

# Пути создания в $K_A$ -диапазоне ферритового фазовращателя с магнитной памятью, реализующего принцип Реджи–Спенсера, на основе использования литиевой шпинели<sup>1</sup>

ЧЕРНИКИН Д.В.

*Анализ результатов математического моделирования и экспериментальных исследований показал возможность создания ферритового фазовращателя (ФВ) заданного типа в  $K_A$ -диапазоне с использованием Li-Ti-Zn шпинели. Первым этапом реализации такой работы является обеспечение стабильного фазового сдвига при всех условиях эксплуатации ФВ. Рассмотрены пути решения проблем, возникающие при «отработке фазы» для такого ФВ в  $K_A$ -диапазоне из-за их отличий от аналогичных ферритовых ФВ, работающих по принципу Реджиа–Спенсера в X-диапазоне.*

**Ключевые слова:** ферритовый фазовращатель  $K_A$ -диапазона, принцип Реджиа–Спенсера, магнитная память, продольно-намагниченная литиевая шпинель, намагниченность насыщения, фазовый сдвиг, размагничивающие факторы

Разработка волноводного ферритового фазовращателя (ФВ), работающего на волне с линейной поляризацией, вызвана необходимостью создания высокоточных систем фазирования (СФ) для бортовых и наземных мобильных фазированных антенных решеток (ФАР) в  $K_A$ -диапазоне, обладающих высокой энергетической эффективностью [1].

Исследования в X-диапазоне показали [2], что ФВ, реализующие принцип Реджиа–Спенсера, являются высокочастотными, быстродействующими и малогабаритными. Они обладают магнитной памятью, используют мало энергии на перемагничивание и имеют практически непрерывную характеристику управления. Эти ФВ, предназначенные для работы в различных частях X-диапазона, освоены серийно и используются в ФАР бортовых РЛС самолетов МиГ-31, Су-30, Су-35 и их модификаций.

Согласно принципам построения ФАР, разрабатываемым в ОАО «НИИ приборостроения им. В.В. Тихомирова», ферритовый ФВ, реализующий принцип Реджиа–Спенсера в  $K_A$ -диапазоне, должен обладать следующими характеристиками:

средняя частота рабочего диапазона  $f_0 = 34$  ГГц;

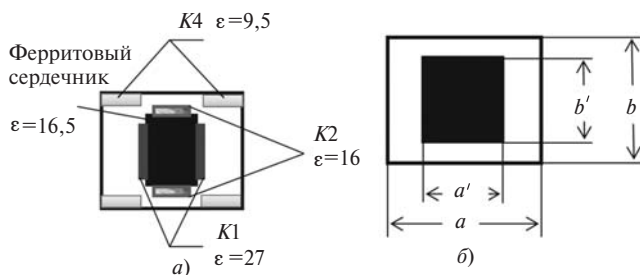
*An analysis of the results obtained from mathematical simulation and experimental investigations has shown the possibility of constructing a preset type of  $K_A$ -band ferrite phase shifter with the use of Li-Ti-Zn spinel. Securing a stable phase shift under all operating conditions of the phase shifter is the first stage of this developmental work. Ways are considered for solving the problems arising in «producing the phase shift» for such phase shifter in the  $K_A$ -band due to its differences from similar ferrite phase shifters operating in the X-band according to the Reggia-Spenser principle.*

**Key words:**  $K_A$ -band ferrite phase shifter, Reggia-Spenser principle, magnetic memory, longitudinally magnetized lithium spinel, saturation magnetization, phase shift, demagnetizing factors

полоса рабочих частот  $\pm 3\%$ ;  
интервал рабочих температур  $-50^\circ\text{C}, +70^\circ\text{C}$ ;  
иметь магнитную память;  
обладать свойством взаимности, быть проходного типа;  
управляемый фазовый сдвиг для всех условий эксплуатации  $\pm 360^\circ$ ;  
потери СВЧ энергии в рабочем диапазоне температур  $\leq 1,5$  дБ;  
коэффициент стоячей волны (КСВ) по входу и выходу ФВ для всех фазовых состояний  $\leq 1,5$ ;  
точность установки фазового сдвига со схемой управления  $\leq 5^\circ$ ;  
длительность временной диаграммы управления работой «сброс фазы/пауза/набор фазы»  $\leq 50$  мкс;  
потребляемая мощность  $\leq 0,01$  Вт при частоте повторения управляющих импульсов временной диаграммы  $\leq 100$  Гц;  
средняя мощность СВЧ сигнала  $\leq 5$  Вт;  
масса ФВ  $\leq 1,5$  г.  
ФВ размещаются в узлах двумерной решетки с шагом  $(0,55, 0,65)\lambda_0$  без взаимного влияния друг на друга по магнитным цепям управления. Они стыкуются и обеспечивают заданное согласование для всех фазовых состояний с выходами каналов волноводно-распределительной системы (ВРС) сечения  $5,3 \times 2,0$  мм и входами излучающих линеек устройства фазирования и излучения (УФИ).

<sup>1</sup> Доклад автора на Международной конференции в Алуште (сентябрь 2012 г.), оформленный в виде статьи для «Электричества».

При разработке ФВ, реализующего принцип Реджиа–Спенсера в различных частях сантиметрового диапазона частот [3], обеспечение требуемых фазовременных характеристик (ФВХ) при одновременной оптимизации конструкции (уменьшение массы ферритового сердечника и размеров магнитопроводов), снижении энергопотребления и обеспечении необходимой температурной и частотной стабильности параметров ФВ в рабочей полосе частот  $\pm 10\%$  привело к использованию в регулярной части ФВ волновода с запредельным сечением, обладающего сложным неоднородным заполнением (рис. 1,а).



**Рис. 1.** Ферритокерамическое заполнение поперечного сечения регулярной части ФВ, работающих по принципу Реджиа–Спенсера:  $a$  – в С-, Х-, К<sub>U</sub>-диапазонах; K1, K2, K4 – керамические пластины с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ ;  $b$  – в К<sub>A</sub>-диапазоне;  $a'$ ,  $b'$  – сечение волновода с запредельным сечением;  $a'$ ,  $b'$  – сечение ферритового сердечника с  $\epsilon = 15$

На боковых поверхностях продольно-намагниченного ферритового сердечника расположены керамические пластины, размеры и параметры материала которых выбираются из условий: K1 – для получения максимального значения фазового сдвига; K2 – для обеспечения минимальной разницы между фазовыми сдвигами на краях рабочей полосы частот. На внутренних широких стенках запредельного волновода также имеются дополнительные пластины K4, которые используются для коррекции положения рабочей полосы частот относительно резонансов потерь и частоты отсечки в частично заполненном ферритом волноводе запредельного сечения. В регулярной части типового ФВ число неоднородных областей может достигать девяти. При этом уже для Х-диапазона диэлектрические пластины имеют малую толщину (0,6–0,9 мм) и большой разброс значений  $\epsilon$  9,5–27,0 [2, 3].

Сложность создания ФВ аналогичной конструкции для К<sub>A</sub>-диапазона обусловлена рядом факторов:

невозможность получить ферриты с намагниченностью насыщения  $4\pi M_S$  выше 5000 Гс и температурой Кюри не ниже 500 °С (для использования в миллиметровом диапазоне по расчетам необходим материал с  $4\pi M_S \gg 8000$  Гс и более);

при обеспечении необходимой фазовой активности путем увеличения длины ферритового сердечника следует учесть то обстоятельство, что рабочая полоса частот, свободная от паразитных резонансов распространяющихся типов волн, обратно пропорциональна длине ферритового сердечника [2] и, следовательно, относительная полоса пропускания ФВ К<sub>A</sub>-диапазона будет меньше, чем для ФВ Х-диапазона;

керамические пластины K1, K2 и K4 (рис. 1,а) с необходимыми для обеспечения заданных технических параметров ФВ размерами невозможно изготовить из материалов, обладающих нужными параметрами;

значительное влияние на характеристики ФВ оказывает точность изготовления как самого волноводного канала с элементами согласования, так и ферритовых деталей; возрастают требования к технологическим допускам при изготовлении элементов конструкции;

связанные с немагнитными зазорами между ферритовыми деталями размагничивающие факторы приводят к уменьшению коэффициента прямоугольности  $K_{пр}$  замкнутой магнитной цепи и к уменьшению остаточной намагниченности  $B_r$  и сбросу значительной части набранной фазы.

К ферриту, который используется для сердечника и магнитопроводов ФВ, предъявляются и специфические требования [4]: необходимая для К<sub>A</sub>-диапазона высокая электромагнитная активность, которая определяется такими параметрами, как  $4\pi M_S$ , естественный ферромагнитный резонанс (ЕФМР), диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  минимальные СВЧ потери, зависящие от тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg} \delta_e$ ; температурная стабильность всех этих параметров, характеризующаяся температурой Кюри  $T_C$  и температурным коэффициентом намагниченности насыщения  $\alpha M_S$ ; отсутствие нелинейных процессов, связанных с возникновением спиновых волн на высоком уровне мощности, зависящих от ширины линии резонанса спиновых волн  $\Delta H_K$ . Помимо этого для быстродействующих ФВ требуется материал с малой коэрцитивной силой  $H_c$ , высоким значением  $B_r$  и  $K_{пр}$ , близким к единице, а также относительно небольшим коэффициентом квадратности  $K_{кв}$ . Кроме этого, необходимо учесть, что ферритовый сердечник в быстродействующем ФВ работает в слабых магнитных полях. Поэтому при выборе материала с максимально возможным значением  $4\pi M_S$  необходимо исключить возможность вхождения бокового склона ЕФМР в полосу частот со стороны нижней частоты рабочего диапазона  $f_H$ , что может привести к росту потерь, особенно при максимальной отрицательной температуре. По совокупности

параметров самыми перспективными материалами для создания ФВ являются Li-Ti-Zn шпинели [4], которые могут обеспечить необходимый фазовый сдвиг в  $K_A$ -диапазоне, обладающий температурной и частотной стабильностью при минимальных СВЧ потерях на заданных допустимых уровнях средней мощности.

Использование Mg-Mn шпинелей в ФВ затруднительно из-за низкой температурной стабильности параметров материала, а также отсутствия феррита с необходимой для работы в  $K_A$ -диапазоне намагниченностью насыщения. Шпинель Ni-Zn характеризуется значительными потерями, связанными, в первую очередь, с большими значениями параметра  $DH_K$  (до 6 Э и более). Ферриты-гранаты также нецелесообразно использовать, так как эти материалы имеют недостаточные значения  $\epsilon$ ,  $4\pi M_s$  и  $K_{пр}$  для создания ФВ в  $K_A$ -диапазоне. Кроме этого, им в большей степени, чем шпинелям, присуще свойство магнитоstriction и они дороже в изготовлении. Перечисленные выше ферриты со структурой шпинели и граната относятся к классу магнитомягких материалов.

Традиционно в  $K_A$ -диапазоне частот и выше применяются гексаферриты, обладающие большим эффективным полем магнитной анизотропии  $H_{Aэфф}$ , в значительной мере компенсирующим нехватку намагниченности при переходе в миллиметровый диапазон длин волн. Однако этот параметр не является определяющим при выборе материала для создания ФВ [5]. Скорее наоборот, необходимо использовать материалы с минимальным значением  $H_{Aэфф}$ , поскольку он определяет затягивание склона частотного резонанса ЕФМР и тем самым ограничивает применение ферритов с большими значениями  $4\pi M_s$  в ФВ. При сравнении СВЧ гексаферрита с литиевой шпинелью для использования в ФВ  $K_A$ -диапазона с магнитной памятью видно, что первый уступает почти по всем основным параметрам, а потери в нем в несколько раз выше, чем в шпинели. Гексаферрит не характеризуется параметром  $B_r$ , а значение  $H_c$  у него почти на три порядка выше, чем у шпинели, поэтому энергия на перемагничивание также существенно выше. Т.е. говорить о параметрах, характеризующих петлю гистерезиса импульсного перемагничивания, не представляется возможным. Гексаферрит по своим характеристикам близок к магнито жестким материалам и не способен обеспечить требуемое быстрое действие, а также магнитную память — одно из важнейших свойств ферритового ФВ.

Результаты математического моделирования с целью оптимизации структуры заполнения регулярной части ФВ показали, что, отказавшись от использования керамических пластин (рис. 1,а) и

перейдя к структуре заполнения (рис. 1,б), можно, с одной стороны, упростить конструкцию ФВ, а с другой — обеспечить максимальную фазовую активность единицы длины продольно-намагниченного сердечника из феррита марки 1СЧ12 в заданной полосе частот (±3 %), свободной от резонансов потерь в рабочем диапазоне температур (−50 °С, +70 °С). В пользу возможности создания ФВ в миллиметровом диапазоне с таким заполнением фазосдвигающей части говорит тот факт, что ввиду недостаточности значения  $4\pi M_s$  частотная зависимость диагональных и недиагональных компонент тензора магнитной проницаемости для литиевого феррита 1СЧ12 имеет более пологий характер асимптотического стремления ( $m \rightarrow 1$ ,  $a \rightarrow 0$ ) в окрестности частоты  $f_0 = 34$  ГГц, чем у аналогичных компонент ферритовых материалов, используемых для создания ФВ в сантиметровых диапазонах (4СЧ14, 3СЧ23, 2СЧ10) [6].

Для размещения ФВ в узлах решетки с заданным шагом, а также для согласования на минимальной длине с выходным каналом ВРС размеры сечения волновода регулярной части ФВ должны составлять 2,9 × 2,4 мм (рис. 1,б) [6]. Из теории фазового сдвига линейно поляризованной волны в прямоугольном волноводе с продольно-намагниченным ферритовым стержнем известно [7], что приращение фазы в общем виде характеризуется соотношением

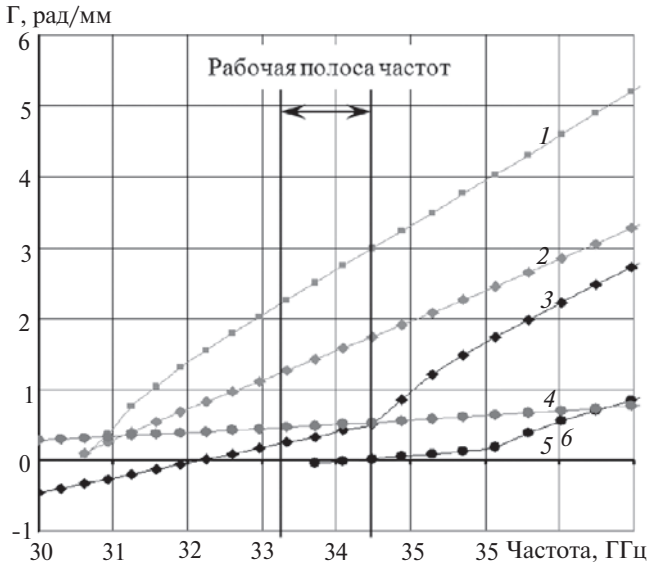
$$D_j \gg \frac{2p}{l} [\Gamma(H_{\max}) - \Gamma(H_0)],$$

где  $\Gamma(H_{\max})$  и  $\Gamma(H_0)$  — постоянные распространения волн при намагниченном и размагниченном состоянии феррита;  $l$  — длина ферритового сердечника;  $l_{\text{в}}$  — длина волны в волноводе.

Для сравнения с аналогичными ФВ, работающими по принципу Реджиа–Спенсера в С-, Х- и К<sub>У</sub>-диапазонах частот с заполнением согласно рис. 1,а было проведено математическое моделирование, направленное на выявление распространяющихся типов волн в регулярной части ФВ  $K_A$ -диапазона с заполнением согласно рис. 1,б. Расчет показал, что несмотря на упрощение структуры заполнения регулярной фазообразующей части ФВ, по-прежнему, три типа квазиволн ( $H_{10}$ ,  $H_{01}$  и  $E_{11}$ ) в наибольшей степени определяют его амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) и влияют на процесс набора фазы (рис. 2).

Другие, высшие, типы волн, распространяющиеся в многомодовом волноводе, имеют значительно меньший вклад и могут в первом приближении не учитываться при анализе работы устройства в целом. Однако волновой пакет, используемый





**Рис. 2.** Частотные зависимости постоянных распространения квазиволн  $H_{10}$ ,  $H_{01}$  и  $E_{11}$  для размагниченного  $B_0 = 0$  (ALFA=0) и намагниченного  $B_p = 3250$  Гс (ALFA=0,35) состояния ферритового сердечника; волновод 2,9 × 2,4 мм; ферритовый сердечник сечением 1,51 × 1,54 мм из материала 1СЧ12;  $f_{запр} = 30,47$  ГГц;  $f_{H01} = 34,50$  ГГц;  $Df_{E11} = 4,7$  ГГц; 1 –  $H_{10}$  ALFA=0,35; 2 –  $H_{10}$  ALFA=0; 3 –  $H_{01}$  ALFA=0; 4 –  $H_{01}$  ALFA=0,35; 5 –  $E_{11}$  ALFA=0,35; 6 –  $E_{11}$  ALFA=0 (кривые 5 и 6 совпадают)

при расчетах первых трех волн, должен быть существенно расширен за счет использования для их описания волн высших типов, обеспечивающих условия сходимости результатов моделирования электродинамических расчетов в миллиметровом диапазоне. Поэтому известные и достаточно хорошо изученные закономерности частотного поведения постоянных распространения волн в сантиметровых диапазонах можно применить и при выборе полосы рабочих частот ФВ в  $K_A$ -диапазоне, в которой будет обеспечена максимальная фазовая активность с учетом температурной и частотной неравномерностей.

Для ФВ в  $K_A$ -диапазоне с заполнением (рис. 1,б), как и для ФВ X-диапазона с заполнением (рис. 1,а), разность постоянных распространения по волне  $H_{10}$  для двух состояний намагниченности определяет фазовую активность ФВ на выбранной частоте. Постоянная распространения волны  $E_{11}$  присутствует во всем частотном диапазоне и практически не зависит от намагниченности феррита и поэтому не участвует в процессе набора фазы. Однако наклон ее частотной зависимости определяет расстояние  $Df_{E11}$  между соседними пиками потерь на АЧХ ФВ ( $Df_{E11} = 4,7$  ГГц при  $l = 29,8$  мм). Волна  $H_{01}$  в регулярной части ФВ начинает распространяться на верхних частотах рабочего диапазона, выше так называемой точки перегиба  $f_{H01} = 34,50$  ГГц. Ниже этой частоты мнимая

часть постоянной распространения становится соизмеримой с действительной, и доля переносимой СВЧ энергии этой квазиволной резко уменьшается. Поэтому точку перегиба постоянной распространения можно считать своеобразной отсечкой волны  $H_{01}$  и  $f_{H01} = f_B = 34,50$  ГГц. Поскольку при  $f = f_{запр} = 30,47$  ГГц постоянные распространения волны  $H_{10}$  для размагниченного и намагниченного состояний феррита пересекаются и фазовая активность равна нулю, то оптимальной с точки зрения частотной неравномерности фазы в  $Df$  может быть точка  $f = f_H = 33,50$  ГГц. При таком выборе неравномерность фазы на краях полосы £2%.

Для максимальной фазовой активности ФВ в рабочей полосе  $Df$  необходимо, чтобы  $f_H$  определялась частотной запредельностью волны  $H_{10}$  и  $f_B \gg f_{H01}$ . При этом паразитные резонансы волны  $E_{11}$  находятся за пределами  $Df$ . При работе ФВ в диапазоне температур необходимо учесть тот факт, что в сторону рабочей полосы частот смещаются  $f_{запр}$  при отрицательных температурах и  $f_{H01}$  – при положительных [8]. Экспериментально для выбранной марки феррита 1СЧ12 установлено, что в интервале рабочих температур от  $-50$  °С до  $+70$  °С такое смещение составляет  $\pm(150, 200)$  МГц.

При сравнении частотных зависимостей постоянных распространения волн в регулярных частях ФВ  $K_A$ -диапазона (рис. 2) с соответствующими характеристиками ФВ X-диапазона можно сделать вывод, что в рабочей полосе частот, свободной от резонансов потерь, наклон графиков зависимостей  $H_{10}(f)$  и  $H_{01}(f)$  более крутой, а графика  $E_{11}(f)$  – более пологий для  $K_A$ -диапазона. Первое обстоятельство усложняет согласование ФВ для всех фазовых состояний по входу и выходу, а второе – обеспечивает возможность вывести резонансы потерь, обусловленные волной  $E_{11}$ , за пределы рабочей полосы £3%. Тем самым дополнительно обеспечить максимальный фазовый сдвиг, помимо намагниченности насыщения феррита, за счет приближения нижней и верхней частот рабочего диапазона соответственно: к частоте запредельности волны  $H_{10}$  и к частоте начала распространения волны  $H_{01}$ .

На рис. 3 представлены частотные зависимости постоянных распространения для размагниченного и намагниченного состояния ферритового сердечника (1СЧ12), рассчитанные для волнового пакета из 299 волн, распространяющихся в многомодовом волноводе с поперечным сечением (рис. 1,б). Результаты расчета зависимости фазовой активности  $f_H = 33,5$  ГГц и  $f_B = 34,5$  ГГц, запредельности и частоты отсечки волны  $H_{01}$  от размеров сечения

ферритового сердечника в волноводе 2,9'2,4 мм (рис. 1,б) приведены ниже:

Сечение феррита, мм	1,55'1,54	1,51'1,54	1,49'1,54
Фазовая активность на $f_H$ , $DG_H$ , рад/мм	0,3760	0,3479	0,3329
Фазовая активность на $f_B$ , $DG_B$ , рад/мм	0,3790	0,3560	0,3412
$f_{запр}$ , ГГц	29,0	29,6	29,8
$f_{H01}$ , ГГц	34,3	34,8	35,1

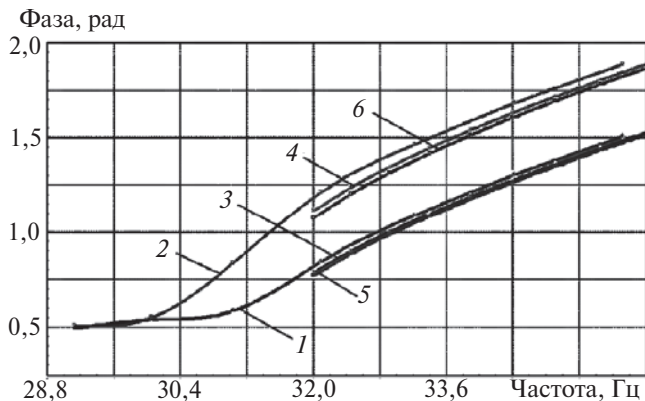


Рис. 3. Частотная зависимость в широкой полосе постоянных распространения при двух состояниях намагниченности для трех размеров ширины  $a\phi$  сечения (1 и 2 – 1,55'1,54 мм; 3 и 4 – 1,51'1,54 мм; 5 и 6 – 1,49'1,54 мм) ферритового сердечника при высоте  $b\phi = \text{const}$ ; 1, 3, 5 – ALFA=0; 2, 4, 6 – ALFA=0,35

Из сравнения рис. 2 и 3 видно, что в области частоты запределности и ниже по частоте основной вклад в результирующую характеристику вносит постоянная распространения  $E_{11}$ , не участвующая в наборе фазы. Выше по частоте (в пределах рабочей полосы) основной вклад приходится на волну  $H_{10}$ , а еще выше по частоте, за пределами  $f_B$ , начинает распространяться волна  $H_{01}$ . На рис. 3 она поглощена постоянной распространения  $H_{10}$  и просуммирована с ней в виде итоговой характеристики. Таким образом, характеристики отдельных основных квазиволн (рис. 2) трансформируются в суммарную характеристику постоянных распространения (рис. 3), участвующих в наборе фазы в рабочей полосе частот ФВ.

На рис. 4 представлено семейство постоянных распространения при изменении высоты  $b\phi$  ферритового сердечника при постоянной ширине  $a\phi = 1,55$  мм. Видно, что при уменьшении площади заполнения ферритом сечения регулярной части ФВ происходит смещение частоты запределности вверх. Одновременно фазовая активность по мере увеличения высоты сердечника сначала растет, затем ее рост прекращается. Тем самым подтверждается факт существования оптимума при выборе высоты ферритового сердечника  $b\phi = 1,54$  мм, для которого обеспечивается максимальная фаза в случае

частичного заполнения волновода с запределным сечением.

Математическим моделированием с целью определения размеров сечения ферритового сердеч-

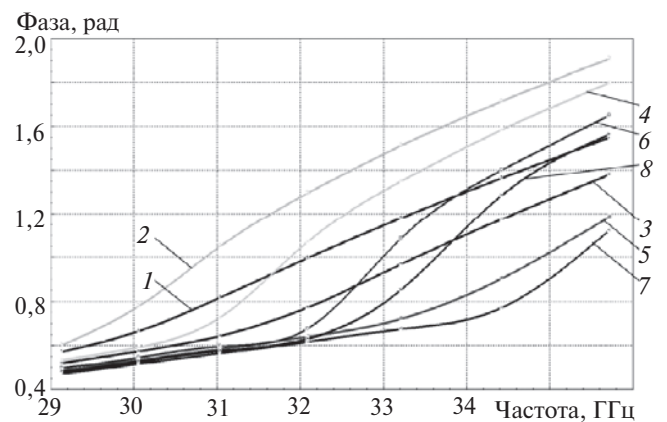


Рис. 4. Частотная зависимость постоянных распространения при двух состояниях намагниченности для четырех размеров высоты сечения сердечника  $b\phi$  (1 и 2 – 1,55'1,54 мм; 3 и 4 – 1,55'1,50 мм; 5 и 6 – 1,55'1,45; 7 и 8 – 1,55'1,30 мм) при постоянной ширине  $a\phi = \text{const}$ ; 1, 3, 5, 7 – ALFA=0; 2, 4, 6, 8 – ALFA=0,35

ника в структуре рис. 1,б, обеспечивающего получение максимального фазового сдвига установлено:

1) на местоположение излома волны  $H_{01}$  относительно рабочей полосы частот существенное влияние оказывает изменение ширины ферритового сердечника  $a\phi$  (рис. 3);

2) частота  $f_{H01}$  смещается вверх на 300 МГц при уменьшении на каждые 0,02 мм ширины ферритового сердечника  $a\phi$  обеспечивая выполнение условия  $f_B \leq f_{H01}$  путем уменьшения ширины сердечника, может возникнуть нехватка фазы в результате уменьшения площади сечения феррита;

3) на местоположение частоты запределности волны  $H_{10}$  относительно  $f_H$  существенное влияние оказывает изменение высоты ферритового сердечника  $b\phi$  (рис. 4); уменьшение  $b\phi$  сопровождается возрастанием частотной неравномерности фазового сдвига на краях рабочей полосы;

4) при увеличении площади заполнения сечения регулярной части ФВ частота запределности смещается вниз по частоте и возрастает фазовая активность; однако может возникнуть ситуация, когда  $f_{H01}$  окажется в рабочей полосе, особенно при максимальной положительной температуре;

5) оптимальным сечением продольно-намагниченного сердечника из феррита 1СЧ12, расположенного по центру запределного волновода 2,9'2,4 мм, является 1,51'1,54 мм; такое сечение позволяет получить наибольшую фазовую активность в структуре единичной длины в заданной полосе рабочих частот (рис. 1,б);

б) при длине ферритового сердечника  $l = 29,8$  мм в результате математического моделирования получена фаза  $j \gg 600^\circ$  в рабочей полосе частот;

7) дальнейшие работы по оптимизации фазовой активности ферритового сердечника в реальных корпусах ФВ с замкнутой магнитной системой при влиянии размагничивающих факторов неизбежно приведут к уменьшению фазы, в первую очередь за счет так называемого сброса, значение которого определяется экспериментально;

8) расчетным путем установлено, что наибольшее влияние на фазовую активность оказывают допуски на размеры ферритового сердечника, а не на размеры волновода; поэтому можно несколько снизить требования к технологическим допускам на изготовление волновода и повысить требования к точности изготовления ферритового сердечника.

Продольное сечение ФВ показано на рис. 5, а принцип работы и осциллограммы токов управления ФВ в статическом режиме на предельном цикле и  $\cos j_{\max}$ , измеренный с помощью установки «фазового кольца» в  $K_A$ -диапазоне, – на рис. 6. Результаты экспериментальных исследований ФВ  $K_A$ -диапазона с замкнутой магнитной системой показали (см. табл. 1), что суммарная фаза  $j_S = j_{\text{упр}} + j_{\text{сбр}}$  соответствует расчетным значениям. Однако при длине сердечника меньше 29,8 мм на процесс импульсного перемагничивания существенное влияние начинают оказывать размагничивающие факторы. Составляющие фазы  $j_S$  – управляемая  $j_{\text{упр}}$  и сбрасываемая  $j_{\text{сбр}}$  – перераспределяются в пользу последней.

Таблица 1

Длина ферритового сердечника, $l$ , мм	Зависимость фазового сдвига от длины ферритового сердечника сечением 1,51×1,54 мм		
	$j_{\text{упр}}$ , град	$j_{\text{сбр}}$ , град	$j_S$ , град
9,8	130	90	220
19,8	300	120	420
29,8	450	160	610

Процесс работы ФВ согласно временной диаграмме «сброс фазы/пауза/набор фазы» представлен на рис. 6, б. Здесь следует отметить, что ФВ, реализующий принцип Реджиа–Спенсера в отличие от «фарадеевского» ФВ, работает на половине петли гистерезиса рис. 6, а, при этом обеспечиваются лучшие энергетические соотношения.

Результаты экспериментальных исследований ФВ  $K_A$ -диапазона в динамическом режиме управления работой и анализ ФВХ показали, что набранная за время управления фаза превышает  $360^\circ$

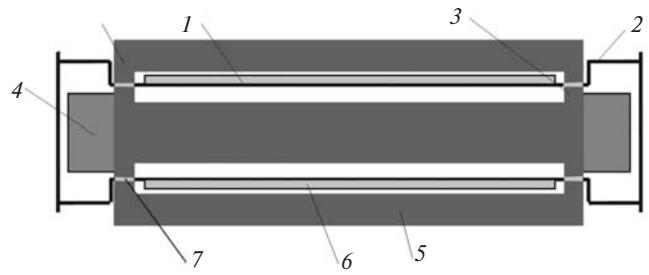


Рис. 5. Продольное сечение ФВ, работающего по принципу Реджиа–Спенсера в  $K_A$ -диапазоне: 1 – волноводный корпус регулярной части 2,9×2,4 мм; 2 – согласующие волновод 4,4×2,4 мм; 3 – ферритовый двутавровый сердечник; 4 – согласователь; 5 – магнитопроводы; 6 – катушки управления работой ФВ на волноводном корпусе регулярной части; 7 – немагнитные зазоры между плечами сердечника и «башмаками» магнитопроводов

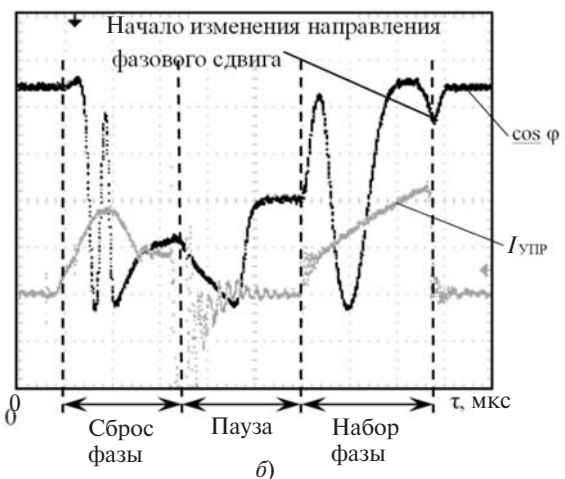
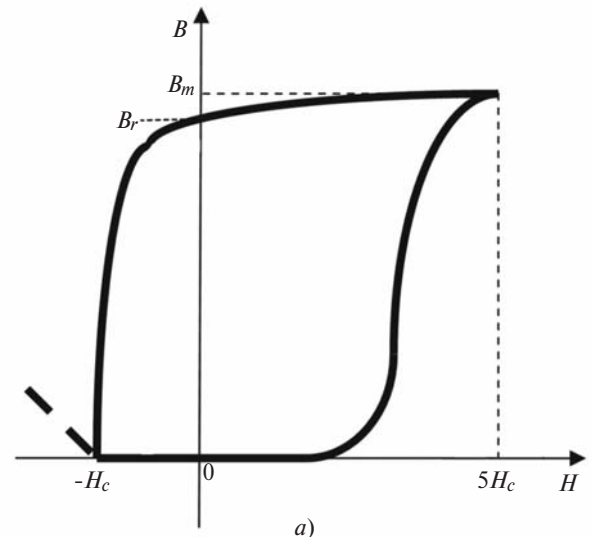


Рис. 6. К вопросу определения фазового сдвига на «фазовом кольце» в статическом режиме управления работой ФВ Реджиа–Спенсера на предельном цикле гистерезиса: а – петля гистерезиса импульсного перемагничивания ФВ  $B = B(H)$  и выбор положения рабочей точки:  $B_m$  – индукция насыщения;  $B_r$  – остаточная индукция;  $H_c$  – коэрцитивная сила; б – осциллограммы тока управления  $I_{\text{упр}}$  и  $\cos j$  в масштабе временной диаграммы работы ФВ; при  $H \ll H_c$  происходит изменение направления фазового сдвига



(рис. 7) только при длине сердечника 29,8 мм для заполнения регулярной части ФВ согласно рис. 1,б.

При исследовании характеристик в рабочем диапазоне частот (рис. 8,а) и интервале температур

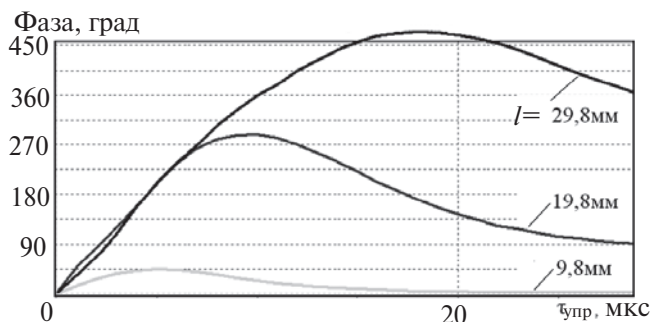


Рис. 7. Зависимость ФВХ ФВ от длины сердечника сечением  $1,51 \times 1,54$  мм из феррита 1СЧ12

(рис. 8,б) также установлена предсказуемость поведения ФВХ по аналогии с соответствующими зависимостями для ФВ X-диапазона. В табл. 2 приводятся данные о максимально допустимом немагнитном зазоре в ферритовых деталях конструкции ФВ Реджиа–Спенсера для литиевых шпинелей, используемых в ФВ различных диапазонов.

Таблица 2

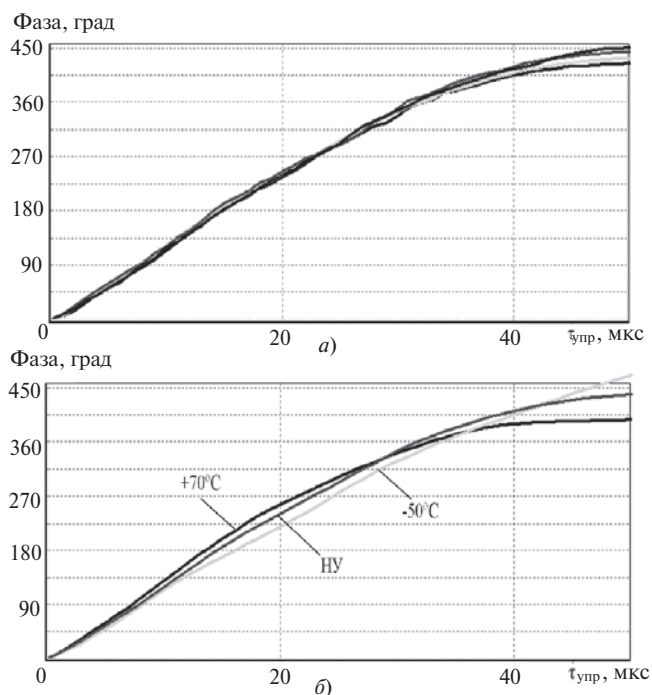


Рис. 8. Семейство ФВХ ФВ  $K_A$ -диапазона в корпусе из сплава титана, выполненного с использованием низкотемпературной пайки; длина ферритового сердечника 29,8 мм: а – на различных частотах из рабочего диапазона в нормальных условиях (НУ); б – усредненные по частоте ФВХ ФВ при различной температуре окружающей среды

Частотный диапазон	Марка феррита	Длина средней силовой линии сердечника с магнитопроводом, мм	Площадь контакта сердечника и магнитопровода, мм <sup>2</sup>	Толщина зазора, мкм
С	4СЧ14	139,40	12,76	80
Х	3СЧ23	103,40	7,48	37
$K_U$	2СЧ10	72,50	3,36	19
$K_A$	1СЧ12	67,37	1,08	12

С переходом к диапазону более коротких волн при проектировании магнитной системы ФВ отмечаются две взаимно противоречивые тенденции:

степень влияния размагничивающих факторов снижается при уменьшении площади контакта сердечника с магнитопроводом;

с другой стороны, резко уменьшается и допустимое значение немагнитного зазора в ферритовых деталях, что приводит к росту размагничивающих факторов и, как следствие, к сбросу набранной фазы за время управления.

Если для ФВ из различных областей сантиметрового диапазона частот (С; Х;  $K_U$ ) эти тенденции взаимно уравнивают друг друга и из экспериментов следует, что  $j_{сбр} \approx 90^\circ$ , то для  $K_A$ -диапазона  $j_{сбр} \gg 150, 200^\circ$ . Без принятия дополнительных мер  $B_r \ll B_m$  (рис. 6,а) и отмечается неудовлетворительная «прямоугольность» петли гистерезиса из-за доминирования второй отмеченной тенденции. С целью уменьшения влияния размагничивающих факторов, приводящих для ФВ в  $K_A$ -диапазоне к значительному сбросу фазы за время паузы во время управления фазой был сделан выбор в пользу конструкции ФВ с наибольшей длиной средней силовой линии. Для уменьшения зазора между сердечником и магнитопроводами, кроме увеличения силы прижатия, были проведены дополнительная шлифовка и полировка ферритовых деталей в местах контактов. Экспериментально было подтверждено, что дополнительная обработка ферритовых поверхностей в местах контактов приводит к приросту фазы на  $70, 80^\circ$  за счет уменьшения сброса.

Также предъявлялись дополнительные требования к микроструктуре материала, которая должна быть однородной в объеме одного сердечника и магнитопровода и одинаковой в партии. Это стало возможным в результате внедрения в заводских условиях специальных технологических процессов с использованием гидростатического и изостатического прессования ферритовых заготовок.

**Выводы.** Математическим моделированием и экспериментальными исследованиями ФВ, работающих по принципу Реджиа–Спенсера в  $K_A$ -диапазоне частот, установлено, что для обеспечения их заданных фазовых характеристик:

по совокупности технических параметров в качестве материала сердечника и магнитопроводов целесообразно использовать литиевую шпатель марки 1СЧ12;

конструкция ФВ (как и в X-диапазоне [2, 3]) представляет собой волновод запердельного сечения, частично заполненный ферритом; по сути — это многомодовый волновод для распространяющихся в нем квазиволн; однако только три типа таких волн ( $H_{10}$ ,  $H_{01}$  и  $E_{11}$ ) определяют АЧХ и участвуют в процессе набора фазы;

с целью упрощения конструкции ФВ при переходе от X-диапазона (рис. 1,а) к  $K_A$ -диапазону (рис. 1,б) функции керамических пластин  $K1$ ,  $K2$  и  $K4$  в регулярной части ФВ выполняет продольно-намагниченный ферритовый сердечник, размеры которого для волновода запердельного сечения 2,9' 2,4 мм обеспечивают равномерный фазовый сдвиг во всей рабочей полосе частот при необходимой АЧХ;

на местоположение  $H_{01}$  на частотной оси начала распространения волны (определяет выбор  $f_B$ ) в большей степени влияет ширина феррита  $a\phi$  а на частоту запердельности  $H_{10}$  (а значит, на  $f_H$ ) — высота  $b\phi$

при получении заданной фазы подтверждено соответствие зависимостей ФВХ ФВ от аналогичных элементов конструкций ФВ  $K_A$ - и X-диапазонов, несмотря на разную структуру заполнения регулярной части;

на основе результатов математического моделирования и экспериментальных исследований макетов ФВ установлено, что требованиям технического задания по обеспечению фазовых характеристик удовлетворяет ФВ, имеющий сечение ферритового сердечника 1,51' 1,54 мм при длине  $l = 29,8$  мм в волноводном канале 2,9' 2,4 мм;

одним из способов снижения влияния на работу ФВ размагничивающих факторов является использование в его конструкции ферритовых деталей с максимально возможной длиной силовой магнитной линией;

смоделирована и экспериментально подтверждена возможность получения заданных фазовых характеристик в интервале частот и температур для упрощенной конструкции ФВ  $K_A$ -диапазона частот; тем самым открывается путь ко второй части работ по созданию ФВ — обеспечению заданных в технических характеристиках величин согласования и потерь при обеспечении сохранности полученных на первом этапе фазовых характеристик.

Автор выражает благодарность начальнику лаборатории ферритовых фазовращателей НИИП Старшиновой Е.И. за помощь в ходе подготовки статьи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белый Ю.И., Синани А.И., Старшинова Е.И. и др. Фазированная антенная решетка для современного истребителя. — Антенны, 2008, № 9.
2. Сапсович Б.И., Старшинова Е.И., Чалых А.Е., Синани А.И. Ферритовый фазовращатель для ФАР. — Антенны, 2005, № 2.
3. Патент на изобретение № 2207666 (РФ). Сверхвысокочастотный фазовращатель/ Е.И Старшинова, 2002.
4. Старшинова Е.И., Черников Д.В. Дополнительные требования к ферритовым материалам при совершенствовании фазовращателей типа Реджиа—Спенсера. — Электричество, 2011, № 3.
5. Patton С.Е. Hexagonal ferrite materials for phase shifter applications at millimeter wave frequencies. — IEEE Trans. on Magn., May 1988, vol. 24, № 3.
6. Черников Д.В. Обеспечение заданных частотных характеристик при разработке в 8-мм диапазоне длин волн ферритового фазовращателя с магнитной памятью, реализующего принцип Реджиа—Спенсера. — МКЭМПИМ-2012, 16—18 ноября 2012г. — М.: НИУ «МЭИ», 2012.
7. Некоторые применения ферритов в антенно-волноводной технике/Под ред. А.Л. Микаэляна. — М.: Советское радио, 1958.
8. Старшинова Е.И., Черников Д.В. Результаты разработки ферритовых фазовращателей для ФАР различных диапазонов. — В кн.: «Радиолокационные системы специального и гражданского назначения. 2010-2012»/Под ред. Ю.И. Белого. — М.: Радиотехника, 2011.

[21.01.13]

Автор: Черников Дмитрий Владимирович окончил радиотехнический факультет Московского энергетического института в 1988 г. Аспирант ОАО «Научно-исследовательский институт приборостроения им. В.В. Тихомирова».