

## МАГНИТНОЕ ПОЛЕ КАТУШКИ ФАРАДЕЕВСКОГО МОДУЛЯТОРА

*В. А. Прозоров*

Получена зависимость амплитуды и фазы продольного магнитного поля в фарадеевском модуляторе от его параметров и от частоты тока в катушке. Выведено соотношение, связывающее мощность, потребляемую модулятором, с его параметрами, магнитным полем и частотой тока в катушке.

The dependence is obtained of the amplitude and phase of the longitudinal magnetic field in the Faraday modulator on its parameters and on the current frequency in the modulator coil. A relation is derived between the input power of the modulator and its parameters, magnetic field, and current frequency in the coil.

Ферритовые модуляторы, основанные на фарадеевском вращении плоскости поляризации в продольном магнитном поле, находят широкое применение в радиометрах сантиметрового диапазона. Такой модулятор представляет собой отрезок круглого волновода, внутри которого установлен ферритовый стержень [1]. Снаружи на волновод надета катушка. Волновод обычно изготовлен из медной или латунной трубы и является в данном случае короткозамкнутым витком в переменном магнитном поле. При питании катушки переменным током магнитное поле, воздействующее на ферритовый стержень, возбуждается током в катушке и током, текущим по замкнутой окружности в стенках волновода.

Для оценки поля, намагничивающего ферритовый стержень, воспользуемся выражением для бесконечного соленоида [2]. В этом случае поле внутри соленоида однородно и равно

$$H = i, \quad (1)$$

где  $i$  — плотность тока на единицу длины соленоида; влиянием феррита на картину магнитного поля пренебрегаем;

$$i = i_1 + i_2, \quad (2)$$

здесь  $i_1$  — плотность тока в соленоиде, обусловленная током в катушке,  $i_2$  — плотность тока в соленоиде, обусловленная током в короткозамкнутом витке.

Пусть катушка модулятора питается синусоидальным током. Напишем уравнение Кирхгоффа для короткозамкнутого витка, индуктивно связанного с катушкой

$$0 = I_2(R_2 + j\omega L_2) + j\omega MI_1, \quad (3)$$

где  $I_1$  — амплитудное значение тока в катушке,  $I_2$  — амплитудное значение тока в «витке»,  $R_2$  — сопротивление «витка»,  $L_2$  — индуктивность «витка»,  $M$  — взаимная индуктивность,  $\omega$  — угловая частота тока в катушке,  $j$  — мнимая единица. Из (3) имеем

$$I_2 = -\omega M / (\omega L_2 - jR_2) \cdot I_1. \quad (4)$$

Если обозначить число витков катушки —  $N$  и длину катушки —  $d$ , то

$$i_1 = I_1 N / d, \quad i_2 = I_2 / d. \quad (5)$$

Из (1), (2), (4) и (5) получим значение магнитного поля в модуляторе

$$H = I_1 / d \cdot [N - \omega M / (\omega L_2 - jR_2)]. \quad (6)$$

Вычислим  $L_2$  и  $M$  при допущении, что потоки рассеяния отсутствуют:

$$M = \sqrt{L_1 L_2}, \quad L_2 = L_1 / N^2, \quad M = L_1 / N; \quad (7)$$

здесь  $L_1$  — индуктивность катушки. Сопротивление  $R_2$  легко рассчитывается. Пусть  $D$  — средний диаметр трубы волновода,  $t$  — толщина стенки волновода,  $\rho$  — удельное сопротивление материала трубы, тогда

$$R_2 = \rho \pi D / dt. \quad (8)$$

Скин-эффект не учитывается, что справедливо для звуковых частот.

Из (6), (7) и (8) имеем

$$H = H_0 (1 + j\omega L_1 / N^2 R^2)^{-1}, \quad (9)$$

где  $H_0 = I_1 N / d$  — магнитное поле в отсутствии короткозамкнутого витка.

Из выражения (9) следует, что с возрастанием частоты тока в катушке амплитуда продольного магнитного поля в модуляторе уменьшается и поле отстает от тока в катушке по фазе. Стало быть, и амплитуда огибающей высокочастотного сигнала, прошедшего через модулятор, будет спадать и огибающая будет отставать по фазе от тока в катушке.

На рис. 1 приведены расчетная (сплошная кривая) и полученная экспериментально (кружки) зависимости разности фаз огибающей и тока в катушке модулятора трехсантиметрового диапазона от частоты тока в катушке. Параметры модулятора:  $\rho = 4 \cdot 10^{-8}$  ом·м (латунь),

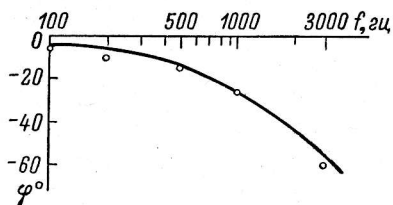


Рис. 1. Зависимость разности фаз  $\varphi$  огибающей высокочастотного сигнала от частоты тока  $f$  в катушке модулятора.

$D=24$  мм,  $d=90$  мм,  $t=0.5$  мм,  $N=1800$ ,  $L_1=20$  мГн. Разность фаз измерялась методом фигур Лиссажу. Измерения произведены с помощью установки, блок-схема которой показана на рис. 2.

Вычислим мощность, которая рассеивается модулятором:

$$P = (|I_1|^2 R_1 + |I_2|^2 R_2) / 2. \quad (10)$$

Используя формулы (4), (7) и (9), получим

$$\begin{aligned} P &= |H|^2 d^2 / 2N^2 \cdot (1 + \omega^2 L_1^2 / N^4 R_2^2) [R_1 + \omega^2 L_1^2 N^{-2} R_2 / (\omega^2 L_1^2 N^{-4} + R_2^2)] = \\ &= P_0 [1 + \omega^2 L_1^2 / N^4 R_2^2 \cdot (1 + N^2 R_2 R_1^{-1})], \quad (11) \\ P_0 &= |H|^2 d^2 R_1 / 2N^2. \end{aligned}$$

$P_0$  есть мощность, рассеиваемая модулятором при питании его постоянным током. Так как  $R_1$  приблизительно пропорционально  $N$ , то  $P_0 \sim 1/N$ , а  $N^2 R_2 / R_1 \sim N$ . Следовательно, увеличение числа витков дает выигрыш в мощности, рассеиваемой модулятором, однако с увеличением частоты этот выигрыш уменьшается.

#### Литература

1. А. Ф. Х а р в е й. Техника сверхвысоких частот. Изд-во «Советское радио», 1965.
2. И. Е. Т а м м. Основы теории электричества. ГИТТЛ, 1956.

Декабрь 1971 г.

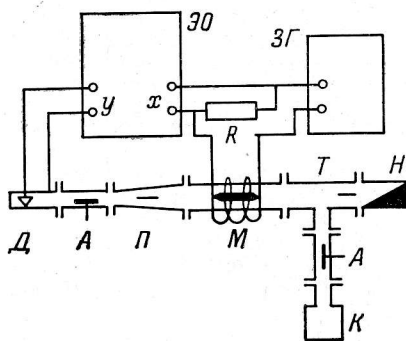


Рис. 2. Блок-схема установки для измерения разности фаз.

ЭО — электронный осциллоскоп, ЗГ — звуковой генератор, R — активное сопротивление, Д — волновой детектор, А — аттенуатор, П — переход с круглого волновода на прямоугольный, М — модулятор, Т — волноводный тройник, Н — согласованная нагрузка, К — клистрон.