В. С. ГОЛЬДМАН

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ СТАБИЛЬНОСТИ СХЕМЫ ИНДУКТИВНО-ЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Неметаллические ферромагнетики — ферриты характеризуются наиболее благоприятным сочетанием электрических и магнитных свойств на высоких частотах. При использовании их в качестве материала для сердечников первичных элементов в устройствах индуктивно-частотного преобразования сигнала большое значение приобретает стабильность магнитной проницаемости. Последняя зависит от напряженности внешнего поля, частоты и температуры. Любое изменение проницаемости от перечисленных факторов влияет на индуктивность и, следовательно, на частоту измерительного генератора и вносит дополнительную погрешность в результате измерения. В измерительных частотно-зависимых цепях значения напряженности магнитного поля и их вариации при изменении режимов работы схемы очень невелики. В этих условиях изменение μ от H можно не учитывать, полагая, что сердечник работает на прямолинейном участке кривой намагничивания. Ферриты характеризуются некоторой частотой, называемой граничной, при которой магнитная проницаемость резко падает. В диапазоне частот, лежащем ниже $f_{\text{гр}}$ зависимостью $\mu(f)$ можно пренебречь. Этот диапазон для ферритов с $\mu = 600 \div 1500$ достигает 10^6 *гц*. Значение граничной частоты уменьшается при увеличении магнитной проницаемости феррита.

Таким образом, при правильном выборе частотного диапазона устройства и соответствующего материала сердечника можно считать его магнитную проницаемость независимой от возможных изменений H и f. Основным дестабилизирующим фактором, влияющим на нее и, следовательно, на стабильность устройства, является температура.

Температурный коэффициент проницаемости определяется из

$$TK_{\mu} = \frac{\mu_{t_2} - \mu_{t_1}}{\mu_{t_1}(t_2 - t_1)} \quad . \qquad (1)$$

Его значение для разных марок ферритов различно и лежит в пределах (1-:-5) 10^{-3} $1/{}^{\circ}C$. Точка Кюри зависит от химического состава технологии изготовления феррита и колеблется от 70° до 150°С. Материалы с более высоким μ имеют более низкую точку Кюри.

Применение разомкнутых цилиндрических сердечников значительно повышает стабильность их магнитной проницаемости и уменьшает потери. Для температурного коэффициента проницаемости стержня имеем

$$(TK\mu)_{ст} = TK\mu \cdot \frac{\mu_{ст}}{\mu}, \tag{2}$$

где $\mu_{ст}$ — магнитная проницаемость стержня.

Таким образом, при выборе того или иного ферритового материала, а также геометрических соотношений сердечника недостаточно руководствоваться только значением μ материала, а следует учитывать конкретные условия его работы, частотный диапазон и требуемую стабильность параметров конкретной измерительной схемы. Необходимо, чтобы относительная нестабильность частоты, обусловленная изменениями μ и определяемая из формулы

$$\delta f_{\mu} = \frac{\Delta f_{\mu}}{f} \tag{3}$$

не превышала заранее установленной величины.

Найдем выражение, связывающее $\delta f\mu$ с относительным изменением магнитной проницаемости материала сердечника $\delta\mu$. Относительная нестабильность частоты генератора, вызванная изменениями параметров его задающего контура, равна

$$\delta f = -\frac{1}{2}(\delta L + \delta C). \tag{4}$$

Поскольку мы рассматриваем только изменения μ, запишем

$$\delta f = -\frac{1}{2}\,\delta L. \tag{5}$$

Из $L = \mu_w L_0$, где μ_w — действующая магнитная проницаемость сердечника;

L_0 — индуктивность катушки без сердечника.
Находим:

$$\frac{dL}{d\mu_{\omega}} = L_0 = \frac{L}{\mu_{\omega}}. \tag{6}$$

Заменяем дифференциалы конечными приращениями:

$$\frac{\Delta L}{\Delta\mu_{\omega}} = \frac{L}{\mu_{\omega}}. \tag{7}$$

Разделив обе части последнего уравнения на L, получаем:

$$\delta L = \delta\mu_\omega, \tag{8}$$

где δL и $\delta\mu_\omega$ — соответственно относительные изменения индуктивности и действующей магнитной проницаемости сердечника:

$$\delta L = \frac{\Delta L}{L}, \ \delta\mu_\omega = \frac{\Delta\mu_\omega}{\mu_\omega}. \tag{9}$$

После дифференцирования μ_ω по $\mu_{ст}$ (выражение (3)* получаем:

$$\frac{d\mu_\omega}{d\mu_{ст}} = \left(\frac{d_c}{d_к}\right)^2 = \frac{\mu_\omega - 1}{\mu_{ст} - 1}. \tag{10}$$

Подставляя сюда вместо $d\mu_\omega$ и $d\mu_{ст}$ конечные приращения, получаем:

$$\frac{\Delta\mu_\omega}{\Delta\mu_{ст}} = \frac{\mu_\omega - 1}{\mu_{ст} - 1}. \tag{11}$$

$$\Delta\mu_{ст} = \delta\mu_{ст}\cdot\mu_{ст}; \tag{12}$$

В свою очередь:

$$\Delta\mu_\omega = \delta\mu_\omega\cdot\mu_\omega,$$

где $\delta\mu_{ст}$ и $\delta\mu_\omega$ — относительные изменения параметров $\mu_{ст}$ и μ_ω. Теперь:

$$\frac{\partial\mu_\omega\,\mu_\omega}{\partial\mu_{ст}\cdot\mu_{ст}} = \frac{\mu_\omega - 1}{\mu_{ст} - 1}. \tag{13}$$

Отсюда

$$\delta\mu_{ст} = \delta\mu_\omega\cdot\frac{\mu_\omega(\mu_{ст} - 1)}{\mu_{ст}(\mu_\omega - 1)}. \tag{14}$$

Для магнитной проницаемости μ имеем:

$$\mu = \frac{\mu_{ст}\left(\frac{N}{4\pi} - 1\right)}{\mu_{ст}\frac{N}{4\pi} - 1}, \tag{15}$$

откуда после преобразований, аналогичных тем, которые были произведены выше, получаем:

$$\delta\mu = \delta\mu_{ст}\frac{\mu_{ст}\left[1 + \frac{N}{4\pi}(\mu - 1)\right]^2}{\mu\left(1 - \frac{N}{4\pi}\right)}. \tag{16}$$

Из (5), (8) и 15 получаем окончательно:

$$\delta f_\mu = -\frac{\delta\mu\cdot\mu(\mu_\omega - 1)\left(1 - \frac{N}{4\pi}\right)}{2\mu_\omega(\mu_{ст} - 1)\left[1 + (\mu - 1)\frac{N}{4\pi}\right]^2}, \tag{17}$$

Это выражение позволяет по заданной относительной нестабильности $\delta f\mu$ рассчитать значение $\delta\mu$, выбрав наиболее подходящую

* См. статью В. С. Гольдмана, Н. М. Старобинского «Расчет индуктивности катушки с разомкнутой магнитной цепью и подвижным ферромагнитным сердечником». Наст. сборник, стр. 84.

марку феррита и отношение $\frac{l_c}{d_c}$ и, наоборот, по значению $\delta\mu$ определить относительный уход частоты, который может иметь место под влиянием внешних факторов, действующих на μ. Рассмотрим пример. Пусть средняя частота измерительного генератора 200 кгц, чувствительность по перемещению $\upsilon = \frac{\Delta f}{\Delta l} = 40^{\text{гц}}/_{\text{мк}}$.

Выбираем в качестве сердечника датчика феррит марки Ф—600 с $TK\mu = 10^{-3}$, задаемся $l_c = 9$ *мм*; $d_c = 3$ *мм*; $d_k = 5$ *мм*. Имеем $\frac{l_c}{d_c} = 3$; $\frac{N}{4\pi} = 0{,}1$; $\mu_{\text{ст}} = 9{,}85$; $\mu_\omega = 4$.

Теперь из (17) находим $\delta f\mu = 7 \cdot 10^{-6}$. Это соответствует уходу частоты от нестабильности проницаемости сердечника около 1,5 *гц*/1°С.

В рассмотренном примере относительная нестабильность выходного параметра — частоты — в 140 раз меньше относительной нестабильности μ — фактора, вызывающего изменения f.

Эффект стабилизации, достигаемый за счет использования разомкнутого ферритового сердечника, определяется

$$k_{\text{ст}} = \frac{\delta\mu}{\delta\mu_\omega} . \qquad (18)$$

Экспериментальные исследования показали, что погрешность, вызванная нестабильностью μ, благодаря использованию в схеме частотного преобразования первичного элемента с разомкнутой магнитной цепью и подвижным сердечником не является определяющей и составляет несколько процентов от общей температурной нестабильности преобразователя.