

ПЕРЕМЕННАЯ ИНДУКТИВНОСТЬ ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

Р. Г. СИМОНЯН

В статье описывается новая конструкция электронно-управляемой индуктивности. Выведена формула зависимости индуктивности от геометрических размеров и физических параметров тороидальных ферритовых сердечников. Описан практический вариант с четырехкратным перекрытием диапазона изменения индуктивности.

Параметрические усилители СВЧ получили весьма широкое распространение благодаря тому, что была найдена электронно-управляемая емкость-варикап. На низких же частотах фактически нет надежно работающей переменной индуктивности с большим диапазоном изменения индуктивности и малыми наводками от накачки. Первые образцы параметрических усилителей представляли собой громоздкие механические системы, где эффект изменения индуктивности достигался за счет механического перемещения переключки магнитной системы посредством двигателя. Но даже при очень тонкой механической настройке система получается нестабильной, так как сказывается наличие не только движущихся частей, но и зависимости момента на валу двигателя от уровня тока через индуктивность.

Поэтому дальнейшее развитие шло по пути получения переменных индуктивностей без механических перемещений. Эти новые электрические методы получения переменных индуктивностей можно разделить на две большие группы:

- 1) силовые линии поля управляющей обмотки расположены параллельно силовым линиям поля обмотки переменной индуктивности,
- 2) силовые линии поля управляющей обмотки расположены перпендикулярно силовым линиям поля обмотки переменной индуктивности.

Описанные в [1] и [4] переменные индуктивности первого типа обычно представляют из себя два тора, каждый из которых имеет свою (основную) обмотку, и оба вместе имеют одну общую (управляющую) обмотку. Встречным включением двух основных обмоток достигается компенсация напряжений неизбежно трансформируемых из общей управляющей обмотки. Эта компенсация обычно получается неполной из-за неидентичности тороидальных сердечников, несовпадения их характеристик и, таким образом, наводки от управляющей обмотки получаются недопустимо большими.

Амплитуды наводок в полученных до сих пор системах составляли 3—5% от амплитуды напряжения управляющей обмотки, а это особенно сказывается, когда индуктивность работает в составе параметрического фильтра или же в модуляторе с низким уровнем сигнала.

Системы второй группы с взаимно перпендикулярными полями

описаны в [2, 3] и удовлетворяют следующим условиям: а) каждый из взаимно перпендикулярных потоков замыкается только по магнитному материалу сердечника и не проходит по воздуху; б) поток обмотки управления идет по тем же участкам сердечника, что и потоки обмоток переменной индуктивности. Такая система состоит из двух одинаковых тороидальных половинок, имеющих кольцевой паз, в котором уложена обмотка переменной индуктивности, а обмотка управления равномерно намотана по всей длине сердечника. Из-за необходимости шлифовки соприкасающихся поверхностей и наличия торцов специальной конфигурации такая система не получила распространения.

В настоящей работе предлагается система с взаимно перпендикулярными полями, но обладающая рядом достоинств по сравнению с остальными системами подобного типа.

Описание системы

Как показано на рис. 1, система состоит из двух сердечников целого тороидального и С-образного, причем некоторый участок тороидального сердечника пересечен воздушным зазором С-образного: (этот участок заштрихован). Из рисунка следует, что

а) потоки взаимно перпендикулярны,

б) каждый из потоков замыкается по магнитному материалу, не проходя через воздух,

в) только на одном участке поток тороидального сердечника пересекает поток управляющей обмотки,

г) потокосцепление одной обмотки с потоком другой обмотки равно нулю.

Очень интересна зависимость индуктивности тороидального сердечника как от размеров общего участка, так и от проницаемости последнего.

Прежде чем приступить к получению и анализу этой зависимости примем следующие обозначения:

μ_1 — проницаемость сердечника вне общего участка,

μ_2 — проницаемость общего участка,

w — число витков переменной индуктивности,

b — ширина общего участка,

R_1 — внутренний диаметр тора,

R_2 — внешний диаметр тора,

h — высота тора.

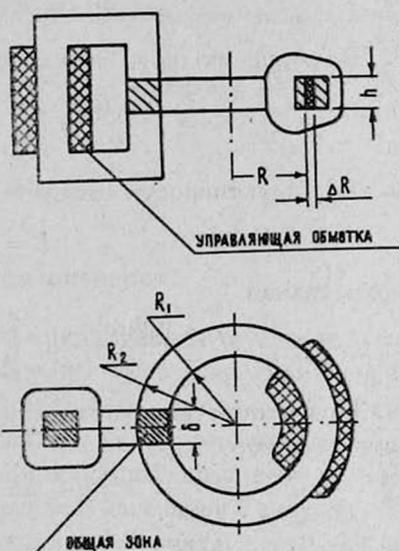


Рис. 1. Конструкция переменной индуктивности.

На основании закона полного тока можно написать:

$$H_1 (2\pi R - \delta) + H_2 \delta = Iw, \quad (1)$$

где H_1 и H_2 — напряженности поля вне общего участка и в общем участке соответственно.

Элементарный поток через поверхность $ds = hdR$ будет

$$d\Phi = Bds = BhdR = \mu_0 \mu_1 H_1 hdR, \quad (2)$$

так как $B = \mu_0 \mu_1 H_1$.

Из формулы (1) найдем H_1 и подставим в формулу (2):

$$d\Phi = \mu_0 \mu_1 \frac{(Iw - \delta H_2) h}{2\pi R - \delta} dR. \quad (3)$$

Напряженность H_2 можно выразить через $d\Phi$:

$$H_2 = \frac{d\Phi}{\mu_0 \mu_2 hdR}. \quad (4)$$

Подставляя формулу (4) в (3), получим выражение для элементарного потока

$$d\Phi = \frac{\mu_0 \mu_1 \mu_2 h I w}{2\pi R \mu_2 + \delta (\mu_1 - \mu_2)} dR. \quad (5)$$

Величина полного потока будет

$$\Phi = \frac{\mu_0 \mu_1 I w h}{2\pi} \ln \left[\frac{2\pi R_2 \mu_2 + \delta (\mu_1 - \mu_2)}{2\pi R_1 \mu_2 + \delta (\mu_1 - \mu_2)} \right]. \quad (6)$$

Но для индуктивности имеем

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{\Phi w}{I}. \quad (7)$$

Окончательно

$$L = \frac{\mu_0 \mu_1 w^2 h}{2\pi} \ln \left[\frac{2\pi R_2 \mu_2 + \delta (\mu_1 - \mu_2)}{2\pi R_1 \mu_2 + \delta (\mu_1 - \mu_2)} \right]. \quad (8)$$

При отсутствии управляющего тока $\mu_1 = \mu_2$, получаем индуктивность обычного тора

$$L_0 = \frac{\mu_0 \mu_1 w^2 h}{2\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}. \quad (9)$$

L_0 в формуле (9) представляет собой индуктивность тора без управляющего потока. Отношение $\frac{L}{L_0}$ имеет некоторый практический интерес:

$$\frac{L}{L_0} = \frac{\ln \frac{2\pi R_2 + \delta \left(\frac{\mu_1}{\mu_2} - 1 \right)}{2\pi R_1 + \delta \left(\frac{\mu_1}{\mu_2} - 1 \right)}}{\ln \frac{R_2}{R_1}}. \quad (10)$$

График функции $\frac{L}{L_0} = F\left(\frac{\mu_2}{\mu_1}\right)$ был рассчитан для различных значений, входящих в нее отношений постоянных $\frac{\delta}{R_2}$ и $\frac{R_1}{R_2}$. Он показан на рис. 2, где видно, что график построен при трех различных величинах отношения $\frac{R_1}{R_2}$ (0,4, 0,6, 0,8), а $\frac{\delta}{R_2} = 0,2$.

Из графиков следует, что при значениях проницаемости $\mu_2 = (0,3 - 1,0)$ μ_1 индуктивность меняется слабо. При уменьшении $\frac{\mu_2}{\mu_1}$ ниже уровня 0,3 индуктивность резко падает. В диапазонах $\frac{\mu_2}{\mu_1} = 0,6 - 1,0$ и $\frac{\mu_2}{\mu_1} = 0,01 - 0,18$ величина $\frac{L}{L_0}$ уменьшается почти линейно. Отметим, что увеличение отношения $\frac{R_1}{R_2}$ вли-

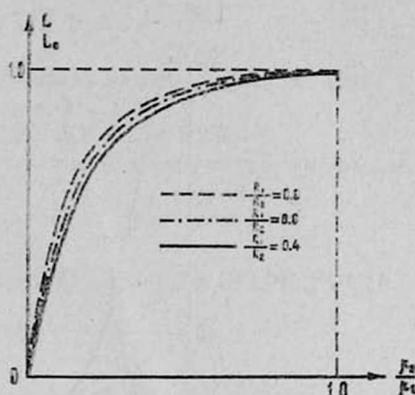


Рис. 2. Зависимость отношения $\frac{L}{L_0}$ от отношения $\frac{\mu_2}{\mu_1}$.

яет примерно так, как уменьшение отношения $\frac{\delta}{R_2}$.

Экспериментальная проверка

При выборе материала для системы переменной индуктивности руководствовались двумя принципами: необходимостью доведения общей зоны до глубокого насыщения и минимумом потерь через воздух в месте вхождения феррита в скобу. В этих целях для С-образного сердечника выбрали электротехническое железо, индукция насыщения которого примерно в десять раз превышает индукцию насыщения феррита. Торцовые поверхности скобы в месте вхождения феррита тщательно подгонялись.

После этого была снята характеристика индуктивности в зависимости от управляющего тока (рис. 3), число витков управляющей обмотки $w_y = 10\,000$. Весь диапазон изменения индуктивности можно разбить на три участка:

- 1) когда отношение $\frac{\mu_2}{\mu_1}$ больше 0,4, изменение индуктивности незначительно;
- 2) когда отношение $\frac{\mu_2}{\mu_1}$ находится в пределах 0,2—0,4, индуктив-

ность падает почти линейно и общий участок приближается к режиму насыщения;

3) общий участок входит в глубокое насыщение и дальнейшее увеличение напряженности поля управляющей обмотки очень слабо влияет на индуктивность.

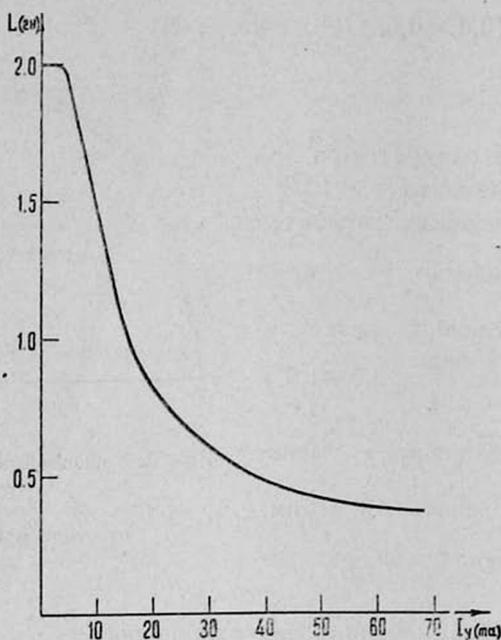


Рис. 3. Зависимость индуктивности тороидального сердечника от тока через управляющую обмотку.

Фактически получается четырехкратное изменение индуктивности.

Большой диапазон изменения индуктивности $\left(\frac{L_0}{L_{\min}} = 4\right)$ дал возможность получить параметрическую генерацию на ферритовых торах, на частоте 25 герц ($R_1 = 18$ мм, $R_2 = 31$ мм, $h = 7$ мм, $\delta = 5$ мм, и 400 герц; $R_1 = 8$ мм, $R_2 = 17$ мм, $h = 5$ мм, $\delta = 4$ мм). Проницаемость сердечников μ_1 находится в пределах 1800—2000.

Наводки составили примерно 0,1% от амплитуды напряжения управляющей обмотки.

В а к л ю ч е н и е

Описанная система электронно-управляемой индуктивности целесообразна в частотном диапазоне от постоянного тока до верхнего предела применения электротехнического железа 15—20 кГц, когда необходимы большой диапазон изменения индуктивности и малый уровень наводок от управляющей обмотки, и может быть применена в параметрических фильтрах, перестраиваемых избирательных цепях и усилителях, магнитных модуляторах и других устройствах.

Широкому применению таких индуктивностей благоприятствует наличие возможности использования большого выбора стандартных тороидальных сердечников.

Институт радиопизики и электроники
АН АрмССР

Поступила 5 апреля 1967

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. „Управление и измерение на расстоянии“ (сборник статей) 4, ИЛ, М., 1962.
2. В. П. Миловзоров, Электромагнитная техника, М., 1964.
3. R. S. Duncan, H. A. Stone, Proceedings of the IRE, 44, 4 (1956).
4. А. М. Бамдас, Ю. А. Савиновский, Управляемые дроссели радиоволновой аппаратуры, М., 1966.

ՓՈՓՈԽԱԿԱՆ ԻՆԴՈՒԿՏԻՎՈՒԹՅՈՒՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԻԿ ՖԻԼՏՐԵՐԻ ՀԱՄԱՐ

Ռ. Հ. ՍԻՄՈՆԻԱՆ

Նկարագրված է էլեկտրոնային ղեկավարվող փոփոխական ինդուկտիվություն: Դուրս է բերված ինդուկտիվության բանաձևը, կախված ֆերիտե տորաձև միջուկների ինչպես նրկրաչափական, այնպես էլ ֆիզիկական պարամետրերից: Նկարագրված է նաև փորձնական օրինակ, որը ունի ինդուկտիվության փոփոխության տիրույթի քառապատիկ արժեք:

ADJUSTABLE INDUCTOR FOR PARAMETRIC FILTERS

R. H. SIMONIAN

A new construction of adjustable inductor is described. A formula for inductance depending on the physical and the geometrical parameters of ferrit cores is found. The description of a practical example with fourfold value of the inductance variation range is given.