

Современные индуктивные радиокомпоненты

Часть 3

В. Кочемасов, к. т. н.¹, С. Хорев²

УДК 621.318.4 | ВАК 05.27.01

В первой и второй частях статьи, опубликованных во втором и третьем номерах журнала «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес» за 2022 год, было рассказано об основных параметрах, характеризующих индуктивные радиокомпоненты, и об индуктивностях различных типов. В данном номере рассматривается еще несколько типов индуктивных радиокомпонентов.

ДРОССЕЛИ

Важным индуктивным компонентом в радиотехнических цепях является дроссель (Choke). Физический энциклопедический словарь определяет дроссель следующим образом:

«Дроссель электрический (Д. э.) – катушка индуктивности, которую включают в электрическую цепь для устранения (подавления) переменной составляющей тока в цепи, разделения или ограничения сигналов различной частоты. Д. э. включается в цепь последовательно с нагрузкой».

Электрический импеданс дросселя рассчитывается по формуле $Z(f) = 2\pi fL$, где f – рабочая частота в Гц, а L – номинальная индуктивность дросселя на этой частоте, измеряемая в Гн. Из формулы понятно, что чем выше номинальная индуктивность L , тем сильнее подавляется переменная составляющая сигнала на частоте f . Таким образом, дроссель – это индуктивность с высоким значением номинальной индуктивности. Для увеличения номинального значения индуктивности при сохранении геометрических размеров катушку индуктивности наматывают на сердечник с высоким значением магнитной проницаемости. Поэтому рассмотрение дросселей необходимо начать с материалов, из которых изготавливаются их сердечники.

Применительно к данной статье интерес представляют ферромагнетики, более конкретно ферриты. Первым ферритом, примененным на практике, является магнетит, а все современные ферриты представляют собой его «родственников» и являются соединением оксида железа Fe_2O_3 с основными оксидами металлов, являющихся ферромагнетиками. Ферриты делятся

на несколько подвидов, в зависимости от типа кристаллической решетки и металла, с которым соединяется оксид железа:

- ферриты-шпинели – соединения с кубической решеткой и формулой $MeFe_2O_4$, где Me – двухвалентный металл, чаще всего никель, кобальт, марганец, магний, медь, цинк, кадмий;
- ферриты-гранаты – соединения с кубической кристаллической решеткой и формулой $Me_3Fe_5O_{12}$, где Me – тяжелый редкоземельный элемент от самария до лютеция или иттрий. Например, иттрий-железный гранат $Y_3Fe_5O_{12}$;
- гексаферриты – соединения с гексагональной кристаллической решеткой по типу магнетоплюмба $PbFe_{12}O_{19}$;
- ортоферриты – соединения с ромбической кристаллической решеткой и формулой $MeFeO_3$, где Me – редкоземельный элемент. При нормальной температуре ортоферриты являются так называемыми антиферромагнетиками и становятся ферромагнетиками при низких температурах, ниже нескольких кельвинов (К).

Большинство ферритов являются тугоплавкими соединениями с высокой твердостью, не растворимы в воде и органических растворителях, вступают в реакцию с кислотами. Ферриты обладают наименьшими потерями на вихревые токи из всех известных материалов, обладающих магнитными свойствами. Для ферритов характерно явление магнитоstriction, когда ферромагнитное тело, помещенное в магнитное поле, изменяет свои геометрические размеры (прямой эффект магнитоstriction). Точно так же механическое воздействие (растяжение или сжатие) приводит к изменению магнитной проницаемости и магнитных свойств (обратный эффект магнитоstriction). На сверхвысоких

¹ ООО «Радиокомп», генеральный директор, vkochemasov@radiocomp.ru.

² ООО «Радиокомп», ведущий инженер, siw1937@yandex.ru.

частотах потери сигнала в феррите зависят от напряженности магнитного поля, и эта зависимость имеет резонансный характер. Благодаря высоким значениям магнитной проницаемости и низкой электропроводности ферриты используются для изготовления сердечников индуктивностей, применяемых в радиочастотных и высокочастотных цепях. Более подробно виды ферритов, применяемые в СВЧ-технике, рассмотрены в статье [31]. Дополнительно следует отметить, что для ферритов характерны зависимости начальной магнитной проницаемости от температуры и комплексной магнитной проницаемости от частоты. Графики этих зависимостей для феррита марки CF138, применяемого в силовых и мощных индуктивностях, приведены на рис. 22 [32].

По частотному диапазону, в котором применяются дроссели, их разделяют на две группы:

- дроссели для аудиоустройств (Audio Frequency Choke (AFC));
- дроссели для радиочастотного диапазона (Radio Frequency Choke (RFC)).

Это разделение производится на основе частотных характеристик дросселей. Исходя из конструкции дросселей в англоязычной технической литературе, особенно среди радиолюбителей, дроссели делят на несколько основных видов [33].

Намотанные (моточные) коаксиальные дроссели

Данный вид дросселей представляет собой, по сути, моточную индуктивность, о которых рассказывалось ранее, залитую компаундом, предотвращающим изменение геометрических размеров. В зависимости от способа подключения и принципиальной схемы цепи индуктивность может выполнять функцию дросселя. Например, при включении индуктивности между сигнальной линией и заземлением. Импеданс индуктивности имеет явно выраженную частотную зависимость, что позволяет применять ее для фильтрации и подавления заданных сигналов. Характерным примером такого подхода является серия 0402DC компании Coilcraft. На рис. 23а [34] показан внешний вид, а на рис. 23б [35] – частотная зависимость импеданса данных изделий.

К этому же виду дросселей можно отнести и так называемые *улучшенные коаксиальные дроссели (Improved Coax Choke)*. Их отличием от описанных выше дросселей является наличие явно выраженного каркаса, на который производится намотка. Точно так же, как и в случае обычных индуктивностей, каркас может быть изготовлен или из немагнитного материала (высокочастотные дроссели (RF-Choke)), или из материалов с большим значением магнитной проницаемости, например ферритов.

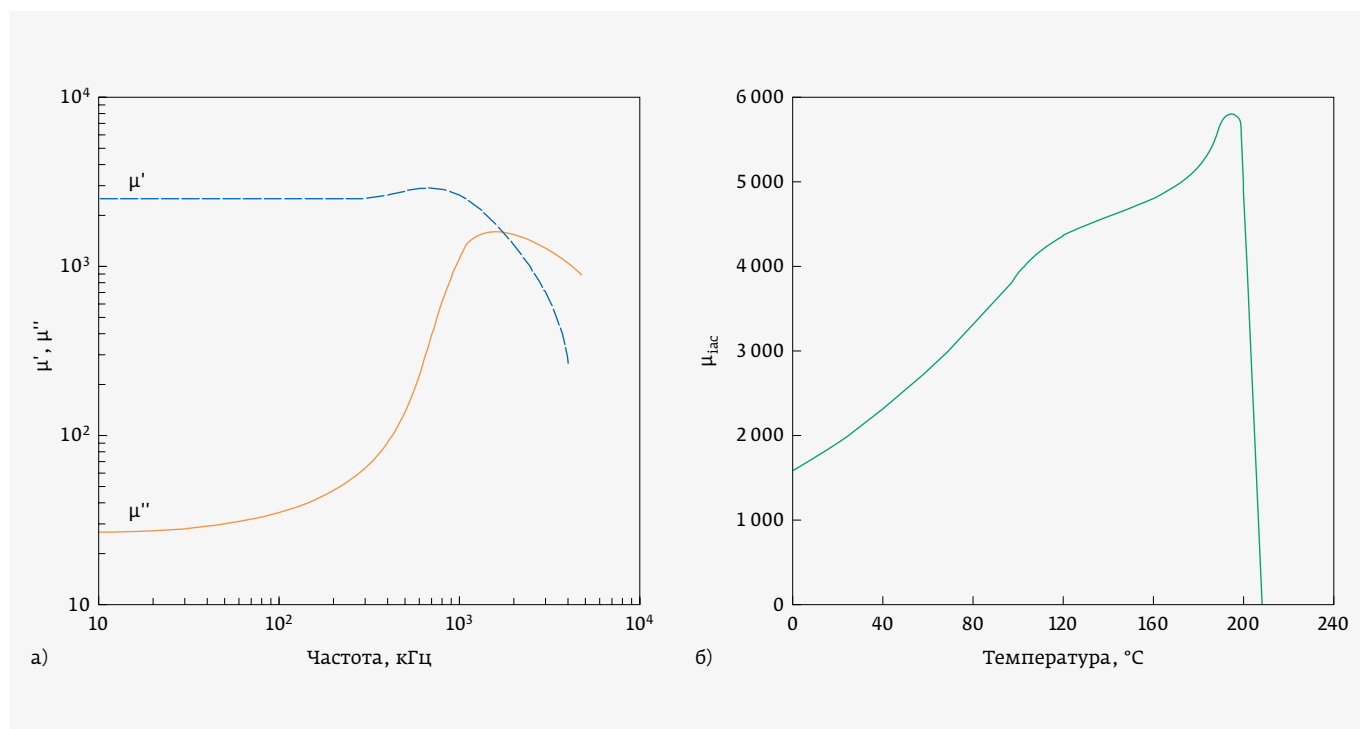


Рис. 22. Зависимости комплексной магнитной проницаемости от частоты (а) и начальной магнитной проницаемости от температуры (б) для феррита марки CF138. μ_{iac} – начальная магнитная проницаемость (Initial Permeability), μ' – действительная и μ'' – мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости

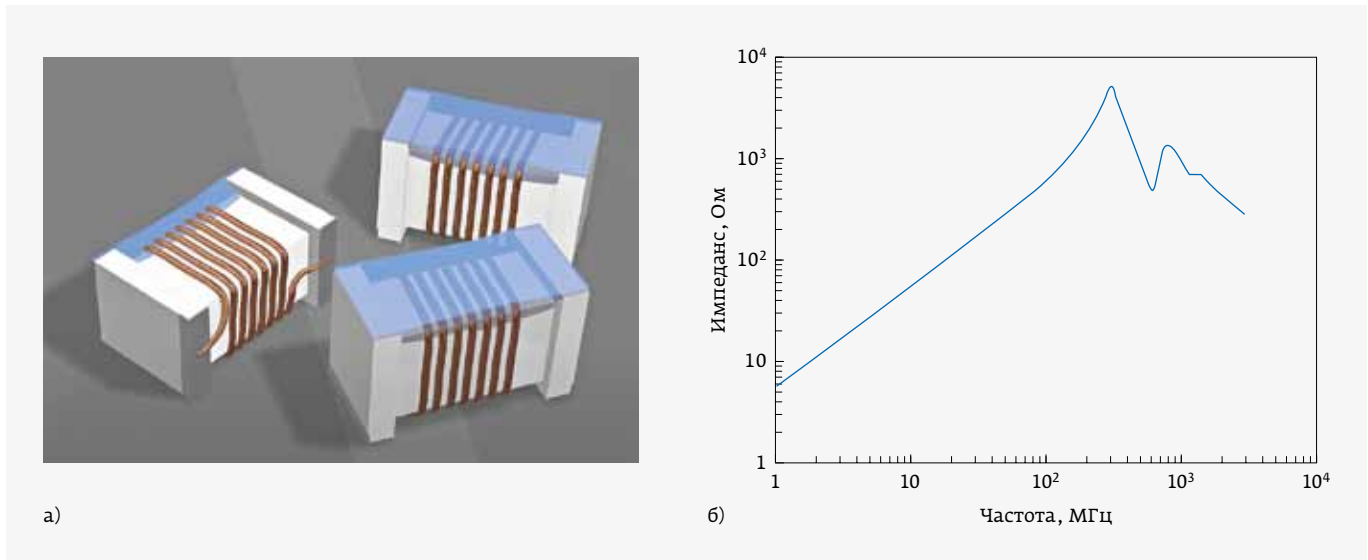


Рис. 23. Дроссель серии 0402DC компании Coilcraft: а – внешний вид; б – зависимость импеданса от частоты

Наличие каркаса стабилизирует номинальную индуктивность дросселя и снижает воздействие внешних факторов, например температуры. Кроме того, данный вид дросселей возможно применять в качестве проходного дросселя, когда при монтаже намотка сразу оказывается соединенной с корпусом устройства (заземление). В качестве примера данного вида дросселей можно привести дроссель серии HLBC компании TDK. Его внешний вид показан на рис. 24а [36], а зависимость модуля импеданса от частоты – на рис. 24б [37].

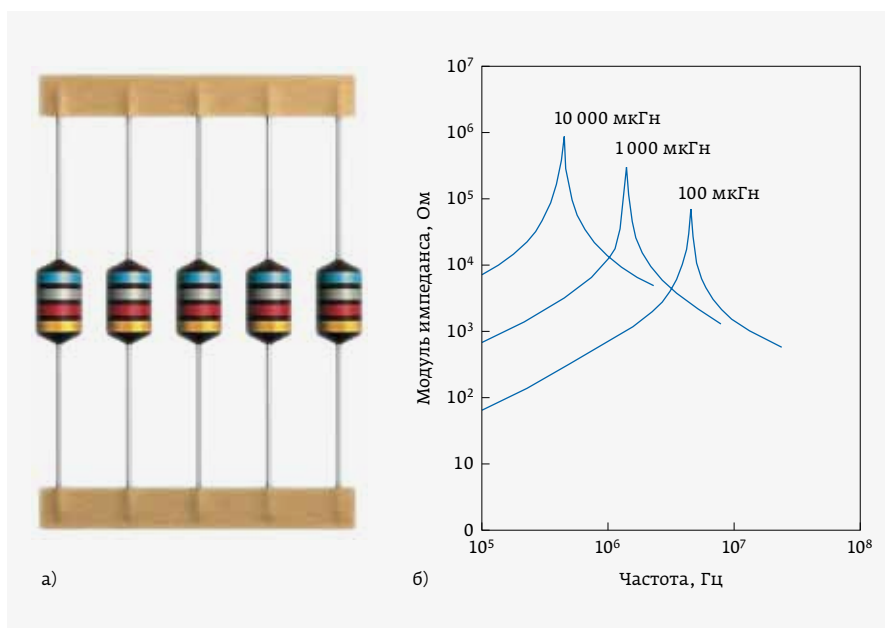


Рис. 24. Дроссель серии HLBC компании TDK: а – внешний вид; б – зависимость модуля импеданса от частоты

Дроссели типа «бусина»

Свое название данный вид дросселей получил от так называемых «бусинок» – ферритовых цилиндров или колец, через которые пропускается сигнальный провод или кабель. Основное назначение «бусин» – подавление помех, в том числе распространяющихся по экранной обмотке кабеля. В чистом виде «бусины» не являются индуктивностями, а представляют собой частотно-зависимое сопротивление. «Бусинки» изготавливаются из специальных ферритов с большими потерями на пере-

магничивание, поэтому на высоких частотах они представляют собой активное сопротивление. С развитием микроминиатюризации встала задача фильтрации помех в сигнальных и информационных линиях передач в интегральных сборках. В частности, отраженного сигнала при согласовании линий передачи по волновому сопротивлению. Эту задачу решают дроссели типа «бусина». Одной из серьезных проблем в высокочастотной схемотехнике является так называемый «звон» – нежелательные колебания, возникающие при коммутации импульсных цепей и присутствии паразитных индуктивностей и емкостей. Для уменьшения этого эффекта в разрыв сигнальной линии впаивается дроссель. Характерным примером этого вида дросселей является серия WE-CBF компании Würth Elektronik. На рис. 25а [38]

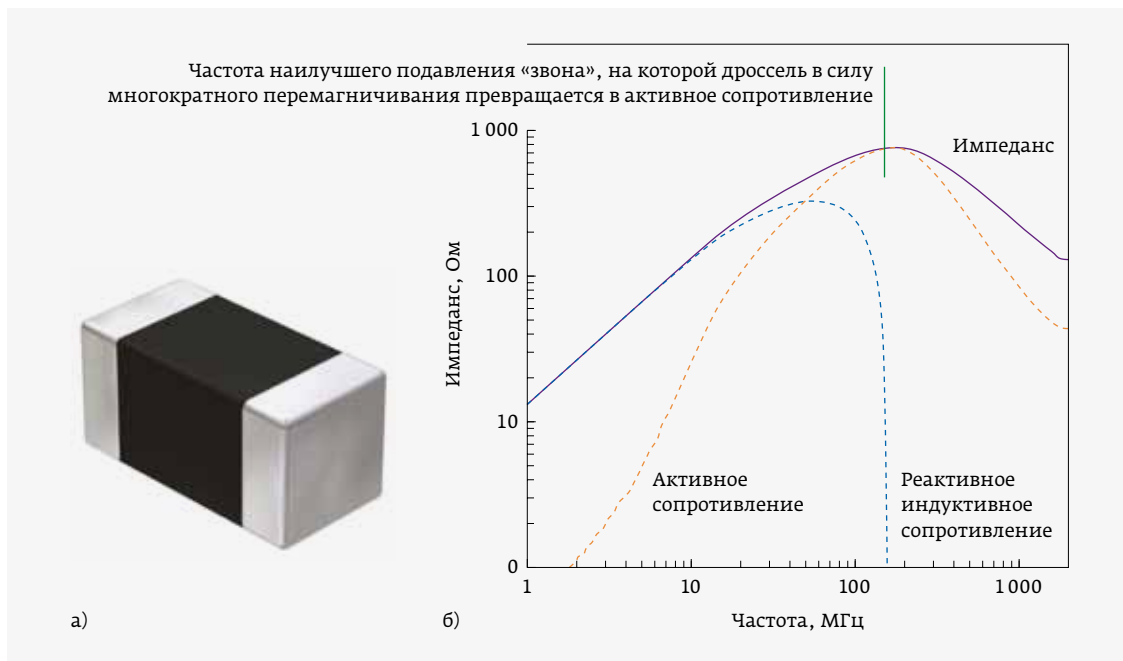


Рис. 25. Внешний вид (а) и основные характеристики (б) дросселя-бусины 74279265 компании Würth Elektronik

показан внешний вид одного из дросселей серии WE-CBF – 74279265 типоразмера 0603, а на рис. 25б [39] – его основные характеристики (в серии WE-CBF существует целая линейка типоразмеров и номиналов, с которой можно познакомиться на сайте компании).

Дроссели общего назначения

Это самый распространенный вид дросселей. Их разнообразие и по конструкции, и по области применения очень велико. Имеет смысл остановиться на дросселях, предназначенных для решения узкоспециальных задач. Особый

Филлин Filter Innovations
www.filin-rf.ru
www.radiocomp.ru
filin-rf@radiocomp.ru

Фильтры ВЧ/СВЧ, устройства на их основе, а также компоненты ВЧ/СВЧ трактов для частот до 26,5 ГГц и выше

- Диплексеры
- Мультиплексеры
- Переключаемые и перестраиваемые фильтры
- Делители/сумматоры мощности
- Направленные ответвители
- Квадратурные мосты
- Коаксиально-волноводные переходы
- Антенны

Любые виды заказов:

- НИР, ОКР
- срочные заказы
- единичные/крупносерийные заказы

Разработка, производство, испытания устройств с учетом требований заказчика

- Устройства на сосредоточенных элементах
- Фильтры на коаксиально-керамических резонаторах
- Гребенчатые и встречно-стержневые фильтры
- Моноблочные керамические фильтры
- Фильтры на объемных резонаторах
- Устройства на микрополосковых линиях
- Волноводные устройства
- Устройства по технологии LTCC
- Трубочатые фильтры
- Фильтры на плоских волноводах

109316, Москва, Волгоградский проспект, 42 Отдел продаж: +7 495 95 777 45 / +7 495 361 0904

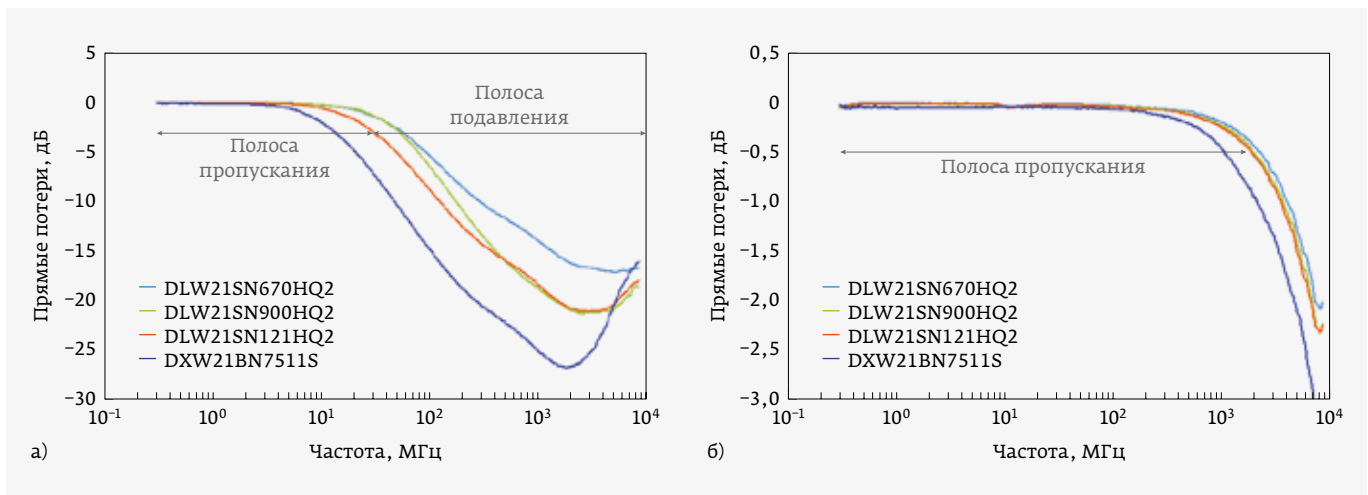


Рис. 26. Зависимости прямых потерь от частоты для синфазного (а) и дифференциального (б) сигналов

интерес представляют так называемые *сдвоенные дроссели*, в которых на один сердечник намотаны одновременно две индуктивности. Основное назначение данного вида дросселей заключается в подавлении синфазных помех, возникающих в импульсных устройствах. В процессе работы импульсных преобразователей любой топологии возникают паразитные высокочастотные токи, протекающие в одном и том же направлении и по сигнальным линиям, и по заземлению. Обе обмотки синфазного дросселя (Common Mode Choke) должны быть максимально близки по характеристикам. Когда через синфазный дроссель проходит дифференциальный сигнал, то каждая его составляющая в своей обмотке формирует магнитные потоки, имеющие разную полярность. Эти потоки нейтрализуют друг друга, поэтому при прохождении через синфазный дроссель дифференциальный сигнал не искажается. На практике амплитуда сигнала, безусловно, уменьшается за счет потерь и искажения на межвитковых емкостях. В случае синфазного сигнала магнитные потоки складываются, импеданс дросселя увеличивается, что приводит к значительному подавлению синфазного сигнала. Таким образом, синфазный дроссель представляет

собой магнитный компонент, подавляющий синфазные сигналы за счет большого импеданса, и отличающийся малыми вносимыми искажениями при прохождении дифференциальных сигналов. На рис. 26 [40] показаны прямые потери синфазного и дифференциального сигналов при прохождении через дроссели серий DLW21 и DXW21 компании Murata.

Еще одним интересным видом дросселей общего назначения являются так называемые *многослойные дроссели*. В зависимости от способа применения и назначения они могут изготавливаться либо последовательной намоткой нескольких индуктивностей на один ферритовый сердечник, либо по технологии пленочных индуктивностей. С тем отличием, что для многослойных дросселей наполнителем является феррит, выбранный для решения конкретной задачи. На рис. 27а [41] и рис. 27б [42] показан внешний вид многослойных дросселей с различными типами намотки.

ПЕРЕМЕННЫЕ ИНДУКТИВНОСТИ

В целом ряде задач и приложений изменяемой и измеряемой величиной является индуктивность. Для настройки и балансировки индуктивных измерительных цепей применяются индуктивности с изменяемой номинальной индуктивностью. Ранее, в частности в советской технической литературе, для обозначения данного вида индуктивностей применялось название вариометры (ферровариометры). В настоящее время чаще всего используется название *индуктивности с переменной индуктивностью*. Или переменные (variable) и подстроечные (tunable) индуктивности. Классическая конструкция переменной индуктивности представляет собой обычную индуктивность, в центр которой между витками помещается материал с большим значением магнитной проницаемости. Как отмечалось ранее, в межвитковом



Рис. 27. Внешний вид многослойных дросселей: а – дроссель серии 4021162 «Wilco» компании RF Parts Company; б – многослойный дроссель TB1608 компании Murata

пространстве индуктивности сосредоточен максимум напряженности магнитного поля, поэтому наличие там материала с большой магнитной проницаемостью изменяет плотность магнитного потока и приводит к увеличению номинальной индуктивности катушки. Чаще всего для этой цели применяются сердечники (или подложки, в зависимости от конструкции) из ферромагнитных материалов. При этом следует иметь в виду, что введение в межвитковое пространство ферромагнита приводит только к *увеличению* номинальной индуктивности. В 50-х годах прошлого века предпринимались попытки использовать сердечники из диамагнитных материалов, но продолжения эти работы не получили, поскольку уменьшение напряженности магнитного поля за счет поглощения магнитного поля в материале сердечника приводило к нагреву сердечника и значительным флуктуациям индуктивности.

Разнообразие вариантов исполнения переменных индуктивностей разных производителей очень велико. Поэтому разработчику радиоаппаратуры при выборе переменной индуктивности, помимо собственно параметров индуктивности, следует обращать внимание на соотношение цены и качества. Различие бюджетных и дорогих переменных индуктивностей заключается в используемых материалах и качестве изготовления. При этом при близких характеристиках цена может отличаться в несколько раз. Внешне бюджетные и дорогие индуктивности практически не отличаются, поэтому в первую очередь нужно изучать техническую документацию. Для



Рис. 28. Сравнение переменных индуктивностей: а – бюджетные переменные индуктивности серий 5CCEG и FSDVA компании Murata; б – подстроечные (tunable) высокочастотные индуктивности серий Uni5, Uni10, Slot7 и 148 компании Coilcraft

сравнения на рис. 28 приведены бюджетные индуктивности компании Murata (рис. 28а [43]) и дорогие индуктивности компании Coilcraft (рис. 28б [44]) со сравнимыми характеристиками.

В настоящее время широкое распространение получили переменные индуктивности, изготовленные с применением современных технологий, например МЭМС-технологии. В этой связи следует обратить внимание на так называемые *программируемые* (programmable) индуктивности. Чаще всего данный тип переменных индуктивностей изготавливается по пленочной технологии, где

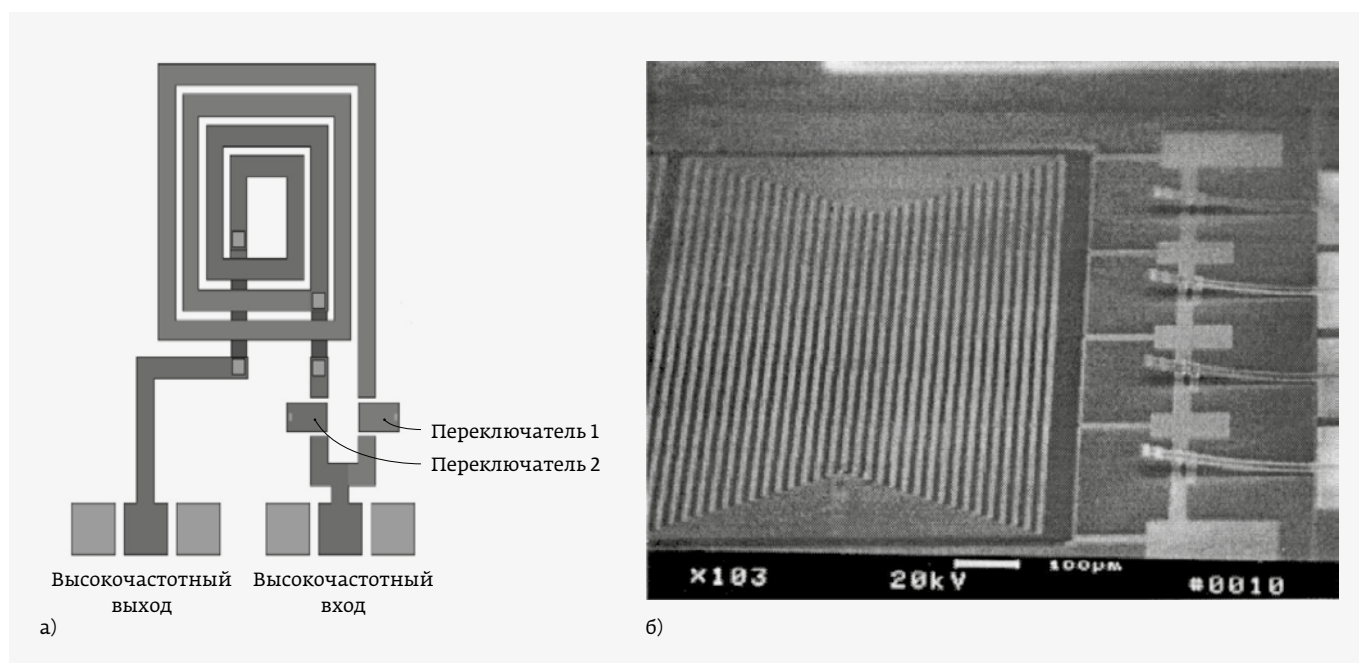


Рис. 29. Программируемая тонкопленочная индуктивность: а – топология индуктивности с переключаемым входом; б – матрица из переменных индуктивностей

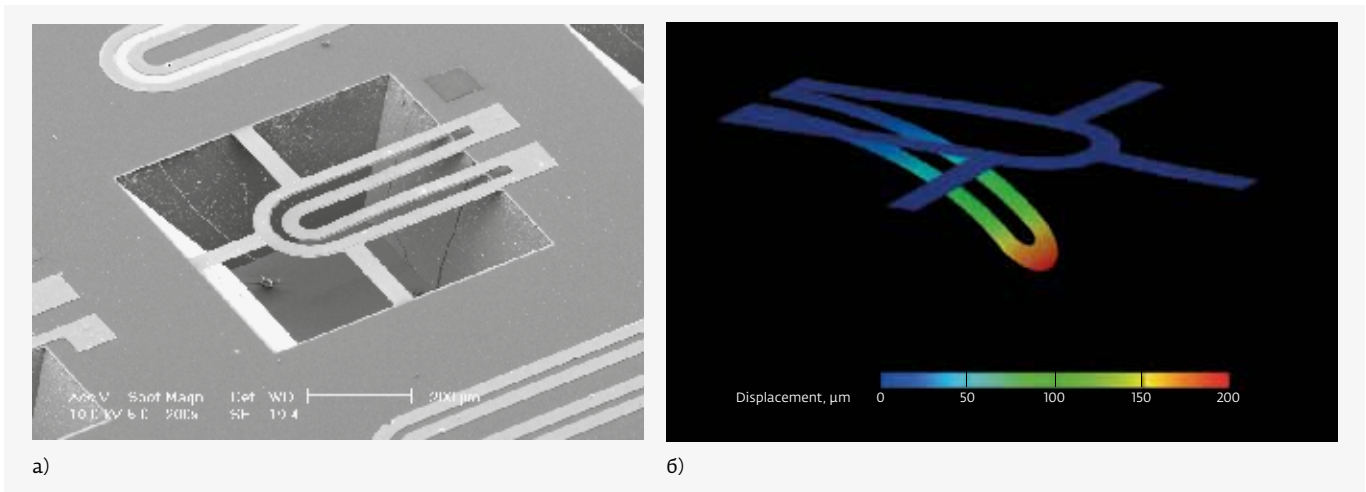


Рис. 30. Подстроечная МЭМС-индуктивность: а – топология индуктивности; б – изменение геометрии индуктивности при протекании тока

на выходной электрод переключаются дополнительные витки катушки, как это показано на рис. 29 [45].

На рис. 29а изображена пленочная индуктивность с переключаемым входом. Переключение производится с помощью высокочастотных рpn-диодов. Как видно из рис. 29а, при переключении происходит изменение длины токопроводящего слоя спиральной прямоугольной индуктивности, вследствие чего изменяется ее номинальная индуктивность. При полной длине номинальная индуктивность составляет 4 нГн, а при переключении – 1 нГн. Диапазон рабочих частот – 1–4 ГГц. Из подобных индуктивностей составляются матрицы (см. рис. 29б), в которых при сохранении рабочего диапазона частот номинальная индуктивность может изменяться от 1 до 100 нГн.

У данного типа переменных индуктивностей изменение номинальной индуктивности происходит дискретным образом с определенным шагом. Чаще всего этого достаточно для решения конкретной задачи, но в целом ряде случаев требуется не дискретное, а непрерывное изменение номинальной индуктивности. Это очень похоже

на различие между цифровыми и аналоговыми сигналами. Для решения этой задачи были разработаны так называемые *подстроечные* (tunable) индуктивности. Один из вариантов подобной индуктивности приведен на рис. 30 [46].

Особенностью данной конструкции является то, что ее геометрия и, соответственно, номинальная индуктивность изменяются в зависимости от протекающего по обмотке тока. Индуктивность выполнена из двух обмоток – неподвижной, жестко зафиксированной, обмотки и свободной обмотки, с одной стороны также жестко зафиксированной, но с другой стороны имеющей возможность свободного перемещения. В приведенной на рис. 30 индуктивности обмотки выполнены из золота. Толщина обмоток составляет 1 мкм, расстояние между обмотками и подложкой – 300 мкм. При протекании тока через обмотку свободный конец внутренней обмотки изгибается за счет нагрева и, тем самым, изменяется общая номинальная индуктивность катушки. Данные индуктивности могут работать на частотах до 15 ГГц, при этом диапазон изменения индуктивности составляет не менее 8%.

Еще одним интересным видом МЭМС-индуктивностей являются так называемые *жидкостные* высокочастотные переменные индуктивности (liquid RF variable inductors) [47]. Изменение индуктивности в них происходит за счет того, что в пространство между обмоткой и подложкой заливается жидкий металлический сплав, например галинстан (смесь галлия, индия и олова). В русскоязычной технической литературе используется другое название – ингас (от формулы сплава InGaSn). Температура плавления данного соединения составляет –19°C, поэтому при комнатной температуре этот сплав жидкий. Изменение индуктивности катушки происходит

ООО
СМП

ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН

www.SMD.ru

электронные компоненты
для поверхностного монтажа

НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК

- Катушки индуктивности на токи до 10 А
- U FL разъемы и pigtail со SMA

Москва, Ленинградский пр., 80 к. 32; e-mail: sales@smd.ru
Тел.: (495) 158-7396, (495) 943-6244, (495) 943-8780

аналогично тому, как при помещении ферромагнитного сердечника в межвитковое пространство обычной катушки индуктивности. Заявленные в литературе данные позволяют заключить, что жидкостные переменные индуктивности возможно применять на частотах до 3 ГГц при добротности не меньше 15. При этом диапазон изменения индуктивности составляет не менее 18%. Правда, следует отметить, что данный тип индуктивностей пока находится на стадии лабораторных экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

31. **Устинов А., Кочемасов В., Хасьянова Е.** Ферритовые материалы для устройств СВЧ-электроники. Основные критерии выбора // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2015. № 8. С. 86–92.
32. CoreTech. Ферритовые сердечники. 2012.
33. <https://www.dj0ip.de/rf-cmc-chokes/different-kinds-of-chokes/>
34. [https://www.coilcraft.com/en-us/products/rf/ceramic-core-chip-inductors/0402-\(1005\)/0402dc/](https://www.coilcraft.com/en-us/products/rf/ceramic-core-chip-inductors/0402-(1005)/0402dc/)
35. Inductors as RF chokes; Coilcraft, Document 945-1 Revised 10/04/17
36. <https://rs-catalog.ru/8807253.html?ysclid=l10jorhqj3>
37. Inductors; RF Chokes, HLBC series; June 2012.
38. <https://rs-catalog.ru/1241874.html?ysclid=l10kuv84al>
39. **Ричардсон К., Браманпалли Р.** Выбор и использование ферритовых бусин для подавления звона в импульсных преобразователях // Сборник «Электромагнитная совместимость в электронике». 2018. С. 22–28.
40. **Цун-Кит Чин.** Синфазные дроссели в высокоскоростных каналах связи // Электронные компоненты. 2011. № 10. С. 97–100.
41. <https://www.rfparts.com/4021162.html>
42. <https://www.smd.ru/katalog/katushki/mnogoslojnye/tl1608/>
43. <https://www.murata.com/en-us/products/inductor/variable>
44. <https://www.coilcraft.com/en-us/products/rf/tunable-rf-inductors/>
45. **Banitorfian F., Eshghabadi F., Asrulnizam Abd Manaf et al.** Evaluation and analysis of methods for fixed and variable MEMS inductors design // Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials. 2014. V. 44. № 2. PP. 87–103.
46. **Zine-El-Abidine I., Okoniewski M., McRory J.G.** A MEMS Tunable Inductor // NSTI-Nanotech. 2004. V. 1. PP. 340–342.
47. **El Gmati I., Calmon P., Boukabache A. et al.** Liquid RF MEMS variable inductor // Procedia Engineering. 2010. V. 5. PP. 1380–1383.

**ЭЛЕКТРОНИКА
ТРАНСПОРТ 2022**

15-я специализированная выставка электроники и информационных технологий
для пассажирского транспорта и транспортной инфраструктуры

Проводится в рамках Российской недели общественного транспорта www.publictransportweek.ru

21-23 СЕНТЯБРЯ / МОСКВА / ЦВК ЭКСПОЦЕНТР

WWW.E-TRANSPORT.RU