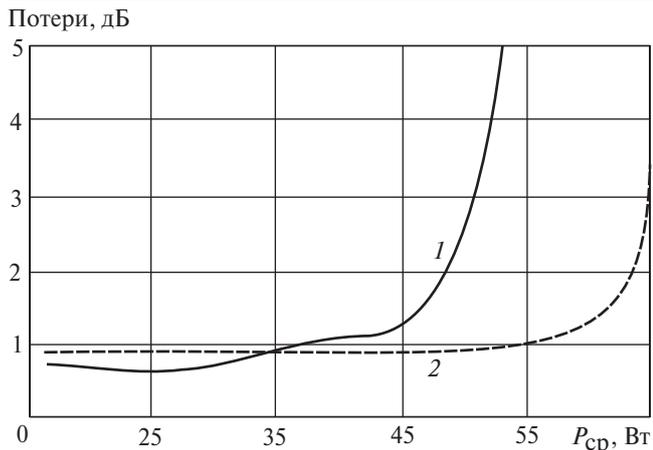


Рис. 4. Зависимость потерь фазовращателя на базе феррита ЗСЧ23 от уровня мощности СВЧ сигнала: 1 –  $DH_k = 2$ ; 2 –  $DH_k = 6,8$

гих параметров, приводящих к росту потерь на низком уровне мощности.

Применение ферритов в быстродействующих ФВ предъявляет высокие требования не только к их электромагнитным параметрам, но и к микроструктуре материала, которая должна быть однородной в объеме одного изделия и одинаковой в партии. Поэтому для формирования партий ферритов, используемых в ФВ для ФАР, в ОАО «Завод «Магнетон» разработаны специальные технологические процессы с использованием гидростатического и изостатического прессования. В результате удалось получить для серийного использования ферриты повышенной влагостойкости с влагопоглощением  $\leq 0,1\%$ ; ФВ без пропитки отвечают всем требованиям в условиях повышенной влажности. Это особенно важно, так как в конструкции регулярной части ФВ типа Реджиа–Спенсера присутствует воздушный зазор между ферритовым сердечником и внутренними стенками запердельного волновода. В отличие от широко известных фарадеевских ФВ ферритовый сердечник не имеет слоя металлизации и в большей степени подвержен климатическим воздействиям.

**Выводы.** 1. Используя многолетний опыт проектирования, можно осуществлять дальнейшую модернизацию ФВ типа Реджиа–Спенсера и разрабатывать новые для других диапазонов частот, в ко-

торых возможно применение ферритовых материалов. Так, с целью расширения рабочей полосы частот в ОАО «Завод «Магнетон» разработаны и серийно освоены для использования в X-диапазоне частот две новые марки феррита: ФМН-2 тип 1 для внутреннего стержня и ФМН-2 тип 2 для магнитопроводов. В результате модернизации ФВ с применением ферритов этих марок удалось реализовать замкнутую магнитную цепь с максимально высоким значением  $K_{пр}$ , обеспечившим получение больших фазовых сдвигов, что позволило реализовать требуемую рабочую полосу частот. Кроме того, эти ферриты отличаются высокой влагостойкостью  $\leq 0,01\%$ , близкой к таковой у керамики, и ФВ без пропитки отвечают всем требованиям в условиях повышенной влажности. Таким образом были реально снижены затраты на производство одного из самых массовых изделий ФАР.

2. Практически все параметры ферритовых материалов необходимо рассматривать в комплексе, учитывая их взаимосвязь. Выбирая материал с одним улучшенным параметром, можно иметь значения других, которые не отвечают необходимым требованиям, и наоборот. Поэтому разработчики постоянно принимают компромиссные решения, которые носят творческий характер и направлены на выполнение конкретной задачи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сапсович Б.И., Старшинова Е.И., Чалых А.Е., Синани А.И. Ферритовый фазовращатель для ФАР. – Антенны, 2005, №2.
2. Патент №2207666 (РФ). Сверхвысокочастотный фазовращатель/Е.И. Старшинова, 2002.
3. Сверхвысокочастотные магнитные и диэлектрические материалы: Каталог ОАО «Завод Магнетон», Санкт-Петербург, 2009.

*Авторы: Старшинова Елена Ивановна окончила радиотехнический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1963 г. Заведующая лабораторией ферритовых фазовращателей ОАО «Научно-исследовательский института приборостроения им. В.В. Тихомирова».*

*Черников Дмитрий Владимирович окончил радиотехнический факультет МЭИ в 1988 г. Аспирант ОАО «НИИП им. В.В. Тихомирова».*