

Преобразование СВЧ шума объемным магнитным детектором¹

ШАКИРЗЯНОВ Ф.Н., КИТАЙЦЕВ А.А.

Изложены результаты теоретического и экспериментального исследования воздействия сверхвысокочастотного (СВЧ) шума на объемный магнитный детектор. Показано, что такие детекторы могут быть использованы в схемах преобразования сверхвысокочастотных сигналов.

Ключевые слова: ферриты, ферромагнитный резонанс, объемный магнитный детектор, СВЧ шум, корреляционная функция, спектральная плотность

В публикации [1] было рассмотрено воздействие на объемный магнитный детектор (ОМД) детерминированных сигналов – СВЧ импульсов. Представляет интерес и исследование воздействия на ОМД случайных сигналов. Для исследования поведения вектора намагниченности \bar{M} при воздействии на ОМД СВЧ шума необходимо решить уравнение его движения с релаксационным членом в модифицированной форме Блоха [2]:

$$\frac{d\bar{M}}{dt} = -\gamma_0 \bar{g} [\bar{M} \bar{H}] + \gamma_0 \frac{c_0^i}{\gamma_0} \bar{H} - \frac{\ddot{\bar{M}}}{\gamma_0} \quad (1)$$

где \bar{H} – вектор напряженности эффективного магнитного поля, действующего на \bar{M} ; c_0^i – статическая восприимчивость; γ_0 – частота релаксации; γ_0 – магнитная постоянная; $g = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг – гиромагнитное отношение.

Для решения уравнение (1) сводят к независимым уравнениям для поперечных составляющих $m_x(t)$ и $m_y(t)$ вектора намагниченности. При малых углах прецессии его продольная составляющая M_z связана с поперечными составляющими соотношением

$$M_z(t) = M_0 - \frac{1}{2M_0} [m_x^2(t) + m_y^2(t)], \quad (2)$$

где M_0 – намагниченность насыщения.

При обычных ограничениях, накладываемых на движение вектора намагниченности при решении уравнения (1) (феррит считают изотропным, и его образец имеет форму шара; прецессию вектора намагниченности \bar{M} – однородной; обменным воздействием пренебрегают; эффекты, связанные с распространением электромагнитных волн, отсутствуют; переменные составляющие поля и намаг-

The paper presents the results of theoretical and experimental study of the impact of microwave (MW) of noise on the volumetric magnetic detector. It is shown that volumetric magnetic detectors can be used in microwave circuits convert the signals.

Key words: ferrites, ferromagnetic resonance, volumetric magnetic detector, MW noise, the correlation function, spectral density

ниченности – малые величины по сравнению с постоянными составляющими) и при предположении, что поле СВЧ линейно поляризовано, получим:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 m_x}{dt^2} + 2d \frac{dm_x}{dt} + w_\lambda^2 m_x &= w_M \frac{d}{dt} (h_y^e); \\ \frac{d^2 m_y}{dt^2} + 2d \frac{dm_y}{dt} + w_\lambda^2 m_y &= K h_y^e(t) + w_r \frac{c_0^i}{\gamma_0} \frac{d}{dt} (h_y^e). \end{aligned} \quad (3)$$

Коэффициенты в (3) равны:

$$2d = \frac{c_0^i}{\gamma_0} \left(1 + \frac{1}{3} \frac{c_0^i}{\gamma_0} w_r \right);$$

$$w_\lambda^2 = d^2 + w_p^2; \quad w_M = \gamma_0 g M_0; \quad w_p = \gamma_0 g H_0;$$

$$K = \frac{c_0^i}{\gamma_0} w_r d + w_M w_p,$$

где $h_y^e(t)$ – временная функция составляющей напряженности СВЧ магнитного поля по оси y .

Будем считать, что функция составляющей напряженности поля СВЧ $h_y^e(t)$ представляет собой нормальный стационарный случайный процесс, спектр которого равномерен, много шире полосы ферромагнитного резонанса и равен $2N$. В результате решения должно быть получено выражение для энергетического спектра продольной составляющей намагниченности M_z . Воспользовавшись выражением (2), найдем корреляционную функцию

$$B_z(t) = \frac{1}{4M_0^2} \{ B_x(t) + B_y(t) + B_{xy}(t) + B_{yx}(t) \}, \quad (4)$$

где $B_x(t)$, $B_y(t)$ – корреляционные функции квадратов составляющих $m_x(t)$, $m_y(t)$; $B_{xy}(t)$, $B_{yx}(t)$ –

¹ Работа проводилась при поддержке и для реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.» Контракт № П 1011.

взаимные корреляционные функции квадратов составляющих $m_x(t)$, $m_y(t)$.

Так как поле СВЧ характеризуется нормальным законом распределения, то закон распределения составляющих вектора намагниченности $m_x(t)$, $m_y(t)$ и их закон совместного распределения также будут нормальными. Поэтому корреляционные функции квадратов составляющих равны [3]:

$$\begin{aligned} B_x(t) &= s_x^4 [1 + 2R_x^2(t)]; \\ B_y(t) &= s_y^4 [1 + 2R_y^2(t)], \end{aligned} \quad (5)$$

где s_x , s_y , $R_x(t)$, $R_y(t)$ могут быть найдены согласно [2] спектральным методом:

$$\begin{aligned} s_x^2 &= \frac{NwM^2}{4d}; \quad s_y^2 = \frac{NwM^2}{4dw_\lambda^2}; \\ R_x(t) &= e^{-dt} |\cos w_p t \sin w_p t|; \\ R_y(t) &= e^{-dt} |\cos w_p t + \frac{d}{w_p} \sin w_p t| \end{aligned}$$

Для нахождения взаимной корреляционной функции воспользуемся выражением [2]:

$$B_{xy}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} m_x^2 m_y^2 W_2(m_x, m_y, t) dm_x dm_y, \quad (6)$$

где $W_2(m_x, m_y, t)$ – двумерный закон распределения составляющих $m_x(t)$, $m_y(t)$.

Для вычисления интеграла (6) применим прямой метод вычисления корреляционной функции [3]. Этот метод основан на разложении в ряд двумерной плотности вероятности по ортогональным полиномам. Если в качестве весовой функции принять одномерный нормальный закон распределения, то совокупностью ортогональных полиномов, по которым можно разложить в ряд двумерную функцию распределения, являются полиномы Эрмита. Это разложение имеет вид [3]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2p\sqrt{1-R_{xy}^2}} \exp\left\{-\frac{x^2 - 2R_{xy}xy + y^2}{2(1-R_{xy}^2)}\right\} &= \\ = \frac{1}{2p} e^{-\frac{x^2+y^2}{2}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{R_{xy}^n}{n!} H_n(x) H_n(y), \end{aligned} \quad (7)$$

где $x s_x = m_x$, $y s_y = m_y$; $H_n(x)$, $H_n(y)$ – ненормированные полиномы Эрмита; $R_{xy}(t)$ – коэффициент взаимной корреляции составляющих $m_x(t)$, $m_y(t)$.

После подстановки (7) в (6) находим $B_{xy}(t)$:

$$B_{xy}(t) = s_x^2 s_y^2 [1 + 2R_{xy}^2(t)]. \quad (8)$$

Аналогично

$$B_{yx}(t) = s_x^2 s_y^2 [1 + 2R_{yx}^2(t)], \quad (9)$$

где $R_{xy}^2(t) = R_{yx}^2(-t)$.

Используя (5), (4) и (8), находим выражение для корреляционной функции продольной составляющей намагниченности:

$$\begin{aligned} B_z(t) &= \frac{1}{4M_0^2} (s_x^4 + s_y^4 + 2s_x^2 s_y^2) + \\ &+ \frac{s_x^4}{2M_0^2} R_x^2(t) + \frac{s_y^4}{2M_0^2} R_y^2(t) + \\ &+ \frac{s_x^2 s_y^2}{2M_0^2} R_{xy}^2(t) + \frac{s_x^2 s_y^2}{2M_0^2} R_{yx}^2(t) \end{aligned} \quad (10)$$

Энергетический спектр продольной составляющей намагниченности M_z определяется преобразованием Фурье от $B_z(t)$.

$$S(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} B_z(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (11)$$

Из (10) видно, что первое слагаемое определяет постоянную составляющую, а второе – непрерывную часть энергетического спектра. Спектр непрерывной части спектра равен сумме

$$S_H(w) = S_H^H(w) + S_H^B(w),$$

где $S_H^H(w)$ и $S_H^B(w)$ – спектры, расположенные соответственно в области видеочастот и в области $2w_\lambda$.

При анализе работы ОМД при воздействии СВЧ шума представляет интерес лишь видеоспектр, который находится подстановкой (10) в (11):

$$S_H^H(w) = \frac{1}{M_0^2} (s_x^2 + s_y^2)^2 \frac{2d}{(2d)^2 + w^2}. \quad (12)$$

При изменении составляющей M_z в катушке МД наводится ЭДС

$$e = -Z_e \frac{dM_z}{dt}, \quad (13)$$

где Z_e — коэффициент, учитывающий геометрические размеры магнитного детектора.

С помощью (13) и (12) может быть найдено выражение для энергетического спектра ЭДС:

$$S_e(W) = \frac{Z_e^2 (s_x^2 + s_y^2)^2}{M_0^2} 2d \frac{W^2}{(2d)^2 + W^2}. \quad (14)$$

Для более ясного определения зависимости энергетического спектра ЭДС от частоты нормируем выражение (14) к максимальному значению спектра:

$$S_e^N(W) = \frac{W^2}{(2d)^2 + W^2}. \quad (15)$$

Экспериментальная проверка теоретических результатов проводилась по известной методике с использованием схемы, изображенной на рис. 1. При подаче на феррит СВЧ шума в катушке ОМД возникает ЭДС. Энергетический спектр ЭДС определяется с помощью селективного перестраиваемого измерительного приемника (ИП-12, $2Df = 9$ кГц). На каждой частоте настройки приемника шумовая мощность, попадающая в полосу, сравнивалась с известной мощностью сигнала от стандартного генератора. При одном и том же угле отклонения стрелки выходного индикатора (при подаче либо только шума, либо только калиброванного сигнала) считали, что мощность шума в полосе приемника равна мощности сигнала. При проведении экспериментов использовались ОМД, выполненные на базе ферритовых сфер из монокристаллов железо-иттриевого граната с различной шириной полос $2DH$ ферромагнитного резонанса.

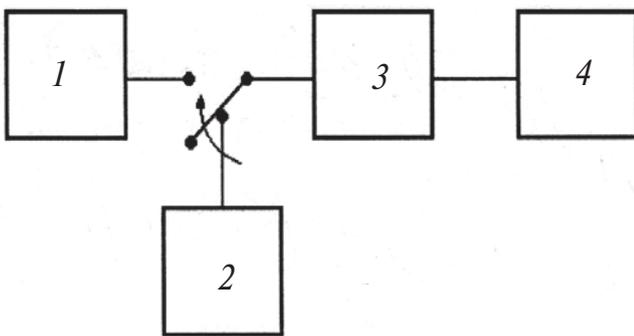


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки для определения энергетического спектра ЭДС: 1 — генератор шума; 2 — генератор стандартных сигналов; 3 — объемный магнитный детектор (ОМД); 4 — селективный приемник (СП)

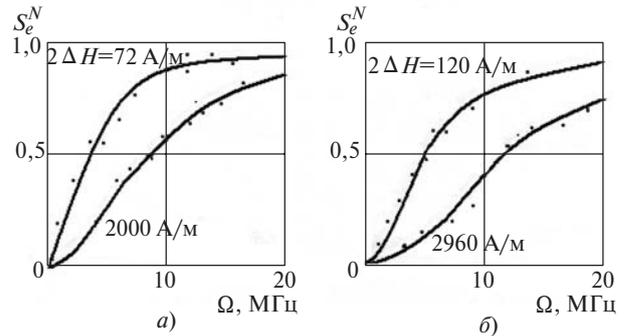


Рис. 2. Энергетический спектр ЭДС: — — расчет; $\times \times \times \times$ — экспериментальные результаты

На рис. 2 показаны результаты сравнения нормированных энергетических спектров, рассчитанных по формуле (15) и полученных экспериментально. Из представленных данных видно удовлетворительное совпадение экспериментальных и теоретических результатов.

Использование объемных магнитных детекторов позволяет создавать измерители мощности, спектральной плотности мощности, анализаторов спектра СВЧ шумов различного происхождения, например шумов, сопровождающих коронный разряд в высоковольтных установках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шакирзянов Ф.Н., Никифоров А.В. Объемные ферритовые преобразователи СВЧ импульсных сигналов. — Электричество, 2011, № 8.
2. Гуревич А.Г. Ферриты на сверхвысоких частотах. — М.: Энергия, 1977.
3. Левин Б.Р. Теоретические основы статической радиотехники, ч. I. 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1989.

[18.06.12]

Авторы: Шакирзянов Феликс Нигматзянович окончил Уральский политехнический институт в 1963 г. Защитил кандидатскую диссертацию «Исследование ферритового преобразователя в режиме нелинейного ферромагнитного резонанса» в 1970 г. в Московском энергетическом институте (МЭИ). Профессор кафедры теоретических основ электротехники МЭИ (ТУ).

Китайцев Александр Алексеевич окончил радиотехнический факультет МЭИ в 1965 г. В 1972 г. защитил кандидатскую диссертацию по вопросам СВЧ электротехники. Скончался в 2011 г.