

А. А. КИТАЙЦЕВ

## ФИЛЬТРАЦИЯ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО СВЧ-СИГНАЛА ИЗ ШУМА ФЕРРИТОВЫМ ДАТЧИКОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Известно, что при подаче двух электромагнитных сигналов с несущими частотами  $f_1$  и  $f_2$  на нелинейный элемент возможны условия, при которых наблюдается явление перекрестной модуляции, то есть амплитудная либо фазовая модуляция сигнала с несущей частотой  $f_1$  переносится на другой сигнал  $f_2$ . Используя явление перекрестной модуляции в феррите [1, 2] Михайловским Л. К. был предложен новый способ измерения напряженности магнитного поля и мощности СВЧ колебаний. В качестве рабочего элемента использовался ферритовый датчик преобразователь (ФДП), состоящий из ферритового образца, охваченного несколькими витками провода и диэлектрической подложки. При измерении ФДП помещается в волновод и намагничивается до насыщения постоянным магнитным полем  $H_0$ . На датчик подается поперечное (относительно  $H_0$ ) СВЧ магнитное поле с несущей частотой  $\omega$  и относительно низкочастотное изменяющееся с частотой  $\Omega$  продольное магнитное поле. В результате взаимодействия двух сигналов в спектре продольной составляющей намагниченности ( $M_z$ ) ферритового образца появляются гармоники частоты модуляции  $\Omega$ . При изменении  $M_z$ , в катушке ФДП наводится эдс. Наведенный сигнал с катушки ФДП поступает на усилитель промежуточной частоты (УПЧ), который служит для фильтрации одной из гармоник эдс. Амплитуда каждой гармоники пропорциональна мощности СВЧ сигнала.

В некоторых случаях измерение мощности СВЧ колебаний или напряженности магнитного СВЧ поля происходит в присутствии СВЧ шума. Результат и погрешность измерения будут зависеть от величины отношения сигнал/шум на входе ФДП. Поэтому необходимо рассмотреть вопросы, связанные с выделением монохроматического сигнала из шума ФДП и найти выражения для расчета отношения сигнал/шум на выходе УПЧ в зависимости от отношения сигнал/шум на входе ФДП.

Работа ФДП определяется поведением продольной составляющей вектора намагниченности. Выражение для  $M_z$  найдем, решая

уравнение движения с помощью подстановки, примененной в работе [3]. Для случая расположения ФДП в точке с линейной поляризацией магнитного СВЧ поля решение записывается в виде:

$$M_z = M_s - \frac{\omega_m^2 + b^2}{2M_s} [\xi_1^2(t) + \xi_2^2(t)], \quad (1)$$

где

$M_s$  — намагниченность насыщения,

$$\omega_m = \mu_0 \gamma M_s; \quad b = \omega_r \frac{\chi_0}{\mu_0}; \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{сН}}{\text{м}},$$

$\omega_r$  — частота релаксации,

$\gamma$  — гиромагнитное отношение,

$\chi_0$  — статическая восприимчивость.

$$\xi_1(t) = e^{-\delta t} \int_0^t e^{\delta t} h_y(x) \sin \alpha dx \quad (2)$$

$$\xi_2(t) = e^{-\delta t} \int_0^t e^{\delta x} h_y(x) \cos \alpha dx$$

$$\delta = \omega_r \left( 1 + \frac{\chi_0}{\mu_0} \right)$$

$h_y(t)$  — поперечное СВЧ магнитное поле

$$\alpha = \omega_0 t + q \sin \Omega t,$$

$$\omega_0 = \mu_0 \gamma H_0,$$

$q = \frac{\mu_0 \gamma h_z}{\Omega}$  — нормированная амплитуда модуляции,

$h_z$  — амплитуда переменного продольного магнитного поля.

ЭДС, которая возникает в катушке ФДП, равна

$$\varepsilon = Z \frac{dM_z}{dt}, \quad (3)$$

где  $Z$  — параметр, определяемый геометрическими размерами ФДП.

В рассматриваемом случае СВЧ поле можно представить в виде суммы

$$h_y(t) = h(t) + h_c(t). \quad (4)$$

Считаем, что  $h(t) = h \cos \omega t$  — монохроматический сигнал, а  $h_c(t)$  — нормальный, стационарный случайный процесс с нулевым средним значением, спектр его равномерен, много шире полосы ФМР и равен  $2N$ . Вначале находим статистические характеристики случайных функций  $\xi_1(t)$  и  $\xi_2(t)$ . На этом этапе решение задачи проводим независимо для сигнала и шума. Оказывается, что  $\xi_1(t)$  и  $\xi_2(t)$  некоррелированы. Дисперсии  $\sigma_1^2$ ,  $\sigma_2^2$  и коэффициенты корреляции  $R_1(\tau)$ ,  $R_2(\tau)$  случайных процессов  $\xi_1(t)$  и  $\xi_2(t)$  были вычислены нами ранее [4] и соответственно равны.

$$\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2 = \frac{N}{4\delta}.$$

$$R_1(\tau) = R_2(\tau) = R(\tau) = e^{-\delta|\tau|}.$$

Так как СВЧ поле имеет нормальный закон распределения, то закон распределения  $\xi_1(t)$ ,  $\xi_2(t)$  и их совместное распределение также будут нормальными. Форма записи корреляционных функций одинакова, поэтому приводим здесь выражение лишь для одной корреляционной функции, случайного процесса  $\xi_1(t)$ :

$$B(t, \tau) = \sigma^4 + \sigma^2 [\xi_{1g}^2(t) + \xi_{1g}^2(t+\tau)] + \xi_{1g}^2(t) \xi_{1g}^2(t+\tau) + \\ + 4\xi_{1g}(t) \xi_{1g}(t+\tau) R(\tau) + 2\sigma^4 R^2(\tau),$$

где  $\xi_{1g}(t)$  — функция, полученная из 2 при  $h_c(t) = 0$ . Используя полученные результаты, из 1 найдем корреляционную функцию продольной составляющей намагниченности:

$$B(t, \tau) = \left[ \frac{b^2 + \omega_M^2}{2M_s} \right]^2 \cdot \{ 4\sigma^2 + 2\sigma^2 [\xi_{1g}^2(t) + \xi_{1g}^2(t+\tau) + \xi_{2g}^2(t) + \\ + \xi_{2g}^2(t+\tau)] + 4\sigma^2 [\xi_{1g}(t) \xi_{1g}(t+\tau) + \xi_{2g}(t) \xi_{2g}(t+\tau)] + \\ + [\xi_{1g}^2(t) \xi_{1g}^2(t+\tau) + \xi_{2g}^2(t) \xi_{2g}^2(t+\tau) + \xi_{1g}^2(t) \xi_{2g}^2(t+\tau) + \\ + \xi_{1g}^2(t+\tau) \xi_{2g}^2(t) + 4\sigma^4 R^2(\tau) \}. \quad (5)$$

Поскольку корреляционная функция зависит от времени  $t$ , то, прежде чем вычислять энергетический спектр, необходимо произвести ее усреднение [5].

$$B^*(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \cdot \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} B(\tau, t) dt.$$

После усреднения получаем

$$B^*(\tau) = \left[ \frac{b^2 + \omega_M^2}{2M_s} \right]^2 \cdot \{ 4\sigma^4 + 4\sigma W + 4\sigma K(\tau) R(\tau) + \\ + E(\tau) + 4\sigma^4 R^2(\tau) \}, \quad (6)$$

где  $W = \frac{h^2}{(2\delta)^2} \cdot \Psi_0(a, \rho, q)$ .

$$K(\tau) = \frac{h^2}{(2\delta)^2} \cdot \sum_{-\infty}^{+\infty} L_n^2 \cos(n\Omega + \Delta)\tau.$$

$$L_n = \frac{I_n(q)}{\sqrt{1 + (n\rho + a)^2}}.$$

$$E(\tau) = \left[ \frac{h^2}{(2\delta)^2} \right]^2 \cdot \left\{ \Psi_0^2(a, \rho, q) + \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \Psi_n^2(a, \rho, q) \cos n\Omega\tau \right\}.$$

$a = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega \delta}$  — относительная расстройка,

$\rho = \frac{\Omega}{\delta}$  — относительная частота модуляции,

$I_n(g)$  — функция Бесселя,

$\Psi_n(a, \rho, q)$  — амплитуда « $n$ » гармоники продольной составляющей намагниченности при воздействии на ФДП монохроматического сигнала.

Подставляя (6) в формулу Хинчина-Винера, находим энергетический спектр продольной составляющей намагниченности

$$F(\omega) = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} B^*(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau.$$

Энергетический спектр  $F(\omega)$  состоит из четырех слагаемых

$$F(\omega) = F_0(\omega) + F_{\text{сш}}(\omega) + F_{\text{ш}}(\omega) + F(0). \quad (7)$$

После вычисления интеграла получаем, что энергетический спектр  $F_0(\omega)$  определяется четвертым слагаемым выражения (6) и представляет собой сумму дельта-функций на гармониках частоты модуляции.

$$F_0(\omega) = \left[ \frac{\hbar^2}{(2\delta)^2} \right]^2 \cdot \left[ \frac{\omega_M^2 + b^2}{2M_s} \right]^2 \pi \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n^2(a, \rho, q) \times \\ \times [\delta(\omega - n\Omega) + \delta(\omega + n\Omega)]. \quad (8)$$

Энергетический спектр  $F_{\text{сш}}(\omega)$  определяется третьим слагаемым выражения (6) и равен

$$F_{\text{сш}}(\omega) = \frac{\hbar^2}{(2\delta)^2} \left[ \frac{\omega_M^2 + B^2}{2M_s} \right] \cdot \frac{8q^2}{\delta} \cdot \Phi_n(a, \rho, q, \nu), \quad (9)$$

где

$$\Phi_n(a, \rho, q, \nu) = \sum_{-\infty}^{+\infty} L_n^2 \left[ \frac{1}{1 + (\nu - n\rho - a)^2} + \frac{1}{1 + (\nu + n\rho + a)^2} \right],$$

$\nu = \frac{\omega}{\delta}$  — нормированная частота.

Энергетический спектр  $F_{\text{ш}}(\omega)$  определяется последним членом выражения (6) и равен:

$$F_{\text{ш}}(\omega) = \left[ \frac{b^2 + \omega_M^2}{2M_s} \right] \cdot \left( \frac{N}{\delta} \right)^2 \frac{1}{2\delta} \Lambda(\nu), \quad (10)$$

где

$$\Lambda(\nu) = \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \nu^2}.$$

Дискретная часть спектра дополняется спектральной линией при  $\omega=0$ , представляющей постоянную составляющую.

Преобразованный сигнал с катушки ФДП подается на вход УПЧ, резонансная частота ( $\omega_y$ ) которого совпадает со второй гармоникой частоты модуляции. Из-за того что спектр  $M_z$  может быть представлен в виде суммы (7), мощность на выходе УПЧ также может быть представлена в виде суммы

$$P_{\Sigma} = P_{\text{ш}} + P_c + P_{\text{сш}}, \quad (11)$$

где  $P_{\text{ш}}$  — мощность шума на выходе УПЧ при отсутствии сигнала;

$P_c$  — мощность сигнала на выходе УПЧ;

$P_{\text{сш}}$  — мощность на выходе УПЧ, обусловленная взаимодействием сигнала и шума на феррите.

Каждое слагаемое, входящее в выражение (11), может быть рассчитано с помощью известной формулы [5]

$$P_{\text{вых}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} F_{\Sigma}(\omega) K^2(\omega) d\omega, \quad (12)$$

где  $F_{\Sigma}(\omega)$  — энергетический спектр ЭДС.

$K(\omega)$  — модуль коэффициента усиления УПЧ.

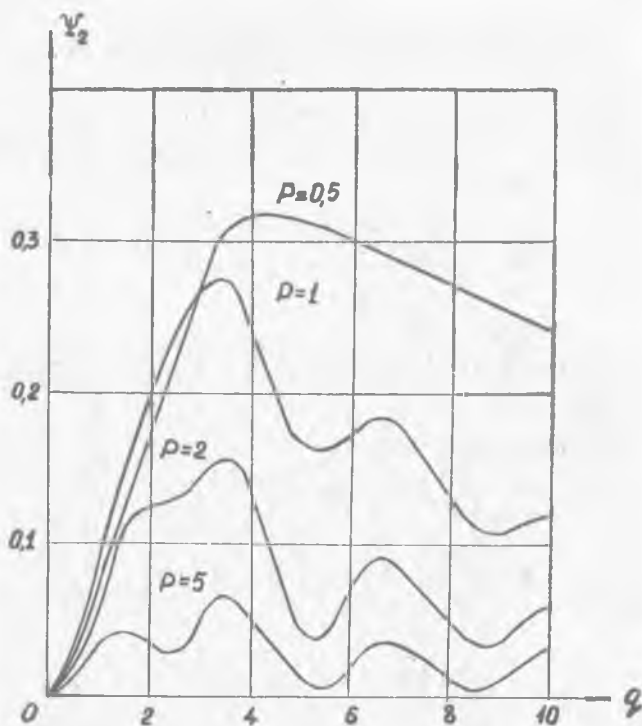


Рис. 1. Зависимость функции  $\Psi_2(a, \rho, q)$  от величины нормированной амплитуды модуляции  $q$  при ФМР ( $a=0$ )

Зная связь продольной составляющей намагниченности с величиной ЭДС (3) и выражением для спектра  $M_z$  (8÷10), с помощью формулы (11) находим отдельные составляющие мощности на выходе УПЧ и после этого записываем отношение сигнал/шум на выходе УПЧ в виде:

$$\alpha = \frac{P_c + P_{сш}}{P_{ш}} = \frac{1}{4} \left[ \frac{\Psi_2^2(a, p, q)}{\Lambda(\nu)} \right] \cdot \frac{\delta}{\Delta f} \left[ \frac{P_c}{P_{шф}} \right]^2 + 2 \left[ \frac{\Phi_2(a, p, q, \nu)}{\Lambda(\nu)} \right] \cdot \left[ \frac{P_c}{P_{шф}} \right], \quad (13)$$

где  $P_c$  — мощность СВЧ сигнала на входе ФДП,

$P_{шф}$  — мощность шума на входе ФДП, приведенная к его ширине полосы.

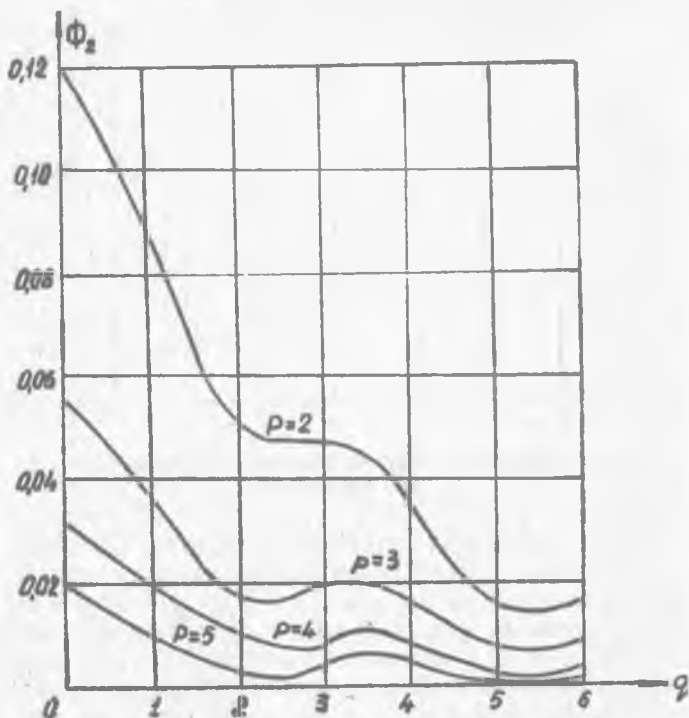


Рис. 2. Зависимость функции  $\Phi_2(a, p, q, \nu)$  от величины нормированной амплитуды модуляции  $q$  при ФМР ( $a=0$ ).

Анализируя функции, входящие в выражение (13), можно показать, что максимальная величина отношения сигнал/шум на выходе УПЧ достигается при ФМР ( $a=0$ ). Для этого случая на рис. 1÷3 показано изменение величины функции  $\Psi_2$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Lambda$  от параметров модулирующего поля. Видно, что путем изменения

частоты и амплитуды  $q$  модулирующего поля можно обеспечить максимум отношения сигнал/шум на выходе УПЧ. Максимум отношения достигается при  $p \geq 1$ ,  $q = 3,5$ .

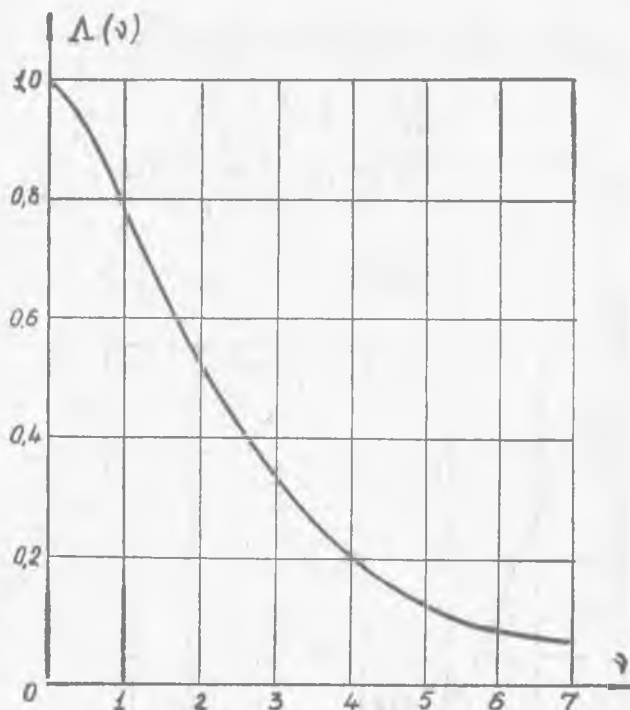


Рис. 3. Зависимость  $\Lambda(\nu)$  от величины нормированной частоты  $\nu$ .

В последнее время для частотной селекции СВЧ сигналов используют систему, состоящую из ферритового полосового фильтра и кристаллического детектора (ФФ-КД). Представляет интерес сравнить величину отношения сигнал/шум на выходе такой системы с аналогичной величиной на выходе УПЧ при выделении сигнала из шума ФДП. При сравнении предполагаем, что ширина полосы пропускания ферритового полосового фильтра совпадает с полосой пропускания ФДП. Выражение для отношения сигнал/шум на выходе системы «полосовой фильтр-детектор» при воздействии монохроматического сигнала и шума известно [6]

$$\alpha_g = 1 + \left[ \frac{P_c}{P_{шф}} \right]. \quad (14)$$

Для случая ФМР и оптимальных значений частоты и амплитуды модулирующего поля выражение (13) преобразуется к виду:

$$\alpha = 1 + \left( \frac{P_c}{P_{шф}} \right) + 6,3 \cdot 10^{-2} \frac{\Delta F}{\Delta f} \left[ \frac{P_c}{P_{шф}} \right]^2, \quad (15)$$

где  $\Delta F = \frac{b}{2}$  — эффективная ширина полосы ФДП,

$\Delta f$  — эффективная ширина полосы УПЧ.

На рис. 4 показана зависимость отношения сигнал/шум на выходе УПЧ от отношения сигнал/шум на входе ФДП при различных значениях отношения  $\frac{\Delta F}{\Delta f}$  ( $2 \div 5$ ). На этом же рисунке приведена аналогичная зависимость для системы «ФФ-КД» — зависимость 1.

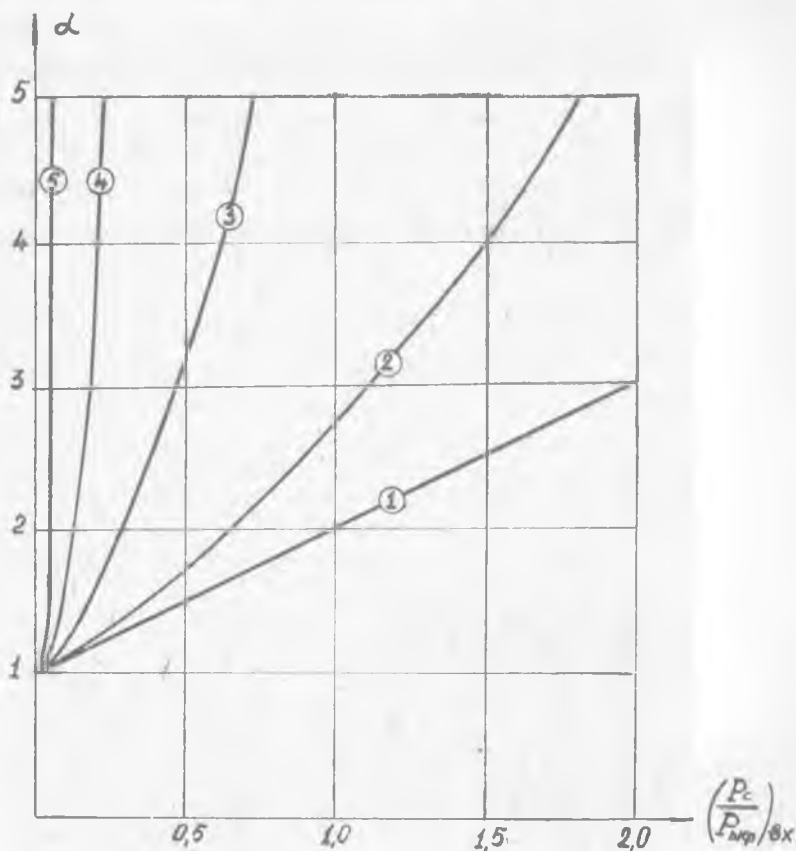


Рис. 4. Зависимость отношения сигнал/шум на выходе УПЧ от отношения сигнал/шум на входе ФДП при различных значениях отношения  $\frac{\Delta F}{\Delta f}$

1 — отношение сигнал/шум для системы «ФФ-КД»; 2 —  $\frac{\Delta F}{\Delta f} = 10$ ;

3 —  $\frac{\Delta F}{\Delta f} = 10^2$ ; 4 —  $\frac{\Delta F}{\Delta f} = 10^3$ ; 5 —  $\frac{\Delta F}{\Delta f} = 10^4$ .



Как видно из приведенных результатов, из-за возможности постановки перед детектором узкополосного УПЧ фильтрация монохроматического СВЧ сигнала из шума осуществляется ФДП более эффективно, чем фильтрация того же сигнала системой «ФФ-КД». Выигрыш от замены «ФФ-КД» на ФДП может достигать  $15 \div 20$  дБ и более.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Михайловский Л. К. «Перекрестная модуляция на феррите». Сб. статей, «Ферриты», Минск, 1960.
  2. Михайловский Л. К. Авторское свидетельство № 163226 по заявке № 822530 от 2. 03. 63 опубликовано в 1964, бюллетень № 12.
  3. Дерюгин И. А., П. С. Куц, В. Л. Стрижевский. «Радиотехника», 1967, 22, 6.
  4. Китайцев А. А. Сб. докладов НТК по итогам НИР за 1968—1969 гг. Секция радиотехническая. Подсекция ферритовой СВЧ радиофизики. МЭИ. М., 1969.
  5. Левин Б. Р. «Теоретические основы статистической радиотехники», ч. I, изд-во «Сов. радио», М., 1966.
  6. Гуткин Л. С. «Преобразование сверхвысоких частот и детектирование». Госэнергоиздат, 1953.
-