

УДК 539.216.  
22:621.  
391:822

А. М. Бузько  
В. В. Потемкин

АМПЛИТУДНЫЕ И ФАЗОВЫЕ ФЛУКТУАЦИИ  
В ТОНКИХ МАГНИТНЫХ ПЛЕНКАХ

В работе исследованы амплитудные и фазовые флуктуации первой гармоники сигнала перемагничивания тонких магнитных пленок на основе фазового детектирования. Дан теоретический анализ метода и получены экспериментальные спектральные характеристики амплитудных и фазовых шумов.

При исследовании шумов, возникающих в процессе циклического перемагничивания тонких магнитных пленок (ТМП), представляют интерес «медленные» флуктуации намагниченности. С ними связаны подъемы спектральной плотности флуктуаций намагниченности вблизи нулевой частоты наблюдения, а также в окрестностях гармоник частоты накачки [1]. Для получения фазовой информации процесса образования магнитного шума нами исследовались «медленные» амплитудные и фазовые флуктуации первой гармоники сигнала перемагничивания ТМП. Блок-схема измерительной установки представлена на рис. 1. Здесь колебания задающего генератора через усилитель мощности поступают в перемагничивающую обмотку пленки. В съемной обмотке наведенная перемагничивающим полем э.д.с. компенсируется с помощью встречного витка. Снимаемая с этой обмотки первая гармоника сигнала перемагничивания ТМП после усиления по амплитуде подается на высокочастотный фазовый детектор. В этом детекторе опорным сигналом служит усиленное колебание генератора накачки, прошедшее через фазовращатель. После квадратичного балансного детектирования усиленные флуктуации подаются на анализатор спектра. Приведем основные этапы теоретического анализа работы этой схемы.

**Теоретическая часть.** Напряжение первой гармоники сигнала  $U_1$ , подаваемое с пленки на вход детектора, может быть представлено в виде

$$U_1 = U_1 \left\{ [1 + \alpha(t) + \beta(t)] \cos \left[ \omega_0 t + \int_{t_0}^t v(x) dx \right] + \right. \\ \left. + \varphi(t) \sin \left[ \omega_0 t + \int_{t_0}^t v(x) dx \right] \right\} + z(t), \quad (1)$$

где  $\omega_0$  — частота накачки,  $\alpha(t)$  и  $\varphi(t)$  — «медленные» амплитудные и фазовые флуктуации, обусловленные собственными шумами пленки,  $\beta(t)$  — относительные амплитудные флуктуации, обусловленные шумами генератора накачки и «медленными» флуктуациями параметров канала перемагничивания,  $v(t)$  — частотные флуктуации генератора накачки,  $z(t)$  — флуктуации эталонного генератора шума на входе детектора

$$z(t) = \xi(t) \cos \omega_0 t - \eta(t) \sin \omega_0 t.$$

Тогда опорное напряжение можно записать следующим образом:

$$U_{оп} = U_0 [1 + \gamma(t)] \cos \left[ \omega_0 t + \int_{t_0}^{t+\tau_0} \nu(x) dx + \varphi_0 \right], \quad (2)$$

где  $\gamma(t)$  — относительные амплитудные флуктуации, обусловленные шумами генератора и «медленными» флуктуациями параметров опорного канала,  $\tau_0$  — разность времен задержки сигнала генератора в опорном и перематничивающем каналах,  $\varphi_0$  — постоянный набег фазы колебания в опорном канале относительно канала перематничивания.

Введем естественное предположение малости рассматриваемых флуктуаций, т. е. будем считать  $\alpha^2 \ll 1$ ,  $\beta^2 \ll 1$ ,  $\beta^2 \ll 1$ ,  $\gamma^2 \ll 1$ ,  $\nu^2 \ll \omega_0^2$ . Тогда для напряжения на выходе детектора в первом приближении получим:

$$U(t) = K \frac{U_1 U_0}{2} \left\{ [1 + \alpha(t) + \beta(t) + \gamma(t)] \cos \varphi_0 - \varphi(t) \sin \varphi_0 \right\} + k \frac{U_0}{2} \left\{ \xi(t) \cos \left[ \int_{t_0}^{t+\tau_0} \nu(x) dx + \varphi_0 \right] + \eta(t) \sin \left[ \int_{t_0}^{t+\tau_0} \nu(x) dx + \varphi_0 \right] \right\}, \quad (3)$$

где  $k$  — постоянная, определяемая параметрами детектора. Функция корреляции этого сигнала в общем случае имеет громоздкий вид. Поэтому приведем ее для практически используемого нами случая, основанного на следующих условиях эксперимента: во-первых, для исключения эффекта детектирования частотных флуктуаций генератора накачки времена задержки его сигнала в каждом канале подбирались близкими, т. е. выполнялось условие:  $\omega_0 \tau_0 < 1$ ; во-вторых, уровень измеряемых флуктуаций  $\alpha(t)$  и  $\varphi(t)$  не менее чем на

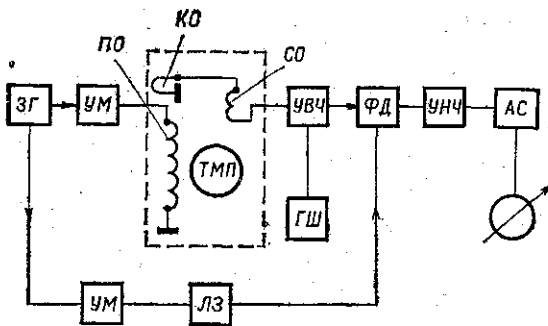


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения амплитудных и фазовых шумов первой гармоники намагниченности ТМП. ЗГ — задающий генератор накачки, УМ — усилитель мощности, УВЧ — резонансный усилитель первой гармоники накачки, ЛЗ — линия задержки, ФД — фазовый детектор, УНЧ — усилитель низкой частоты, АС — анализатор спектра, ПО — перематничивающая обмотка, СО — съемная обмотка, КО — компенсационная обмотка, Э — электромагнитный экран, ГШ — эталонный генератор шума

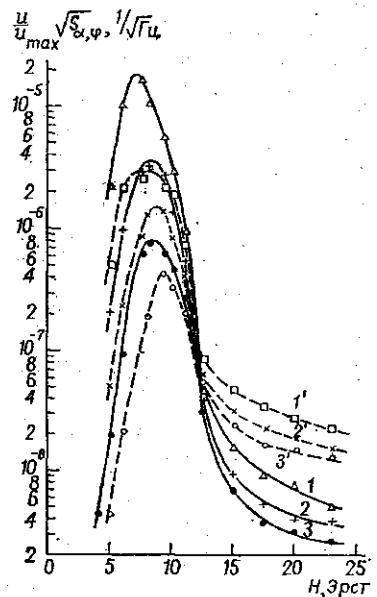


Рис. 2. Зависимости спектральной плотности флуктуаций амплитуды и фазы первой гармоники сигнала перематничивания ТМП.  $f_0 = 5$  МГц,  $F$ : 1 и 1' = 2, 2 и 2' = 15, 3 и 3' = 150 кГц

порядок превосходил чувствительность установки. С учетом порядка малости названных компонентов сигнала в предположении, что флуктуации приращений фазы генератора стационарны и имеют нормальное

симметричное распределение, производя статистическое и временное усреднение произведения  $U(t)U(t+\tau)$ , получим функцию корреляции для сигнала на выходе детектора:

$$\Phi_u(\tau) = k^2 \frac{U_1^2 U_0^2}{4} \left\{ [1 + \Phi_\alpha(\tau)] \cos^2 \varphi_0 + \Phi_\varphi(\tau) \sin^2 \varphi_0 - \Phi_{\alpha\varphi}^0(\tau) \sin 2\varphi_0 + \frac{\Phi_\xi(\tau)}{U_1^2} e^{-\chi(\tau)} \right\}, \quad (4)$$

где  $\chi(\tau)$  — дисперсия ухода фазы генератора накачки за время  $\tau$ ,  $\Phi_{\alpha\varphi}^0(\tau)$  — четная составляющая совместной корреляционной функции амплитудных и фазовых флуктуаций ТМП.

Принимая во внимание малую ширину спектральной линии генератора накачки, в пределах которой спектральная плотность флуктуаций генератора шума постоянна [2], легко получить спектральную плотность протектированного сигнала, выраженную через спектральные распределения его отдельных слагаемых:

$$S_u(\Omega) = \frac{k^2 U_1^2 U_0^2}{4} \left\{ [\delta(\Omega) + S_\alpha(\Omega)] \cos^2 \varphi_0 + S_\varphi(\Omega) \sin^2 \varphi_0 - S_{\alpha\varphi}^0(\Omega) \sin 2\varphi_0 + \frac{S_\xi(\Omega)}{U_1^2} \right\}. \quad (5)$$

Односторонняя спектральная плотность флуктуаций генератора шума  $W_z(f_0 + F)$  связана со спектральными плотностями ортогональных компонентов  $S_\xi(F)$  и  $S_\eta(F)$  следующим образом:

$$W_z(f_0 + F) = \frac{1}{2} [S_\xi(F) + S_\eta(F)] = S_\xi(F). \quad (6)$$

Поэтому рабочая формула для измерения спектральных плотностей амплитудных  $S_\alpha(F)$  и фазовых  $S_\varphi(F)$  флуктуаций первой гармоники сигнала перемагничивания пленки и их совместной четной спектральной плотности  $S_{\alpha\varphi}^0(F)$  имеет вид

$$S_\alpha(F) \cos^2 \varphi_0 + S_\varphi(F) \sin^2 \varphi_0 - S_{\alpha\varphi}^0(F) \sin 2\varphi_0 = \frac{W_z(f_0 + F)}{U_1^2}. \quad (7)$$

Измеряя спектральную плотность флуктуаций при различных значениях фазы опорного сигнала, например при  $\varphi_0 = 0, \pm\pi/4, \pi/2$ , можно легко определить ее отдельные слагаемые.

**Экспериментальная часть.** Высокочастотный фазовый детектор был выполнен по методике, предложенной в работе [3]. Изменение фазы опорного сигнала в измерительной установке достигалось с помощью включения отрезков коаксиального кабеля необходимой длины. Опорное напряжение не менее чем на порядок превышало измеряемое и при изменении фазы поддерживалось постоянным.

На рис. 2 представлены зависимости спектральных плотностей флуктуаций амплитуды (сплошные линии) и фазы (пунктирные линии) от амплитуды поля накачки, действующего по оси легкого намагничивания пленки. Спектральные плотности «нормированы» на максимальное значение первой гармоники  $U_{1\max}$ . Параметром является частота наблюдения  $F$ . Анализ кривых показывает, что на ранних стадиях перемагничивания преобладают амплитудные флуктуации. При перемагничивании с насыщением начинают доминировать фазовые флуктуации, а роль амплитудных становится незначительной. Сопоставление кривых 1, 2, 3 или 1', 2', 3' указывает на наличие подъема спектральной плотности шума в окрестности первой гармоники частоты перемагничивания и на различные спектральные распределения магнитного шума в сильных и слабых полях накачки.

На рис. 3 приведены зависимости спектральных плотностей амплитудных (сплошные линии) и фазовых (пунктирные линии) флуктуаций от частоты наблюдения при перемагничивании пленки по оси трудного намагничивания. В случае такой ориентации ТМП во всем интервале полей накачки преобладают фазовые флуктуации над амплитудными. В малых полях перемагничивания (кривые 1, 1', 2 и 2') спектры амплитудных и фазовых шумов узкополосные, так что в полосе анализируемых частот зафиксирован их спад, пропорциональный  $1/F^2$ . По мере

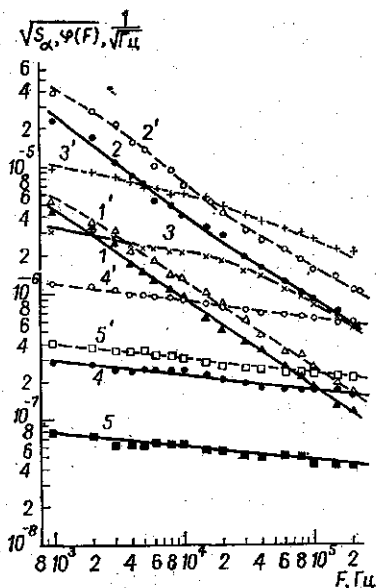


Рис. 3. Спектральные распределения амплитудных и фазовых флуктуаций первой гармоники сигнала перемагничивания ТМП.  $f_0 = 5$  МГц,  $H_h = 5$  э,  $H$ : 1 и 1' = 2,2, 2 и 2' = 2,7, 3 и 3' = 4,2, 4 и 4' = 6 и 5 и 5' = 9 э

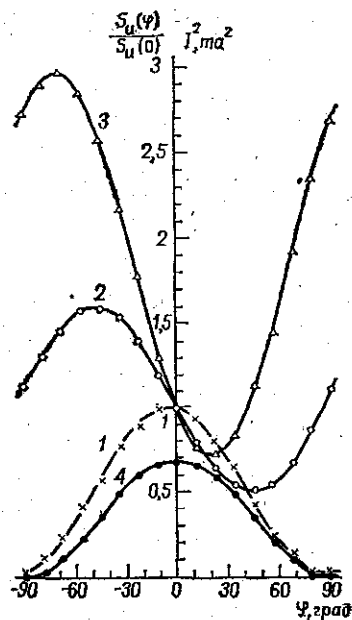


Рис. 4. Зависимости спектральной плотности флуктуаций на выходе детектора от фазы опорного сигнала,  $f_0 = 5$  МГц,  $F = 15$  кГц,  $H$ : 1—9, 2—12, 3 и 4—15 э

увеличения амплитуды накачки верхняя граница спектров перемещается в сторону больших частот наблюдения, и для кривых 3 и 3' она попадает в полосу анализируемых частот. При перемагничивании с насыщением (кривые 4, 4', 5 и 5') спектральное распределение магнитного шума подчиняется закону  $\text{const}/F^\alpha$ , где  $\alpha \approx 0,6$ .

На рис. 4 изображены зависимости спектральных плотностей флуктуаций на выходе детектора (кривые 1—3) и квадрата постоянной составляющей тока детектора (кривая 4) от фазы опорного сигнала. Перемагничивание пленки осуществлялось по оси легкого намагничивания. При небольших полях накачки (кривая 1) преобладают амплитудные флуктуации. Наоборот, при больших полях накачки  $H$  (кривая 3) преобладают фазовые флуктуации. Несимметричное расположение кривых 1—3 относительно оси ординат отражает наличие корреляции между амплитудными и фазовыми шумами первой гармоники намагниченности пленки. В самом деле, согласно полученной формуле (5) совместную спектральную плотность амплитудных и фазовых флуктуаций можно выразить через спектральные распределения на выходе детектора при двух значениях фазы:

$$S_{\alpha\varphi}^0(F) = 2[S_u(F, -\varphi_0) - S_u(F, \varphi_0)] / [(kU_1U_0)^2 \sin 2\varphi_0]. \quad (8)$$

Для количественной оценки степени корреляции рассмотрим коэффициент корреляции  $\rho$ :

$$\rho = \frac{\Phi_{\alpha\varphi}^0(0)}{\sqrt{\Phi_{\alpha}(0)\Phi_{\varphi}(0)}}. \quad (9)$$

Поскольку  $\Phi(0) = \int_{-\Omega_{\max}}^{\Omega_{\max}} S_x(\Omega) d(\Omega)$ , то для практического определения

коэффициента корреляции требуется интегрирование спектральных распределений  $S_{\alpha}(F)$ ,  $S_{\varphi}(F)$  и  $S_{\alpha\varphi}^0(F)$  в полосе частот более широкой, чем позволяют экспериментальные возможности. Однако если остановиться на разумном предположении, что во всем интервале частот интегрирования спектральные плотности изменяются по одинаковому закону, то можно в (9) дисперсии флуктуаций заменить среднеквадратичными значениями в узкой одинаковой полосе частот наблюдения. Тогда коэффициент корреляции будет иметь вид

$$\rho = S_{\alpha\varphi}^0(F) / \sqrt{S_{\alpha}(F)S_{\varphi}(F)}. \quad (10)$$

Вычисленный по этой формуле коэффициент корреляции для кривых 1—3 рис. 4 равен  $0,5 \pm 0,1$ . Он указывает на значительную связь между амплитудными и фазовыми флуктуациями.

Таким образом, на основании проведенных экспериментальных исследований флуктуаций первой гармоники сигнала перемагничивания ТМП можно сделать следующие выводы.

«Медленные» флуктуации намагниченности, обуславливающие подъемы спектральной плотности магнитного шума вблизи нулевой частоты наблюдения, а также в окрестностях кратных гармоник накачки [1], представляют собой флуктуации перемагничиваемого объема пленки и моментов ее «переключения».

При циклическом перемагничивании ТМП с глубоким насыщением основной вклад в подъемы спектральной плотности магнитного шума дают «медленные» флуктуации моментов прохождения размагниченных состояний образца.

В режиме перемагничивания без насыщения соотношение между фазовыми и амплитудными флуктуациями намагниченности зависит от формы петли гистерезиса. При воздействии накачки вдоль оси легкого намагничивания пленки преобладают амплитудные флуктуации, а по оси трудного намагничивания — фазовые.

Спектральные распределения «медленных» флуктуаций амплитуды и фазы сигнала перемагничивания ТМП носят одинаковый характер и в режиме перемагничивания с насыщением подчиняются закону  $\text{const}/F^{\alpha}$ , где  $\alpha \ll 1$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бузько А. М., Потемкин В. В. «Вестн. Моск. ун-та. Физ., астроном.», 1974, 15, № 3, 352.
2. Малахов А. Н. Флуктуации в автоколебательных системах. М., 1968.
3. «Electronics», 1958, 31, 42.

Поступила в редакцию  
20.6.1976 г.  
Кафедра  
физики колебаний