

6. П е т р а к о в с к и й Г.А. О зависимости пороговой мощности ферритовых устройств от длительности ВЧ импульса. "Радиотехника и электроника"; 1970. №4, с.764.

Ю.Н.Полухин, Н.М.Галдина, С.А.Маркелов, Л.К.Чернова, А.А.Рахаев

СИСТЕМА ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ
ФЕРРИТОВЫХ ПРЕСЕЛЕКТОРОВ СВЧ ПРИЕМНИКОВ

Параметрами ферритовых фильтров являются частота настройки фильтра ω_{φ} , минимальные потери в полосе пропускания L , полосы пропускания по уровню 3 и 30 дБ (B_3 и B_{30}), КСВН в полосе пропускания. Для двухрезонаторного ферритового фильтра петлевого типа при критической связи между резонаторами модуль коэффициента передачи определяется выражением [1]

$$|K(\omega)|^2 = \frac{4\beta^2(1+\beta)^2}{4(1+\beta)^2 + a^2}$$

где $a = \frac{2(\omega - \omega_0)Q_0}{\omega_0}$ - обобщенная расстройка ;
 $\omega_0 = \mu_0 \gamma H_0$ - частота ферромагнитного резонанса;
 γ - гиромангнитное отношение ; Q_0 - собственная добротность ферритового резонатора ; $\beta = \frac{Q_0}{Q_{св}} = Q_0 \frac{\pi \mu_0 \gamma}{6 Z_0} \frac{\omega}{\omega_0} \frac{z_{\varphi}^2}{Z_0} M_0$ - коэффициент связи ферритового резонатора с линией передачи, где z_{φ} и Z_0 - соответственно радиус ферритовой сферы и витка связи ; Z_0 - волновое сопротивление линии ; M_0 - намагниченность насыщения.

Максимальным значением коэффициента передачи (при $a = 0$) $|K_0|^2 = \beta^2 / (1 + \beta)^2$ определяются минимальные потери в полосе пропускания. Полосы пропускания по уровню 3 и 30 дБ, КСВН в полосе пропускания и частота настройки фильтра определяются выражениями:

$$B_3 = \sqrt{2} (1 + \beta) \frac{\omega_0}{Q_0} ; \quad B_{30} = \frac{11}{\sqrt{2}} (1 + \beta) \frac{\omega_0}{Q_0} ;$$

$$КСВН = \frac{2 + \beta}{\beta} ; \quad \omega_{\varphi} = \omega_0 (1 + \delta),$$

где δ - параметр потерь

Из приведенных соотношений видно, что параметры фильтра существенно зависят от температуры - с изменением температуры изменяются геомет-

рические размеры резонаторов и элементов связи, величина намагниченности насыщения, подмагничивающее поле, собственная добротность. Оценить зависимость параметра x от температуры можно путем введения соответствующего температурного коэффициента

$$\alpha_x = \frac{1}{x} \frac{\partial x}{\partial T}$$

Температурные коэффициенты параметров фильтра определяются выражениями:

$$\alpha_{k_0} = \frac{2}{1+\beta} \alpha_\beta ;$$

$$\alpha_{\omega_p} = \alpha_{\omega_0} + \alpha_\beta ;$$

$$\alpha_{B_2, B_{30}} = \alpha_{\omega_0} - \alpha_{B_0} + \frac{\beta}{1+\beta} \alpha_\beta ;$$

$$\alpha_{k_{свн}} = -\frac{2}{\beta} \alpha_\beta ;$$

где $\alpha_\beta = \alpha_{B_0} - \alpha_{\omega_0} + 3\alpha_{z_p} - 2\alpha_{z_0} - \alpha_{z_0} + \alpha_\gamma + \alpha_{M_0}$.

Наибольшее влияние на работоспособность систем с ферритовыми фильтрами оказывает температурная нестабильность частоты настройки фильтра, которая в основном определяется температурным коэффициентом

α_{ω_0} . Кроме того, из приведенных соотношений следует, что температурные коэффициенты всех рассматриваемых параметров фильтра в значительной степени определяются величиной α_{ω_0} , поэтому о температурной нестабильности фильтра в целом можно судить по величине температурного дрейфа частоты его настройки $\gamma_\varphi = \omega_\varphi \alpha_{\omega_\varphi}$.

Температурный дрейф частоты настройки фильтра зависит от температурной нестабильности частоты ферритового резонатора γ_p , нестабильности намагничивающего феррит поля γ_0 и от связи ферритовых резонаторов между собой и с линией передачи $\gamma_{св}$ 2 :

$$\gamma_\varphi = \gamma_p + \gamma_0 + \gamma_{св} ;$$

$$\gamma_p = \gamma_\gamma + \gamma_a + \gamma_M .$$

Здесь γ_γ - нестабильность резонансной частоты ферритового резонатора, обусловленная изменением гиромагнитного отношения ($\gamma_\gamma \approx 0,1 \text{ МГц}/^\circ\text{C}$; γ_a - нестабильность частоты, обусловленная зависимостью полей анизотропии от частоты (для ЖИГ $\gamma_a \approx 1,25 \text{ МГц}/^\circ\text{C}$);

γ_M - нестабильность частоты, обусловленная зависимостью намагни-

ченности насыщения от температуры (вследствие несферичности образца для сферы КИГ с несферичностью 0,5% $\gamma_{\text{н}} \approx 0,002 \text{ МГц}/^{\circ}\text{C}$); γ_0 - нестабильность частоты, обусловленная температурной зависимостью намагничивающего поля (для различных типов магнитов $\gamma_0 = 0,5-1,5 \text{ МГц}/^{\circ}\text{C}$); $\gamma_{\text{св}}$ - нестабильность частоты, обусловленная температурными изменениями связи ферритовых резонаторов между собой и с линией передачи (для фильтров с элементами связи в виде петель $\gamma_{\text{св}}$ может достигать 0,5 - 0,7 МГц/ $^{\circ}\text{C}$). Оценка с учетом приведенных значений показывает, что величина температурного дрейфа частоты фильтра может достигать 3,5 МГц/ $^{\circ}\text{C}$.

На рис. I приведены экспериментальные зависимости уходов частоты настройки $\Delta f_{\text{Ф}}$ (кривая 1) и полосы пропускания ΔB_3 (кривая 2) двухрезонаторного полосового ферритового фильтра петлевого типа, снятые в диапазоне температур - 60 \div +60 $^{\circ}\text{C}$. Уход частоты составляет 480 МГц ($\gamma_{\text{Ф}} = 4 \text{ МГц}/^{\circ}\text{C}$), полоса пропускания в указанном диапазоне температур изменяется более, чем в два раза.

С изменением характеристик фильтров, используемых в приемниках СВЧ в качестве преселекторов, изменяются чувствительность и полоса пропускания. Если частота настройки фильтра при изменении температуры сместилась на величину $\Delta f = \frac{\Delta \omega_{\text{Ф}}}{2\pi}$, то новое значение полосы пропускания приемника П определится;

$$П = B_3^T - |\Delta f|,$$

где B_3^T - полоса пропускания ферритового преселектора при температуре окружающей среды T.

Чувствительность приемника $\rho_{\text{min}} = \text{КП}$ (К - постоянная Больцмана) также изменится и температурный коэффициент чувствительности приемника $\alpha_{\rho_{\text{min}}}$ определится выражением

$$\alpha_{\rho_{\text{min}}} = \frac{1}{T} + \frac{B_3 / \omega_{\text{Ф}}}{B_3 / \omega_{\text{Ф}} - \alpha_{\omega_{\text{Ф}}} \Delta T} \left(\alpha_{B_3} - \frac{\omega_{\text{Ф}}}{B_3} \alpha_{\omega_{\text{Ф}}} \right). \quad (\text{I})$$

Кроме того, с изменением частоты настройки фильтра будет изменяться уровень мощности на индикаторе при постоянной мощности сигнала.

В приемниках для телеметрических систем, систем радиоуправления и разведки, предназначенных для работы с ШИМ-сигналами или более точного измерения параметров радиоимпульса, температурные изменения параметров ферритовых фильтров могут привести к уменьшению глубины модуляции ШИМ-сигнала или уменьшению точности измерения параметров радиоимпульса. При прохождении прямоугольного импульса через фильтр с полосой $П = 2f_m$ длительность его фронта определяется как $\tau_{\text{Ф0}} = \alpha / f_m$ [3], где α - некоторая постоянная; f_m - высшая частота прошедшего сигнала.

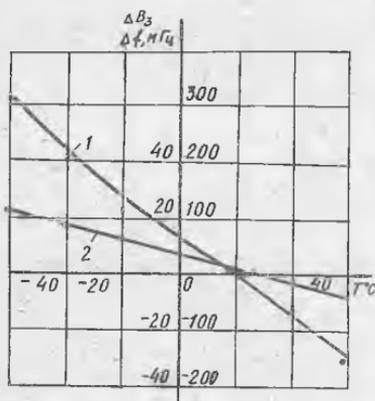


Рис.1. Температурные уходы частоты настройки и полос пропускания фильтра

Следовательно, при изменении температуры длительность фронта импульса будет изменяться в соответствии с выражением

$$\tau_{\varphi} = \frac{a}{f_m - [|\Delta f| + \Delta B_3]} = \tau_{\varphi 0} + \frac{a}{f_{\varphi 0}} [|\Delta f| + \Delta B_3],$$

где ΔB_3 - изменение полосы пропускания фильтра с изменением температуры.

Изменение длительности фронта приводит к появлению ошибки в измерении длительности импульса:

$$\Delta \tau_u = \tau_{\varphi} - \tau_{\varphi 0} = \tau_{\varphi 0} \frac{\Delta T}{f_m} \left(\frac{\omega_{\varphi}}{2\pi} \alpha_{\omega_{\varphi}} + B_3 \alpha_{B_3} \right). \quad (2)$$

Из равенств (1) и (2) можно получить дифференциальное уравнение

$$\frac{2\omega_{\varphi}}{\omega_{\varphi}} = \frac{1}{2} \left[\frac{2\pi f_m}{\omega_{\varphi}} \frac{d\tau_u}{\tau_{\varphi 0}} - \frac{2\pi}{\omega_{\varphi}} \left(\alpha_{pmin} - \frac{1}{T} \right) B_3 dT \right],$$

решение которого позволяет определить допустимый сдвиг частоты настройки фильтра Δf_{φ} в диапазоне температур $T_{min} \div T_{max}$, °К:

$$\Delta f_{\varphi} = \frac{\Delta \omega_{\varphi}}{2\pi} = \frac{1}{2} \left(f_m \frac{\Delta \tau_u}{\tau_{\varphi 0}} + B_3 \ln \frac{T_{max}}{AT_{min}} \right),$$

где A - отношение сигнал/шум приемника.

Если задана точность измерения длительности импульса ε_u , то, полагая надежность измерения 99%, получим:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \tau_u}{\tau_{\varphi 0}} &= 0,4 f_m \varepsilon_u; \\ \Delta f_{\varphi} &= \frac{2\Delta \omega_{\varphi}}{2\pi} = 0,2 f_m^2 \varepsilon_u + \frac{1}{2} B_3 \varepsilon_u \ln \frac{T_{max}}{AT_{min}}. \end{aligned} \quad (3)$$

В качестве примера определим допустимый уход частоты фильтра в диапазоне температур $-60 \div +60^{\circ}\text{C}$ для приемника RMP/USP фирмы "Уаткинс-Джонсон" [4] с параметрами: $f_m = 20$ МГц; $B_3 = 30$ МГц; $A = 2,3$; $\varepsilon_u = 0,2$ мкс. В соответствии с выражением (3) $\Delta f_{\varphi} = 5$ МГц.

Приведенные материалы показывают, что применение ферритовых фильтров в широком диапазоне температур возможно лишь при использовании специальных мер по температурной стабилизации их параметров.

Основным методом термостабилизации резонансной частоты монокри-

сталлических ферритовых резонаторов с кубической решеткой, имеющих форму шара, является ориентирование намагничивающего поля H_0 по осям кристалла, близким к изотропным. Корректируя направление поля H_0 на несколько градусов вблизи изотропного направления, можно в небольшом интервале положительных температур [5] и в небольшом диапазоне частот подобрать знак и величину температурного дрейфа τ_a так, чтобы скомпенсировать уходы частоты, обусловленные изменением гиромагнитного отношения и намагнитченности насыщения вследствие не-сферичности образца.

Однако в системе двух ферритовых резонаторов обеспечить температурную стабильность собственной частоты за счет ориентации кристаллов невозможно, поскольку собственная частота каждой из сфер зависит от намагнитченности соседней сферы и, следовательно, от температуры [6]. Поэтому при ориентации их даже по изотропному направлению всегда имеется температурный дрейф собственной частоты.

Термостабилизация параметров ферритового фильтра может быть достигнута также путем взаимной компенсации температурных дрейфов частоты, обусловленных изменением поля внешнего источника и прочими факторами. Однако применение такого способа термокомпенсации ограничено из-за различного хода температурных характеристик магнитной системы и подлежащих компенсации величин. Поэтому для обеспечения термостабильности параметров ферритовых фильтров в широком диапазоне температур целесообразно променять систему активного термостатирования, позволяющую исключить температурный дрейф частоты, обусловленный нестабильностью не только параметров ферритовых резонаторов, но и намагничивающего поля.

На рис.2 показана конструкция и схема электронного регулирования температур разработанной и экспериментально проверенной системы термостатирования параметров ферритового фильтра, содержащей два независимых замкнутых кольца регулирования температуры: внешний термостат и систему внутреннего термостатирования. Внутри корпуса фильтра размещены плоский нагревательный элемент и датчик температуры (терморезистор СТЗ-19).

Как показали результаты эксперимента, при использовании одной системы внутреннего термостатирования в фильтре поддерживается постоянная температура $+65^{\circ}\text{C}$ при снижении температуры окружающей среды только до -20°C . Дальнейшее снижение температуры окружающей среды сопровождается снижением температуры внутри фильтра и, следовательно, существенным температурным дрейфом частоты.

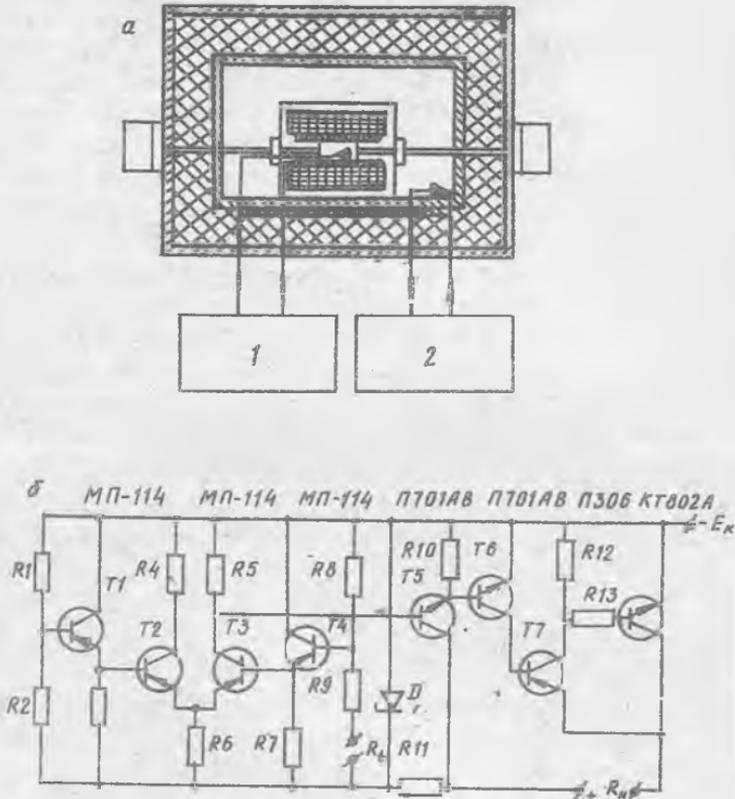


Рис. 2. Конструкция термостабилизированного фильтра и схема терморегулирования:

- 1 - схема внутреннего кольца терморегулирования;
- 2 - схема внешнего кольца терморегулирования

Обеспечение требуемой температурной стабильности параметров не может быть достигнуто при использовании одного внутреннего кольца регулирования температуры. Значительно лучшие результаты достигаются при применении внешнего термостата, позволяющего обеспечить внутри объема фильтра равномерное температурное поле, постоянное во времени, и при изменении температуры окружающей среды.

Время установления температуры в камере термостата зависит не только от параметров термостата, мощности нагревательных элементов, но и от собственной постоянной времени τ_0 , определяемой тепловой инерцией (массой) фильтра. Сокращение τ_0 достигается применением системы внутреннего термостатирования.

Были изготовлены макеты термостабилизированного фильтра с внутренней и внешней системами термостатирования, схемы электронного регулирования и проведены климатические испытания. На рис.3 показаны временные зависимости температур окружающей среды (кривая 1), корпуса фильтра (кривая 2) и уходов частоты (кривая 3). Уход частоты в диапазоне температур $-50 \div +60^\circ\text{C}$ не превышал 4 МГц.

Как показал анализ результатов эксперимента, уход частоты $\Delta f_{\varphi} = 4$ МГц в значительной степени обусловлен смещением рабочих точек транзисторов схемы регулирования. Тщательная

настройка схемы регулирования, выбор рабочих режимов и термостабильных типов транзисторов позволяет снизить температурный дрейф частоты фильтра.

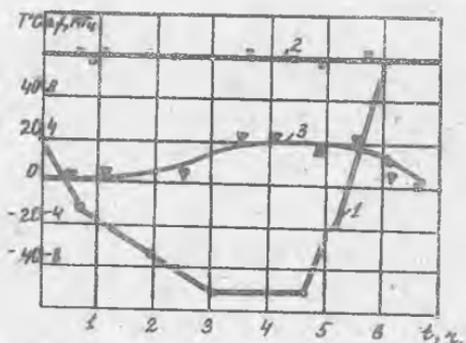


Рис.3. Экспериментальные характеристики термостабилизированного фильтра

Л и т е р а т у р а

1. Сафьянтьевский А.П. Анализ характеристик взаимных полосовых ферритовых фильтров с помощью теории цепей. "Электронная техника", сер.7; "Ферритовая техника", вып. 5, 1969.
2. Беляков С.В. Анализ температурной нестабильности ферритовых гиromaгнитных резонаторов - В сб.: Физика магнитных явлений. Материалы УП Всесоюзной школы-семинара по гиromaгнитной электронике и электродинамике. Ашхабад, 1973.
3. Соголиев К.А. и др. Радиоприемники СВЧ. М., Воениздат, 1967.

4. В а р т а н а с я н В.А. Радиоэлектронная разведка. М., Воениздат. 1975.
5. *Buck Daniel C., Schelenberg James M., Temperature-independent VIG - filter. Пат. США №3648199.*
6. П о л у х и н Ю.Н., Р а х а е в А.А. Собственные частоты прецессии намагниченности двух близко расположенных ферритовых сфер. Сборник докладов на II Международной конференции по Гидромагнитной электронике и электродинамике, ч. I, 1974.

В.М. Барсуков, А.Н. Попов

ПРОХОЖДЕНИЕ ГИДРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ЧЕРЕЗ ИОНОСФЕРУ

Проблема геомагнитных пульсаций к настоящему времени наиболее полно изложена в монографиях [1] - [3].

В работе [1] основной акцент сделан на исследовании собственных колебаний магнитосферного резонатора с его чрезвычайно сложной для анализа топологией. Авторы работ [2], [3], напротив, на примерах простейших геометрических конфигураций рассматривают задачи возбуждения геомагнитных пульсаций сторонними источниками. Однако во всех отмеченных работах недостаточно полно изучен вопрос о прохождении геомагнитных пульсаций через ионосферу.

Авторы [1] считают ионосферу прозрачной для пульсаций и, по существу, переносят граничные условия для электромагнитного поля с поверхности Земли на торцы силовых трубок, опирающихся на ионосферу.

В работах [2], [3] предприняты попытки учесть влияние ионосферы, которая аппроксимируется бесконечно тонкой гиротропной плоскостью. Волны в толще ионосферы, таким образом, не рассматриваются, и поэтому возможность подобной аппроксимации представляется недостаточной аргументированной.

Следует отметить также цикл работ [4] - [6], посвященных исследованию низкочастотных волновых процессов в неоднородной ионосфере. Однако в них не анализируются магнитосферные участки, а для верхней границы ионосферы задается падающее поле в виде плоских волн с вещественным волновым числом. Ясно, что эти волны не являются собственными для магнитосферной плазмы. Учет же комплексных значений волновых чисел для волн, падающих из магнитосферы на ионосферу