

Современные индуктивные радиокомпоненты

Часть 2

В. Кочемасов, к. т. н.¹, С. Хорев²

УДК 621.318.4 | ВАК 05.27.01

В первой части статьи, опубликованной во втором номере журнала «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес» за 2022 год, было рассказано об основных параметрах, характеризующих индуктивные радиокомпоненты, а также о проводных индуктивностях с воздушным сердечником. В данном номере рассматривается еще несколько типов индуктивных радиокомпонентов.

ПЛЕНОЧНЫЕ ИНДУКТИВНОСТИ

Прежде чем перейти к описанию пленочных индуктивностей, необходимо несколько слов сказать о самой технологии тонких пленок. Тонкая пленка (thin film) – это слой вещества, толщиной от нескольких монослоев до нескольких микрон, представляющий собой термодинамически стабильную или метастабильную часть гетерогенной системы, занимающей промежуточное положение между отдельными молекулами или макромолекулами и объемными компонентами твердого тела [18]. Методы получения тонких пленок разделяют на химические (например, осаждение или фотолитография) и физические (например, ионное травление, о котором говорилось выше). Технология напыления тонких пленок (физический способ) позволяет выбирать тип подложки с требуемыми параметрами, формировать проводник из сплавов непосредственно во время напыления, задавать ширину и толщину металлического слоя и расстояние между витками катушки. Кроме того, температурная зависимость индуктивности для катушек данного типа определяется не формой катушки, а термодинамическими свойствами подложки. Это происходит за счет молекулярной адгезии слоя проводника в подложку, в силу чего проводник и подложка составляют единую систему. На рис. 13 (<https://www.electricaltechnology.org/2019/07/types-of-inductors.html>) приведена топология пленочной индуктивности и внешний вид изделия, готового для установки на плату.

Как можно увидеть, внешне данная индуктивность похожа (за исключением формы намотки) на индуктивность, показанную на рис. 12а. Отличие, как уже отмечалось, заключается в способе изготовления.

К преимуществам пленочных индуктивностей можно отнести:

- *высокую повторяемость номинала*. Погрешность номинала большинства пленочных индуктивностей не превышает 5%, а чаще всего составляет 1–2%. Это связано именно с особенностями технологии изготовления. При химическом травлении часто возникают так называемые подтравы под маску, что значительно снижает повторяемость изделий. При этом погрешность номинала планарных индуктивностей составляет 5–10%. Повторяемость особенно важна при конструировании синхронных многоконтурных цепей, требующих максимального совпадения параметров пассивных радиокомпонентов. Например, компараторов или корреляционных СВЧ-радиодеталей;
- *возможность выбора подложки под решаемую задачу*. Если в качестве подложки применяется высокочастотная керамика, то это позволяет существенно уменьшать геометрические размеры индуктивности при

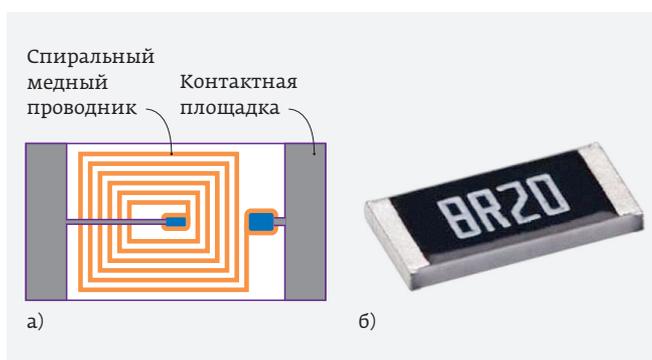


Рис. 13. Пленочная индуктивность: а – топология; б – внешний вид изделия, готового для установки на плату

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

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

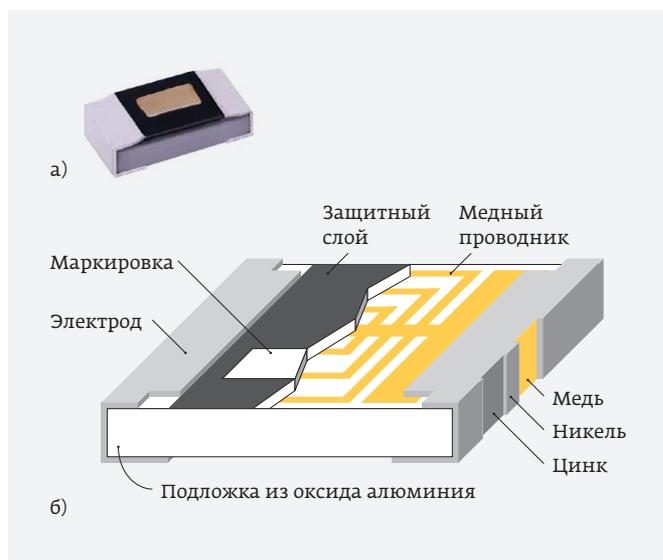


Рис. 14. Внешний вид (а) и конструкция (б) пленочной индуктивности компании Abracon

сохранении номинала и встраивать ее в интегральные сборки. Подложка из ферромагнетика позволяет при тех же размерах получать большие значения номинальной индуктивности. Технология тонких пленок применительно к контурным катушкам индуктивности позволяет получать и другие интересные варианты их исполнения. Например, катушки, индуктивность которых может изменяться с помощью внешнего магнитного или электрического поля. Для этого катушку напыляют на подложку, параметры которой зависят от внешнего воздействия, например механического. Пример подобной катушки описан в [19]. В подобных случаях индуктивность может выступать в роли не только собственно индуктивности, но и в качестве возбуждающего элемента для других эффектов, например поверхностных акустических волн (ПАВ);

- возможность получать тонкие структуры с идентичными параметрами. Данная особенность позволяет

«собирать» пленочные индуктивности в конструкции типа «сэндвич», набирая нужный номинал с высокой точностью. Подобные конструкции называются многослойными индуктивностями, о которых будет рассказано далее.

Среди компаний, выпускающих пленочные индуктивности, следует отметить компании AVX, Applied Thin-Film Products (ATP), Abracon, Vishay, SemiGen и др. На рис. 14 [20] показаны структура и внешний вид однослойной пленочной индуктивности компании Abracon.

В табл. 2 приведены сравнительные характеристики пленочных индуктивностей ведущих производителей (в табл. 2 включены максимальные значения выбранных параметров).

МНОГОСЛОЙНЫЕ ИНДУКТИВНОСТИ

Прямым продолжением пленочных индуктивностей являются многослойные индуктивности. Подобное утверждение основано на том, что одним из способов изготовления многослойных индуктивностей является их формирование из однослойных пленочных индуктивностей. Следует отметить, что понятие «многослойный» касается, в первую очередь, конструктивного исполнения и поэтому многослойными могут быть индуктивности разных видов. На рис. 15 приведены конструкции многослойной индуктивности с воздушным сердечником (рис. 15а [21]) и многослойной индуктивности, набранной из слоев пленочных индуктивностей (рис. 15б [22]). Как видно из рис. 15, принципиального различия в конструкциях нет, за тем исключением, что конструкция из пленочных индуктивностей гораздо более технологична. Кроме того, пленочные индуктивности обладают существенно более высокой точностью за счет технологии изготовления. Следует отметить, что в том случае если слои многослойной индуктивности имеют совмещенные выводы (как это показано на рис. 15), то мы имеем дело именно с многослойной индуктивностью.

Но в ряде случаев выводы каждого слоя могут быть раздельными, и тогда подобная индуктивность переходит в разряд катушек связи. Таким способом изготавливаются

Таблица 2. Характеристики пленочных индуктивностей основных производителей

Компания-производитель	Материал подложки	SRF, ГГц	Добротность/частота, МГц	Точность, ±%
Abracon	Керамика	20	15/500	5–10
Piconics	Керамика/кварц	20	15/200	10–15
SemiGen	Кварц	5	60/1500	1–5
Vishay	Керамика/ферромагнетик	15	35/1700	2–5
AVX	Оксид алюминия (Al ₂ O ₃)/стекло	10	15/450	1–2
ATP	Кварц/оксид кремния (SiO ₂)	5	16,9/200	1–5

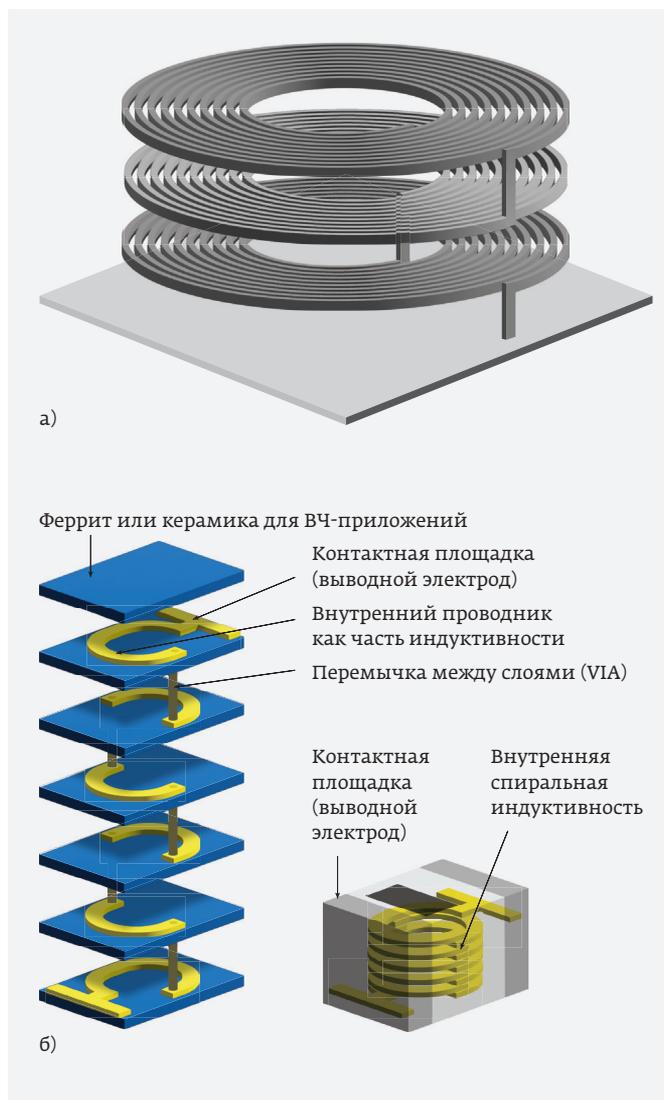


Рис. 15. Многослойные индуктивности с воздушным сердечником (а) и конструкция типа «сэндвич» из пленочных индуктивностей (б)

обмотки трансформаторов, о которых будет рассказано отдельно. В любом случае для многослойных индуктивностей очень важную роль играет взаимоиндукция в слоях и это необходимо учитывать, особенно при конструировании высокочастотных цепей. Одним из проявлений взаимоиндукции является так называемый уход резонансной частоты и появление паразитных гармоник. Кроме того, для многослойных индуктивностей характерна нелинейная зависимость прямых потерь от количества слоев [23].

В последние годы в связи с требованиями снижения размеров и веса радиотехнических устройств, и, в первую очередь, СВЧ-устройств, появился еще один интересный вид индуктивностей. Это так называемые *объемные*, или 3D-индуктивности. Основой для изготовления данного

вида индуктивностей служит технология микроэлектромеханических систем (МЭМС). Она является в настоящее время самой передовой и перспективной технологией в изготовлении СВЧ-устройств. Ее основное назначение – снизить производственные затраты, размеры, вес, потребление и, главное, значительно улучшить технические характеристики СВЧ-компонентов. Она позволяет:

- обеспечить более широкие диапазоны рабочих частот;
- почти полностью отказаться от внешних дискретных компонентов, благодаря чему снижаются омические потери в проводниках;
- обеспечить высокую технологичность производства за счет использования планарного процесса, который совместим с существующими технологическими процессами изготовления цифровых и СВЧ монолитных интегральных схем (ММИС).

По сути, МЭМС-технология включает в себя несколько технологических циклов, а именно:

- объемную микрообработку (Bulk Micromachining). Данный процесс позволяет создавать объемные структуры непосредственно внутри подложки, например методом наращивания;
- поверхностную микрообработку (Surface Micromachining). В этой технологии объемные структуры формируются наложением тонких пленок и удалением промежуточных слоев. При этом промежуточные (вспомогательные) слои могут удаляться многократно без повреждения взаимосвязи основных (базовых) слоев;
- технологию LIGA (RoentgenLithography-Galvanik-Abformung). Данная технология включает в себя рентгеновскую литографию, гальванотехнику и формовку (прессовку) и очень похожа на технологию изготовления пленочных индуктивностей методом ионного фрезерования.

Применительно к индуктивностям МЭМС-технология заключается в удалении части подложки таким образом, чтобы объемная структура индуктивности оказалась приподнятой над подложкой. Или наоборот – наращивание над подложкой заданной структуры. На рис. 16 [24] приведена полученная с помощью электронного микроскопа

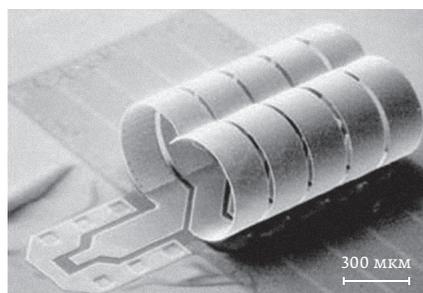


Рис. 16. PARC-соленоид, полученный методом наращивания (PARC – Palo Alto Research Centre)

фотография двойного соленоида, изготовленного методом наращивания над подложкой.

ИНДУКТИВНОСТИ ДЛЯ ЦЕПЕЙ С БОЛЬШИМИ ТОКАМИ И СИЛОВЫЕ ИНДУКТИВНОСТИ

Еще одним интересным видом индуктивностей являются *индуктивности для цепей с большими токами* (High Current Coil) и *силовые индуктивности* (Power Coil), предназначенные для выходных каскадов с высокой выходной мощностью. При этом нельзя путать индуктивности (Coil) с трансформаторами (Inductor) и дросселями (Choke). В частности дроссели, о которых будет сказано отдельно, обладают высоким сопротивлением переменному току и малым сопротивлением постоянному току, а индуктивности предназначены для применения, в том числе в высокочастотных цепях.

Отметим, что чем больше номинальная индуктивность катушки за счет ее геометрических размеров, тем больший ток возникает в ней под воздействием внешнего электромагнитного поля. Этот эффект проявляется, в первую очередь, в индуктивных приемных антеннах и его необходимо учитывать при конструировании топологии схем, чтобы избежать значительных паразитных сигналов из-за наводок и внешних сигналов.

Следует также отметить, что индуктивность катушки может зависеть от силы протекающего через нее тока. Такая зависимость хорошо демонстрируется на примере индуктивностей с сердечниками из разных материалов (рис. 17) [25].

Очень часто в документации, особенно англоязычной, можно встретить упоминание о том, что индуктивности данного типа производятся по так называемым передовым технологиям (Disruptive Technology). На самом деле под этим понятием, кроме общих слов о расширении

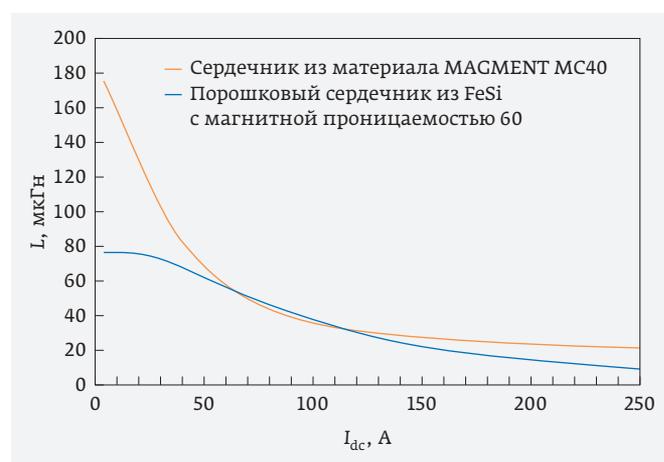


Рис. 17. Зависимость индуктивности (L) от силы постоянного тока (I_{dc}) для индуктивностей с сердечниками, выполненными из разных материалов

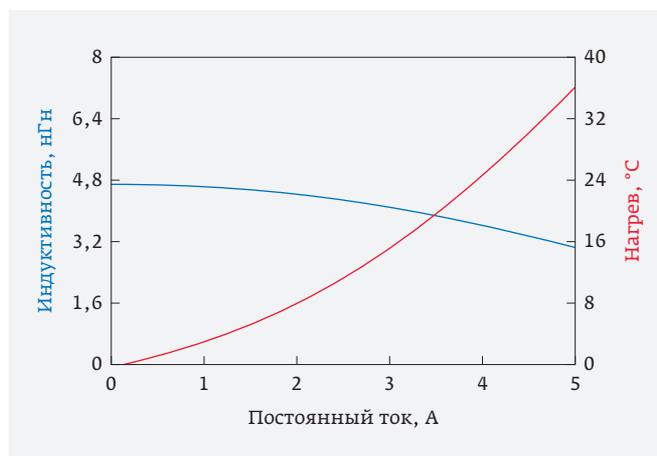


Рис. 18. Зависимости индуктивности и нагрева топологии от силы протекающего тока

партнерства и торговых связей, скрываются известные ранее и получившие распространение в последние годы технологии. В частности, упоминавшаяся ранее технология МЭМС. Тем не менее, определенные особенности при производстве описываемых индуктивностей присутствуют. О них будет рассказано при рассмотрении конкретных моделей.

Следует остановиться еще на одном важном моменте при выборе индуктивностей для больших токов. При протекании тока через индуктивность происходит ее нагрев и, соответственно, изменение геометрии. Это соответствует изменению индуктивности и чем больше сила тока, тем больше изменяется значение индуктивности по сравнению с номинальным. Зависимость индуктивности и нагрева от силы протекающего тока показана на рис. 18 [26].

В англоязычной технической документации существует определенное разночтение в понимании терминов *индуктивности для больших токов* и *силовые индуктивности*. В частности, в материалах компании Coilmaster Electronics Co. часто можно встретить следующее выражение [21]: «Индуктивности для высоких токов, известные также как *определённые силовые индуктивности* или *индуктивности с сердечником из порошкового железа*» (курсив авторов).

Изучая документацию на различные виды индуктивностей данного типа разных производителей, можно сделать вывод, что они отличаются от индуктивностей других типов не столько конструкцией, сколько областью применения. Тем не менее, особенности конструктивного исполнения все-таки есть. Они связаны с эффектами, описанными выше. Поэтому чаще всего индуктивности данного типа имеют большие размеры за счет более толстых проводников и экранированы. Экран изготавливается из ферромагнетиков, чтобы предотвратить взаимовлияние расположенных рядом радиокомпонентов.

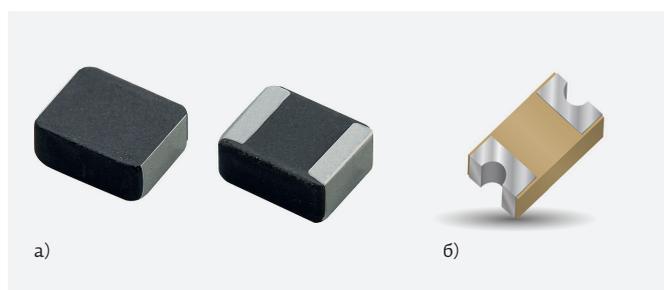


Рис. 19. Индуктивности одного типа разных производителей: а – индуктивность для больших токов компании Coilmaster Electronics Co. серии ML322510HE; б – индуктивность для больших токов серии MLO компании AVX

Но подобная конструкция не является обязательной и ряд компаний ее не применяет.

На рис. 19 для сравнения приведены индуктивности для высоких токов двух компаний-производителей. На рис. 19а [27] приведена индуктивность для больших токов компании Coilmaster Electronics Co. серии ML322510HE. Данная модель предназначена для работы с токами до 9 А и имеет размеры 3,20×2,50×1,0 мм. Изготавливается она на основе композитного легированного сплава. Рабочая частота – до 150 МГц. На рис. 19б [28] показана индуктивность для больших токов серии MLO компании AVX. Это многослойная индуктивность на керамической основе, изготовленная по запатентованной технологии (патент США 6,987,307). Ее размеры соответствуют типоразмеру EIA 0402 и составляют 1,0×0,5×0,35 мм. Она предназначена для работы с токами до 1 А. Рабочая частота выше 2,5 ГГц.

Использование ферромагнетиков для сердечников и экранов, а также более толстые проводники приводят к уменьшению максимальной рабочей частоты за счет прямых потерь сигнала в проводниках и потерь высокочастотной составляющей сигнала в ферромагнетиках.

Это некоторым образом ограничивает области применения данного типа индуктивностей. Чаще всего в качестве областей применения большинство производителей рекомендуют использовать силовые индуктивности в преобразователях постоянного тока (DC-DC) (рис. 20 [29]) или в усилителях с электронным управлением с синхронной широтно-импульсной модуляцией (усилители класса «D»).

Как видно из принципиальных схем, основное назначение индуктивностей для больших токов и силовых индуктивностей заключается в сглаживании пульсаций при включении/выключении устройств и подавлении высокочастотной составляющей, возникающей в результате переходных процессов. Тем не менее, ряд производителей старается не ограничивать область применения индуктивностей для больших токов, поскольку большая мощность выходного сигнала может потребоваться и, например, в задающих высокочастотных цепях. Это требует использования материалов с малой магнитной проницаемостью и малыми потерями на высоких частотах. Для этого некоторые производители разработали собственные, запатентованные технологии изготовления индуктивностей. Например, компания Token Electronics разработала собственную технологию TCDY на основе соединений никеля, которая позволяет применять индуктивности для сильных токов ее производства на частотах до 100 МГц. Компания Vishay является владельцем технологии INLP на основе композитных соединений и ее индуктивности можно применять на частотах до 1 ГГц. У компании AVX технология MLO основана на многослойных немагнитных материалах, что повышает диапазон рабочих частот до 2,5 ГГц и выше. Но и при использовании данных технологий необходимо учитывать зависимость индуктивности от силы протекающего тока. Это хорошо показано на рис. 21 [30] на примере сравнения индуктивностей для сильных токов компании Vishay, с одинаковым номиналом, но изготовленных по разным технологиям.

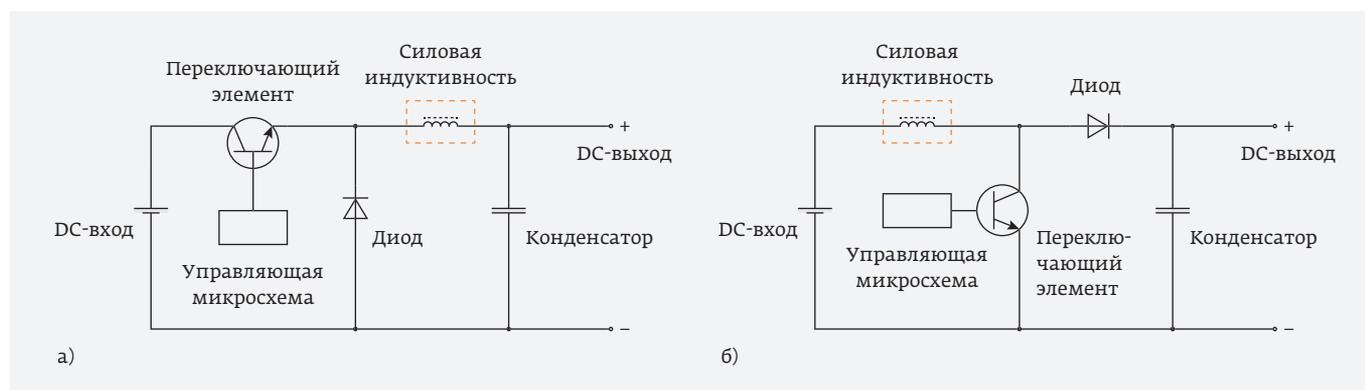


Рис. 20. Принципиальные схемы преобразователей постоянного тока с силовыми индуктивностями: а – понижающий; б – повышающий

СОБСТВЕННЫЕ РАЗРАБОТКИ

Квадратурный делитель/сумматор мощности
Мультиплексер, линейка фильтров

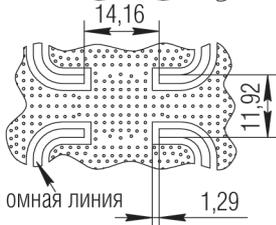


РАЗРАБОТКА
ПРОИЗВОДСТВО
ИСПЫТАНИЯ
ПОСТАВКА

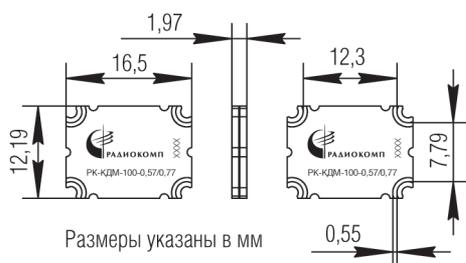
РАДИОКОМП

www.radiocomp.ru

Квадратурный делитель/сумматор мощности РК-КДМ-100-0,47/0,86



50-ти омная линия



Размеры указаны в мм

- Развязка
- Вносимые потери (прямое плечо)
- Вносимые потери (ответвленное плечо)
- КСВН порт 1
- КСВН порт 2
- КСВН порт 3
- КСВН порт 4

Данные устройства способны выдерживать большую мощность относительно своих малых габаритов. Технология изготовления обеспечивает хорошие электрические параметры, высокую повторяемость от партии к партии. Квадратурные делители/сумматоры мощности предназначены для поверхностного монтажа.

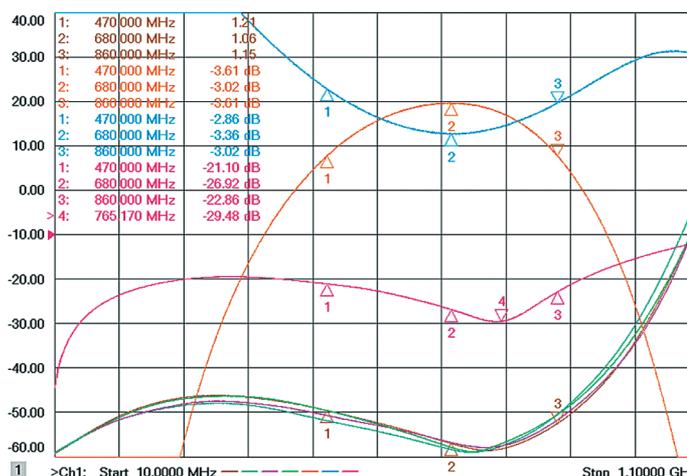
- Диапазон рабочих частот, МГц..... 470 – 860
- Неидентичность амплитуд, дБ 0,5
- Развязка, дБ 25
- Разность фаз, град ± 5
- Максимальная непрерывная мощность, Вт 100
- КСВН 1,25
- Рабочий диапазон температур, °С..... от –55 до +85
- Габаритные размеры, мм 16,5 x 12,2 x 2

Основные преимущества технологии:

- надежность конструкции
- компактное решение
- высокий уровень развязки между каналами, малые потери
- не требует герметизации

В зависимости от условий эксплуатации мы можем предложить различные:

- типы финишного покрытия (иммерсионное золото, иммерсионное серебро, олово)
- конструктивы делителя/сумматора под требуемые габариты
- срок поставки менее 1 месяца



Электрические характеристики квадратурных делителей/сумматоров

Модель	Диапазон частот, ГГц	Развязка, дБ, не менее	КСВН в рабочем диапазоне	Максимальная непрерывная мощность, Вт, не менее	Неидентичность амплитуд в рабочем диапазоне, дБ, не более	Габаритные размеры, мм
РК-КДМ-100-0,57/0,77	0,57 – 0,77	20	1,1 – 1,3	100	0,5	16,5x12,2x2
РК-КДМ-100-0,37/0,73	0,37 – 0,73	23	1,1 – 1,3	100	0,5	16,5x12,2x2
РК-КДМ-100-0,72/1,26	0,72 – 1,26	20	1,1 – 1,3	100	0,5	16,5x12,2x2
РК-КДМ-100-0,37/0,73	0,37 – 0,73	23	1,1 – 1,3	100	0,7	25,4x12,7x2
РК-КДМ-60-1,00/2,00	1,00 – 2,00	23	1,1 – 1,3	60	0,6	14,2x8,9x2
РК-КДМ-60-2,00/4,00	2,00 – 4,00	23	1,1 – 1,3	60	0,7	14,2x8,9x2
РК-КДМ-30-4,00/8,00	4,00 – 8,00	23	1,3 – 1,5	30	0,6	9,2x5,0x2
РК-КДМ-10-8,00/12,00	8,00 – 12,00	23	1,3 – 1,5	10	0,9	6,0x5,0x2

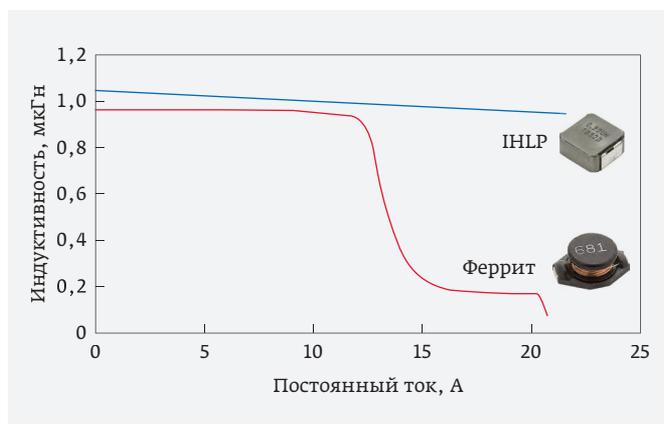


Рис. 21. Сравнение индуктивностей, изготовленных по разным технологиям

Из рис. 21 видно, что для индуктивностей из композитных материалов (технология IHLP) линия зависимости индуктивности от силы протекающего тока имеет малый наклон. Это говорит о том, что влияние тока на номинал не очень существенно. А у индуктивностей на основе феррита наблюдается резкое падение номинала при достижении током определенного значения. Это происходит в результате того, что магнитная проницаемость ферритового сплава резко падает за счет нагрева. Таким образом проявляется эффект, обратный магнитострикции, когда за счет нагрева изменяются геометрические размеры сердечника и, соответственно, магнитная проницаемость материала. Сила тока, при которой наблюдается этот эффект, зависит от типа феррита. Собственно, феррит представляет собой сплав, химическую формулу которого можно представить в виде $MeFe_2O_4$, где Me – металл, который добавляют в сплав. Поэтому в зависимости от того, какой именно металл входит в состав феррита, сила тока, при которой происходит резкий спад магнитной проницаемости, меняется.

Есть еще один очень важный момент при работе с индуктивностями для больших токов и силовыми

индуктивностями. Следует обращать внимание на качество изготовления выводных и монтажных контактов. В документации эти параметры не указываются, но материал, из которого они изготавливаются, а также материал покрытия контактных площадок выяснить можно. Знать эти данные крайне важно при поверхностном или интегральном монтаже. Кроме того, необходимо строго соблюдать технологию монтажа – чистоту поверхности контактных площадок, состав припоя и флюса, температуру пайки и ряд других технологических параметров. При нарушении технологии пайки или некачественном изготовлении выводных контактов в месте пайки возникают микроскопические неоднородности и каверны. Чаще всего это наблюдается для радиокомпонентов с контактными площадками на нижней стороне корпуса (BTC). При протекании сильного тока на этих неоднородностях возникают вихревые токи и значительные токи утечки, которые могут привести к электрическому пробое и выходу всего устройства из строя.

Указанный эффект возникает и на корпусах BGA, для которых существует стандарт IPC610, определяющий нормативы по минимальному расстоянию между шариками припоя, электрически безопасному расстоянию между ними при сдвиге, отсутствию перемычек при пайке, оптимальному составу пакетирующего материала, допустимому количеству пустот при пайке.

ЛИТЕРАТУРА

18. **Борило Л. П.** Тонкопленочные неорганические наносистемы / Под ред. д-ра техн. наук, проф. В. В. Козика. Томск: Томский государственный университет, 2012. 134 с.
19. <https://eepower.com/technical-articles/a-revolutionary-technology-for-cost-tailoring-power-inductive-components/#>
20. Abracon. Thin Film Chip Inductors. ATFC-0201. Revised: 05.20.13.
21. <https://www.hindawi.com/journals/apec/2012/871620>
22. <https://electronics.stackexchange.com/questions/269643/difference-between-wire-wound-and-ceramic-chip-inductors>
23. AVX. Multilayer Organic (MLO) Inductors, High Current.
24. **Maluf N., Williams K.** An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering. Second Edition. 2004.
25. <https://eepower.com/technical-articles/a-revolutionary-technology-for-cost-tailoring-power-inductive-components/#>
26. Abracon. Inductor Reference Guide. 08.28.2020.
27. Coilmaster Electronics Co., Ltd. ML322510HE SERIES – Molding Power Inductors.
28. <https://www.kyocera-avx.com/products/inductors/rfmicrowave-inductors/mlo-hi-q-inductors/>
29. <https://product.tdk.com/en/techlibrary/solutionguide/acoustic-noise.html>
30. Vishay. IHL Power Inductors. Low-profile Power Inductors.

ООО
СМП



ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН
www.SMD.ru

электронные
для поверхностного
монтажа

НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК

- Керамические конденсаторы до 100 мкф
- Синфазные дроссели на ток 10 А




Москва, Ленинградский пр., 80 к. 32; e-mail: sale@smd.ru
Тел.: (499) 158-7396, (495) 940-6244, (499) 943-8780

**15–21 АВГУСТА
ПАТРИОТ ЭКСПО**

2022
ARMY

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ФОРУМ**

ОРГАНИЗАТОР



МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЫСТАВОЧНЫЙ
ОПЕРАТОР



МКВ
МЕЖДУНАРОДНЫЕ
КОНГРЕССЫ И ВЫСТАВКИ

WWW.RUSARMYEXPO.RU