

Современные индуктивные радиокомпоненты

Часть 1

В. Кочемасов, к. т. н.¹, С. Хорев²

УДК 621.318.4 | ВАК 05.27.01

Индуктивные радиокомпоненты являются составной частью многих современных электронных устройств. Сегодня существует множество разновидностей таких компонентов, различающихся конструкцией, индуктивностью и рядом других параметров. Об основных типах, характеристиках и производителях современных индуктивных радиокомпонентов рассказывается в статье.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Прежде чем приступить к описанию катушек индуктивности, как одного из элементов электрических цепей, имеет смысл кратко остановиться на самом определении индуктивности. Физический энциклопедический словарь [1] определяет ее таким образом:

«Индуктивность (от лат. *inductio* – наведение, побуждение) – величина, характеризующая магнитные свойства электрической цепи. Ток, текущий в проводящем контуре, создает в окружающем пространстве магнитное поле, причем магнитный поток Φ , пронизывающий контур (сцепленный с ним), прямо пропорционален току I : $\Phi = LI$. Коэффициент пропорциональности L называют индуктивностью или коэффициентом самоиндукции контура. Индуктивность зависит от размеров и формы контура, а также от магнитной проницаемости окружающей среды...

В электродинамике коэффициент самоиндукции (от лат. *inductio* – наведение, побуждение) – параметр электрической цепи, определяющий величину эдс самоиндукции, наводимой в цепи при изменении протекающего по ней тока и (или) при ее деформации. Термин «индуктивность» употребляется также для обозначения элемента цепи (двухполюсника), определяющего ее индуктивные свойства (синоним – катушка самоиндукции)».

Из этого определения следует, что любой проводник, по которому протекает электрический ток, создает

вокруг себя магнитное поле и, соответственно, обладает индуктивностью.

В общем случае магнитная индукция поля экспоненциально затухает с расстоянием (в отсутствие вокруг проводника магнитных сред), поэтому индуктивность отдельного проводника можно считать исчезающе малой и не учитывать в расчетах. Но при разработке задающих или чувствительных цепей радиоаппаратуры на присутствие и взаимное расположение отдельных проводников следует обращать самое пристальное внимание и предусматривать возможность экранирования их магнитного поля. Если одиночный проводник (рис. 1а) [2] свернуть в кольцо (рис. 1б), то максимальная интенсивность магнитного поля окажется в центре кольца и его затухание станет существенно меньше. Несколько колец, следующих одно за другим, позволяют сформировать катушку

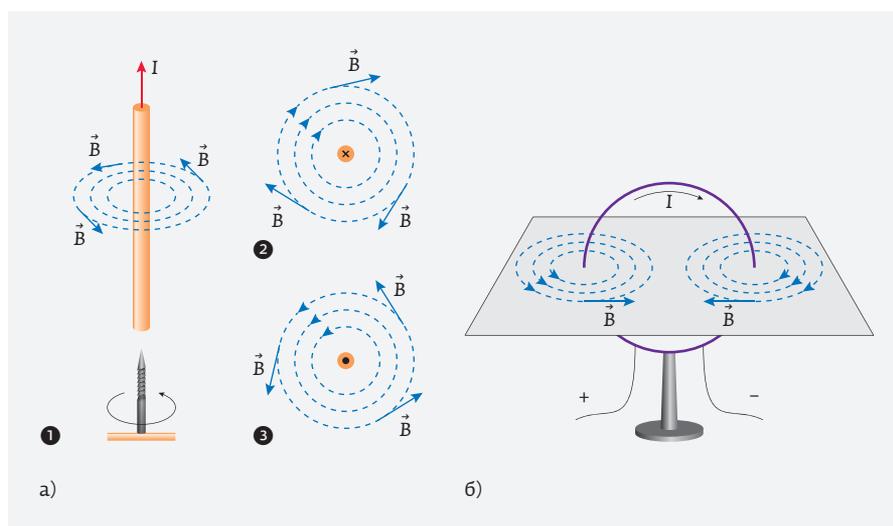


Рис. 1. Магнитное поле одиночного проводника с током (а) и проводника, свернутого в кольцо (б)

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

² ООО «Радиокомп», ведущий инженер, siwi937@yandex.ru.

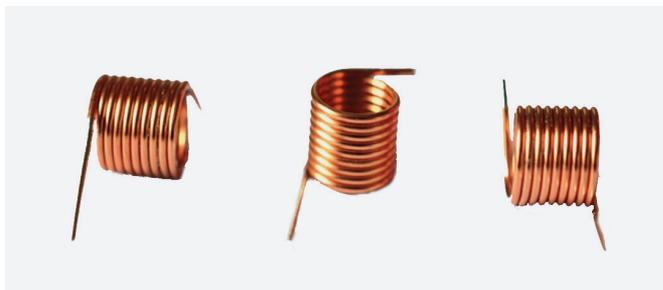


Рис. 2. Простейшая 9-витковая катушка индуктивности

индуктивности. Индуктивность многovitковых катушек пропорциональна квадрату количества витков, поскольку увеличивается не только магнитный поток от каждого витка, но и потокосцепление.

Собственно катушку индуктивности (рис. 2) [3] Большой энциклопедический словарь определяет следующим образом:

«Катушка индуктивности – катушка из провода с изолированными витками; обладает значительной индуктивностью при относительно малой емкости и малом активном сопротивлении. Применяется в качестве одного из основных элементов электрических фильтров и колебательных контуров, накопителя электрической энергии, источника магнитного поля и др.»

В данной статье мы не будем останавливаться на различиях в наименовании этого радиотехнического элемента. Только отметим, что, согласно ГОСТ 19880-74, если элемент электрической цепи предназначен для использования его индуктивности, то его следует называть индуктивной катушкой, а, согласно ГОСТ 20718-75, если индуктивная катушка является элементом колебательного контура и предназначена для использования ее добротности, то ее следует называть катушкой индуктивности.

Можно выделить несколько основных параметров катушки индуктивности, которые определяют ее применение в той или иной электрической цепи.

Индуктивность. ГОСТ 20718-75 [4] определяет несколько типов индуктивности для катушек индуктивности. *Собственная индуктивность* определяется как отношение потокосцепления самоиндукции катушки индуктивности к току, протекающему через нее. Или, иными словами, как количество энергии, запасаемой катушкой при протекании по ней электрического тока. Значение собственной индуктивности зависит от формы, размеров катушки, числа ее витков, а также от размеров, формы и материала сердечника. При этом необходимо учитывать, что собственная индуктивность является частотно-зависимой величиной и при изменении частоты тока, протекающего через катушку, ее собственная индуктивность изменяется. Типичная зависимость собственной индуктивности от частоты показана на рис. 3 [5] на примере

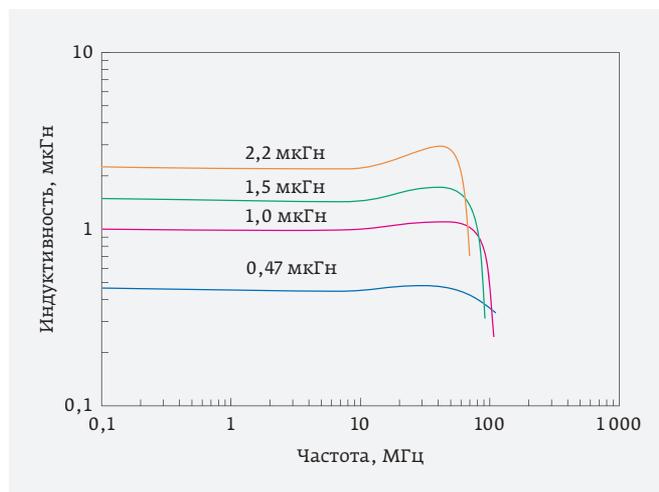


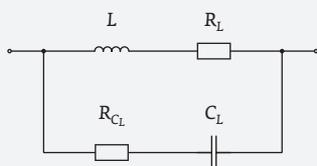
Рис. 3. Типичная зависимость собственной индуктивности от частоты интегральных индуктивностей серии LQM21PN компании Murata

интегральных индуктивностей (чип-индуктивностей) серии LQM21PN компании Murata.

Кроме собственной индуктивности ГОСТ 20718-75 определяет *номинальную индуктивность* – значение индуктивности, являющееся исходным для отсчета отклонений; *начальную индуктивность* – значение индуктивности, определенное при условии отсутствия влияния собственной емкости, изменения начальной проницаемости сердечника и собственной индуктивности; *эффективную индуктивность* – значение индуктивности, определенное с учетом влияния собственной емкости, собственной индуктивности и изменения начальной проницаемости сердечника; *общую индуктивность* – значение индуктивности между началом и концом обмотки и ряд других типов индуктивности. В большинстве случаев данные параметры используются при разработке новых типов и конструкций катушек индуктивности, для инженерных же расчетов чаще всего применяется номинальная индуктивность, которая и указывается на принципиальной схеме устройства рядом с условным графическим изображением (УГО) катушки.

Частота собственного резонанса. Любая катушка индуктивности не является идеальной индуктивностью. В реальной катушке, кроме собственно индуктивности, присутствуют омическое сопротивление проводника, из которого выполнена катушка, и емкость, например межвитковая или емкость монтажа. В общем виде эквивалентную схему катушки индуктивности можно представить так, как показано на рис. 4.

Из рис. 4 можно увидеть, что собственная индуктивность и паразитная емкость образуют параллельный колебательный контур. На частоте собственного резонанса индуктивный и емкостной импедансы становятся



L – собственная индуктивность, включая индуктивность выводов
 R_L – сопротивление потерь
 R_{CL} – потери на межвитковой емкости
 C_L – паразитная межвитковая емкость

Рис. 4. Эквивалентная схема катушки индуктивности

равными, а добротность падает до нуля. На частотах выше частоты собственного резонанса катушка индуктивности имеет только емкостной импеданс. При этом следует иметь в виду, что эквивалентная схема, представленная на рис. 4, корректно работает только на частотах много ниже частоты собственного резонанса. На частотах, близких к частоте первого резонанса, катушку следует рассматривать не как сосредоточенный элемент, а как спиральный волновод. Как, например, в случае спиральных резонаторов или катушек Теслы. В англоязычной литературе этот параметр называется Self Resonance Frequency (SRF). Данный параметр указывается в технической документации на изделие либо явно, либо опосредованно, указанием максимальной рабочей частоты, после которой индуктивность перестает быть сосредоточенным элементом и в ней начинают проявляться волновые эффекты.

Сопротивление потерь ($R_{пот}$). Этот параметр оценивает влияние паразитных эффектов, вследствие которых импеданс катушки перестает быть чисто реактивным. Наличие паразитных эффектов приводит к росту потерь, которые складываются из потерь в проводниках, в диэлектрике, в сердечнике и в экране. Потери в проводниках вызваны несколькими причинами – активное омическое сопротивление провода обмотки; проявление скин-эффекта с увеличением рабочей частоты (суть эффекта заключается в том, что ток вытесняется в поверхностные слои провода и, как следствие, уменьшается полезное сечение проводника при увеличении сопротивления); проявление эффекта близости. Эффект заключается в том, что ток, протекающий по проводу обмотки катушки, под воздействием вихревых токов и магнитного поля вытесняется к периферии катушки. В результате сечение, по которому протекает ток, принимает серповидную форму, что ведет к дополнительному возрастанию сопротивления провода. Потери в диэлектрике определяются межвитковыми утечками и магнитными свойствами диэлектрика. В общем случае можно считать, что

для современных катушек потери в диэлектрике пренебрежимо малы. Переменное магнитное поле индуцирует в окружающих проводниках, например в соседних витках обмотки, вихревые ЭДС, что в свою очередь приводит к появлению вихревых токов (токов Фуко), которые становятся источником потерь из-за омического сопротивления проводников.

Добротность катушки индуктивности. Данная характеристика непосредственно связана с сопротивлением потерь и определяет соотношение между реактивным и активным сопротивлением катушки. Добротность рассчитывается по формуле $Q = \omega L / R_{пот}$. Иногда вместо добротности используют тангенс угла потерь – величину, обратную добротности, определяемую как сдвиг фаз тока и напряжения на катушке в цепи синусоидального сигнала относительно $\pi/2$ для идеальной катушки. Повышение добротности достигается различными способами:

- оптимальным выбором диаметра провода;
- увеличением размеров катушки индуктивности и применением сердечников с высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями;
- намоткой вида «универсаль»;
- применением посеребренного провода или многожильного провода типа «литцендрат» для снижения потерь, вызванных скин-эффектом.

Высокое значение добротности обеспечивает узкую полосу пропускания, что чрезвычайно важно в частотозадающих цепях или в узкополосных фильтрах. Также высокая добротность приводит к низким потерям и снижению энергопотребления. Добротность катушки индуктивности является частотно-зависимой характеристикой, в которой учитываются все зависящие от частоты параметры – собственно индуктивность, активные и реактивные потери, емкость, скин-эффект проводника, потери в материале магнитного сердечника. Зависимость добротности катушки индуктивности от частоты (рис. 5) [6] может быть выражена через ослабление сигнала.

Температурный коэффициент индуктивности (ТКИ).

Это параметр, определяющий зависимость индуктивности от температуры окружающей среды. Он характеризует относительное изменение индуктивности катушки при изменении температуры на 1°C . Температурная нестабильность индуктивности обусловлена целым рядом факторов: при нагреве увеличиваются длина и диаметр провода обмотки, длина и диаметр каркаса, в результате чего изменяются шаг и диаметр витков. Кроме того, под воздействием температуры меняется диэлектрическая проницаемость каркаса, что ведет, в свою очередь, к изменению собственной емкости катушки. Очень существенно также влияние температуры на магнитную проницаемость ферромагнетика сердечника.

На настоящий момент не существует общепринятой системы классификации катушек индуктивности. Тем

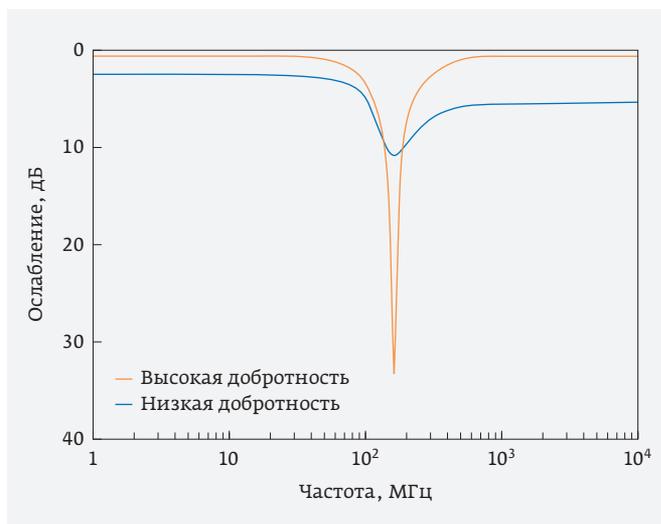


Рис. 5. Зависимость добротности (ослабления сигнала) от частоты

не менее, катушки индуктивности принято разделять, в частности, по назначению:

- *контурные катушки* предназначаются для работы в колебательных контурах входных цепей приемных устройств, в узкополосных и широкополосных фильтрах, в промежуточных и оконечных цепях передающих устройств, задающих генераторах и др.;
- *катушки и трансформаторы связи* используются для передачи энергии от оконечного каскада передатчика в антенное устройство и от антенного устройства – во входную часть приемника, а также для связи отдельных цепей различных каскадов радиоэлектронных устройств;
- *дрессели* – катушки индуктивности, обладающие высоким сопротивлением переменному току и малым сопротивлением постоянному. Применяются в цепях питания радиотехнических устройств в качестве фильтрующего элемента. Для сетей питания с частотами 50–60 Гц выполняются на сердечниках из трансформаторной стали. На более высоких частотах также применяются сердечники из пермаллоя или феррита. Особая разновидность дросселей – помехоподавляющие ферритовые бочонки (бусины) на проводах;
- *сдвоенные дроссели* – это две намотанные встречно катушки индуктивности, используются в фильтрах питания. За счет встречной намотки и взаимной индукции более эффективны для фильтрации синфазных помех при тех же габаритах. Сдвоенные дроссели получили широкое распространение в качестве входных фильтров блоков питания, в дифференциальных сигнальных фильтрах цифровых линий, а также в звуковой технике. То есть они

применяются как для защиты источников питания от попадания в них наведенных высокочастотных сигналов, так и во избежание засорения питающей сети электромагнитными помехами. На низких частотах используются в фильтрах цепей питания и обычно имеют ферромагнитный (из трансформаторной стали) или ферритовый сердечник;

- *дрессели высокой частоты* представляют собой катушки индуктивности, предназначенные для создания в электрической цепи реактивного сопротивления на высокой частоте;
- *катушки переменной индуктивности (устаревшее название – вариометры)* – это катушки, индуктивность которых можно изменять в процессе эксплуатации для перестройки колебательных контуров. Они состоят из двух катушек, соединенных последовательно. Одна из катушек неподвижная (статор), другая – располагается внутри первой и вращается (ротор). При изменении положения ротора относительно статора изменяется величина взаимной индукции, а следовательно, и индуктивность катушки. Такая система позволяет изменять индуктивность в 4–5 раз. В ферровариометрах индуктивность изменяется перемещением ферромагнитного сердечника.

Существуют и другие варианты разделения катушек индуктивности, например: *по частотному диапазону* (длинноволновые, средневолновые, коротковолновые, ВЧ- и СВЧ-катушки индуктивности); *по типу намотки* (однослойные катушки с рядовой и шаговой обмоткой и многослойные катушки с произвольной, рядовой, универсальной и секционированной обмоткой); *по конструкции* (цилиндрические, кольцевые, спиральные, бескаркасные и с каркасом, с сердечником и без него, экранированные и без экрана); *по методу изготовления намотки* (намотанные, печатные, тонкопленочные, вожженные) и др.

Кроме того, у каждого производителя катушек индуктивности может существовать и свое собственное разделение катушек по типу и назначению. Например, компания «Сандер Электроникс» выделяет так называемые *антенные катушки индуктивности*, включая в них рамочную антенну, индукционную петлю и ненаправленный круговой излучатель (антенна типа DDRR).

Существует еще одна система классификации индуктивностей, принятая многими современными зарубежными производителями элементной базы. Она описана в [7]. Данная система классификации является комбинированной и включает в себя разделение не только по конструктивному исполнению (в частности, по типу сердечника – Types Of Inductors Based On Their Core), но и по способу применения (Types of Inductors Based on Their Usage). Согласно этой классификации, отдельно выделяются:

- индуктивности с воздушным сердечником;
- индуктивности с сердечниками из феррита, ферромагнетика, порошкового железа, многослойной стали;
- многослойные, пленочные и объемные индуктивности;
- мощные индуктивности и индуктивности для больших токов;
- переменные индуктивности;
- индуктивности для радиочастотного диапазона;
- трансформаторы и дроссели, в том числе сдвоенные, а также катушки и трансформаторы связи.

Ниже многие из указанных типов индуктивностей будут рассмотрены подробно.

Прежде чем приступить к описанию конкретных моделей катушек индуктивности, следует остановиться на очень важном моменте – системе контроля качества изделий. Данная система начала разрабатываться для нужд Министерства обороны США еще в начале 60-х годов прошлого века. В настоящий момент она принята большинством производителей во всём мире и получила название Система стандартов Министерства обороны США (United States Military Standard) и обозначается литерами MIL. Данная система включает в себя справочники (MIL-HDBK), спецификации (MIL-SPEC), стандарты (MIL-STD), технические условия (MIL-PRF) и ведомости материалов (MIL-DTL). Основным документом, определяющим структуру системы стандартов и контроля качества, является MIL-HDBK-217F, утвержденный 2 декабря 1991 года. Согласно этому документу, катушки индуктивности должны соответствовать требованиям, изложенным в MIL-T-27, MIL-T-21038, MIL-T-55631 и других материалах, обозначаемых MIL-T. Буква «Т» в названии документа соответствует английскому Transformer. Кроме того, при производстве электронной элементной базы производитель обязан руководствоваться системой стандартов: MIL-STD-188, в котором перечислены требования к изделиям в области телекоммуникации, и MIL-STD-810, определяющим методы лабораторного тестирования оборудования. Следует отметить, что производитель вправе создать собственную систему требований к параметрам своих изделий и контроля их качества. При необходимости он проводит их сертификацию на соответствие требованиям MIL, после чего корпоративная система включается в единую систему. Кроме стандартов MIL, согласно документу MIL-STD-188-110B, утвержденному 9 марта 2000 года, допустимы и другие стандарты качества: федеральные – FED-STD, стандарты НАТО – STANAG, международные стандарты связи – ITU и др. Кроме того, следует иметь в виду, что практически в каждом стандарте существует еще внутренняя градация, имеющая, как правило, литерное обозначение. Применительно к индуктивностям это литеры S, R, P и M. Литерное обозначение

показывает так называемый фактор качества (Q), определяющий степень отклонения параметров изделия от параметров, указанных в стандарте, например MIL-T-27. Таким образом, при конструировании радиоаппаратуры и выборе элементной базы для нее необходимо выяснить, какому именно стандарту соответствует то или иное изделие и внимательно его изучить. Подобная информация указывается в технической документации на изделие.

В Российской Федерации действуют стандарты, утверждаемые Международной электротехнической комиссией (МЭК). Основным документом, определяющим порядок сертификации изделий электронной техники, является IECQ 03-3 – «Система МЭК по оценке качества электронных компонентов». В России определяющим документом является Система сертификации изделий электронной техники МЭК – РД 50-667-88, вступившая в действие 1 июля 1988 года. Применительно к трансформаторам и катушкам индуктивности, применяемым в электронной аппаратуре и системах дальней связи, действует ГОСТ Р МЭК 1007-96, в котором, в том числе, определены методы измерений и методики испытаний. Следует отметить, что хотя Российская Федерация является участником международных систем сертификации МЭК и ЕЭК ООН, в России действует также множество обязательных и добровольных систем сертификации, в том числе ведомственных. На это следует обращать самое пристальное внимание при выборе конкретного типа индуктивности для разрабатываемого устройства. Наилучшим вариантом будет соответствие индуктивности требованиям Госстандарта России и МЭК.

ПРОВОДНЫЕ ИНДУКТИВНОСТИ С ВОЗДУШНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Как уже отмечалось выше, разнообразие вариантов исполнения контурных катушек индуктивности очень велико. Даже катушки индуктивности общего назначения насчитывают не один десяток типов и вариантов конструктивного исполнения. Поэтому имеет смысл остановиться на тех типах индуктивностей, которые представляют наибольший интерес с точки зрения конструирования радиотехнических устройств. В последние годы электронные устройства, если можно так выразиться, «уходят» в области высоких и сверхвысоких частот – СВЧ и КВЧ. В связи с чем второе рождение получают индуктивности, которые применялись в последние годы сравнительно редко. Речь пойдет о катушках индуктивности без сердечника, или так называемых Air Core Inductors (ACI). Следует отметить, что этим термином называют не только индуктивности без сердечника, но и индуктивности, намотанные на сердечник из немагнитного материала или имеющего малое значение магнитной проницаемости. Чаще всего это пластик или керамика без магнитных компонентов. Кроме того, данный тип индуктивностей выполняется намоткой провода на каркас (или без

каркаса), поэтому их называют еще проволочными или проводными индуктивностями (Wirewound Inductors). Ранее в СССР было принято название *моточные* индуктивности, правда, касалось оно, в первую очередь, трансформаторов и дросселей. АСІ являются самыми высокочастотными из всех возможных типов индуктивных катушек, поскольку не требуют наличия каркаса из магнитных материалов, увеличивающего номинальную индуктивность, но приводящего к росту потерь на высоких частотах. Номинальная индуктивность АСІ, как правило, не превышает единиц, максимум десятков нГн, что позволяет использовать их в задающих или фильтрующих цепях СВЧ- и КВЧ-диапазонов. Температурная зависимость индуктивности (ТКИ) для катушек без сердечника линейная, но следует иметь в виду, что изменение номинальной индуктивности даже на доли процента приводит к существенному изменению резонансной частоты задающих контуров. Чаще всего зависимость номинальной индуктивности от температуры в документации на изделие указывается не явно, а через ТКИ, указанием допустимого диапазона изменения. Например, в документации на индуктивности с воздушным сердечником серий 0806SQ–0908SQ компании Coilcraft она указана как 5–70 ppm/°C. С другой стороны, у индуктивностей с воздушным сердечником не самая высокая добротность, поэтому конструктору необходимо искать разумный компромисс между повышением частоты рабочего диапазона и добротностью. Оптимальным выбором в этом отношении были бы индуктивности, изготовленные по микрополосковой технологии. Но микрополосковая линия представляет собой волновод, поэтому микрополосковые индуктивности не являются дискретным элементом, а представляют собой распределенную индуктивность, для расчета которой обычные формулы не подходят и ее влияние на электрический сигнал отличается от такового для дискретной индуктивности. Кроме того, при равном значении номинальной индуктивности микрополосковая индуктивность имеет большие геометрические размеры, чем индуктивности, выполненные по другим технологиям. В ряде случаев это не играет существенной роли, но чаще всего не позволяет применять микрополосковые индуктивности для интегрального монтажа. Кроме тех случаев, когда основой



Рис. 6. Высокочастотные индуктивности компании AVX: а – серии AS; б – серии AL; в – серии LCWC

микросборки является микрополосковая топология. При применении дискретной контурной катушки в задающих цепях основную роль играет не номинальная индуктивность катушки, а ее добротность. Индуктивности с воздушным сердечником имеют более высокое значение SRF, но больше подвержены температурным эффектам за счет изменения геометрических размеров. Катушки на керамическом сердечнике более термостабильны, но менее высокочастотны за счет потерь в материале сердечника на высоких частотах.

Различные производители по-разному решают проблемы, указанные выше. Это может быть, в частности, более «жесткая» (hard) форма намотки, уменьшающая изменение геометрии катушки из-за влияния температуры, дополнительная фиксация намотки немагнитными материалами, намотка на керамический каркас с низкой теплопроводностью. Например, на рис. 6 представлено несколько вариантов высокочастотных контурных катушек компании AVX.

На рис. 6а [8] показана индуктивность серии AS, отличительной особенностью которой является квадратное сечение намотки. Подобная намотка позволяет добиваться высокой добротности (до 130) и высокого значения частоты собственного резонанса (например, не ниже 5,2 ГГц для модели AS0808N1*TR). Катушки квадратного сечения имеют преимущества в изготовлении по сравнению с тороидальными катушками аналогичных параметров. Кроме того, они более технологичны при установке на плату. Для облегчения пайки контактные выводы покрываются сплавом олова и серебра. Кроме того, индуктивности данной серии возможно применять в цепях с высокими токами, до 4,4 А. Количество витков, определяющих значение частоты собственного резонанса и максимальную рабочую частоту, составляет от 3 до 7.

На рис. 6б [9] показана индуктивность серии AL, отличительной особенностью которой заключается в том, что витки катушки склеиваются вместе под воздействием ультрафиолетового облучения. Данную серию также называют «фиолетовой» – Violet, поскольку после склейки она приобретает фиолетовый цвет. Получившаяся в результате склеивания конструкция препятствует изменению диаметра намотки, межвиткового расстояния и надежно фиксирует катушку внутри немагнитного каркаса, определяющего вертикальный и горизонтальный размеры индуктивности. Катушки индуктивности данной серии также имеют высокую добротность (до 145) и высокое значение SRF (не ниже 12,5 ГГц для модели AL12A02N5KTR). Данную серию можно применять в цепях с токами до 4 А.

На рис. 6в [10] приведена индуктивность серии LCWC. Катушки данной серии наматываются на керамическое основание, играющее роль сердечника. Сверху индуктивность покрывается клеем, затвердевающим под воздействием ультрафиолетового облучения. Данная серия предназначена полностью для автоматической пайки

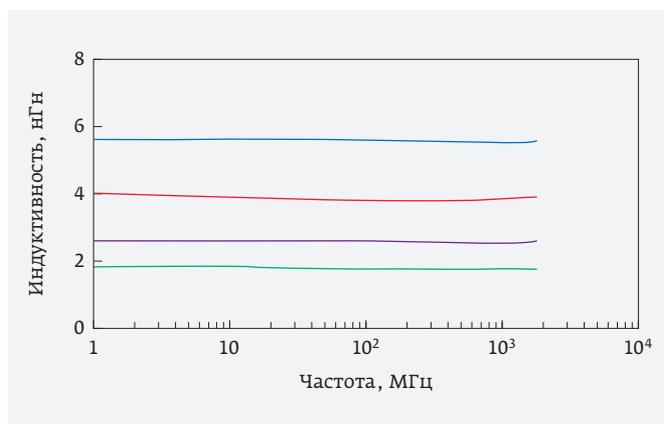


Рис. 7. Зависимости номинальной индуктивности от частоты для некоторых моделей серии AL компании AVX

на роботизированных линиях. Добротность индуктивностей данной серии несколько ниже, чем у описанных выше (до 88), но выше значение частоты собственного резонанса (12,9 ГГц). Применение керамического основания позволяет добиваться стабильности номинального значения индуктивности в зависимости от частоты не хуже 2% от номинала. Аналогичную погрешность имеют и индуктивности серий AS и AL. На рис. 7 [9] показаны зависимости номинальной индуктивности от частоты для индуктивностей серии AL.

В последние годы одним из перспективных направлений в радиоэлектронике является применение так называемых сверхширокополосных (СШП) сигналов. В английском обозначении UWB (Ultra Wide-Band). В устройствах, использующих этот тип сигналов, часто требуется не узкая полоса пропускания, а как можно более широкий диапазон, в котором дискретные элементы сохраняют свои



Рис. 9. Линейка моделей широкополосных конических индуктивностей компании Cowanda

параметры. В частности, интерес представляют широкополосные и сверхширокополосные индуктивности. Одним из способов увеличить диапазон рабочих частот является изменение формы намотки катушки индуктивности, например, так называемые *конические индуктивности* (conical inductors). Широкополосность конических (конусных) катушек индуктивности имеет ту же природу, что и у спиральных индуктивностей – плавное изменение диаметра намотки провода. За тем исключением, что, в отличие от спиральных индуктивностей, у конусных катушек магнитное поле сосредоточено внутри намотки и поэтому их добротность выше. Для примера на рис. 8 [11] показано изменение номинальной индуктивности в зависимости от частоты для индуктивностей серии CC45T47K240G5C2 компании Piconics, выраженное через прямые и обратные потери.

Максимальная рабочая частота конических индуктивностей данной компании составляет 65 ГГц, а номинальная индуктивность может достигать 8 мкГн. За счет использования тонкого провода (диаметром меньше 0,127 мм) и оптимального угла конуса прямые потери не превышают -0,35 дБ, а обратные не хуже -20 дБ. Добротность большинства моделей составляет 25–30 на частоте 10 МГц.

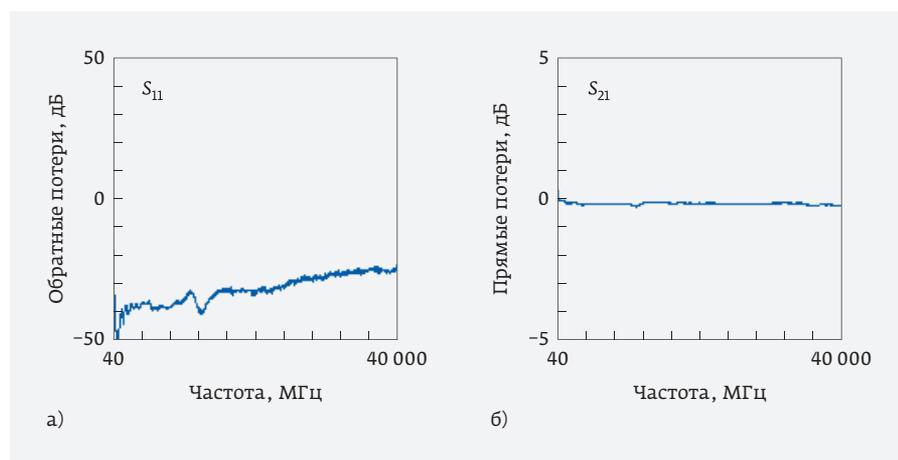


Рис. 8. Обратные (а) и прямые (б) потери в зависимости от частоты индуктивностей серии CC45T47K240G5C2 компании Piconics

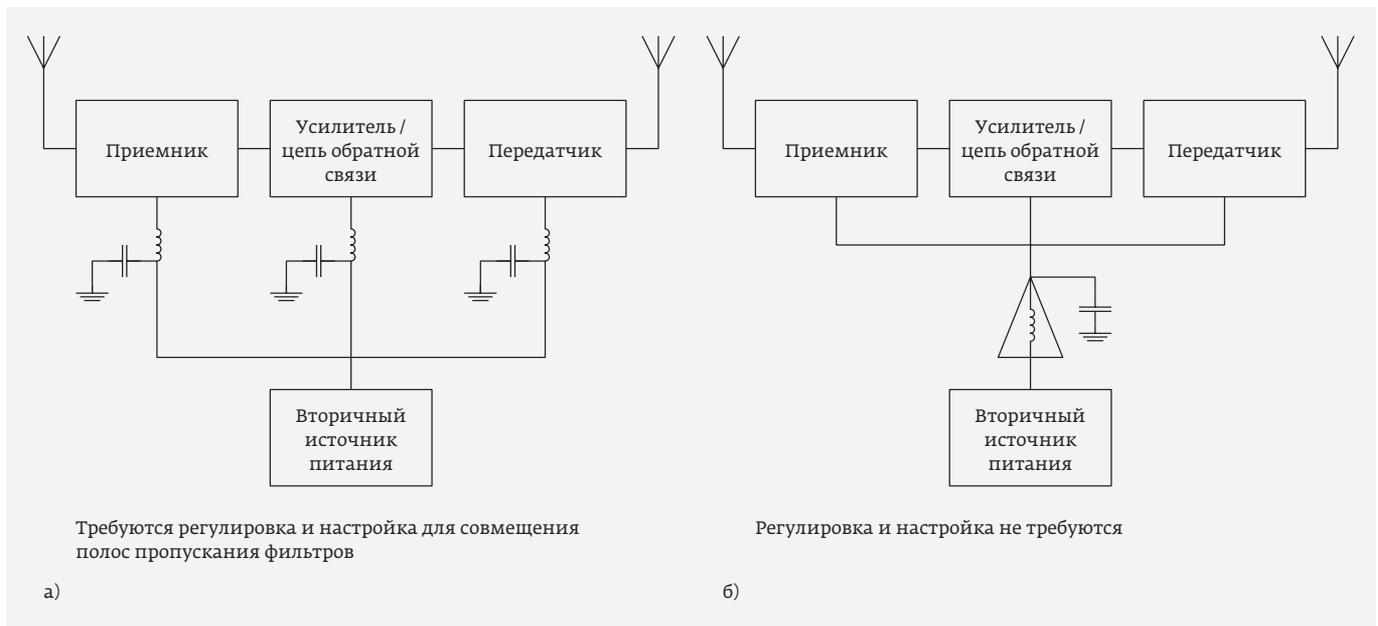


Рис. 10. Сравнение блок-схем аналогового назначения: а – с тремя LC-фильтрами; б – с заменяющей их широкополосной конической индуктивностью

Также следует обратить внимание на широкополосные конические индуктивности компании Gowanda, линейка моделей которых приведена на рис. 9 [12]. Они

обеспечивают диапазон частот от 40 МГц до 40 ГГц, предсказуемую частотную характеристику и значения переменного тока до 1,4 А. Данная линейка индуктивностей

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

Фильтры ВЧ/СВЧ, в том числе переключаемые и перестраиваемые, и устройства на их основе для частот до 26,5 ГГц и выше

- Диплексеры
- Мультиплексеры
- Генераторы
- Фазовращатели
- Делители/сумматоры мощности
- Направленные ответвители

Любые виды заказов:

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



Разработка, производство, испытания устройств с учетом требований заказчика

- Устройства на сосредоточенных элементах
- Устройства на керамических резонаторах
- Гребенчатые и встречно-стержневые фильтры
- Моноблочные керамические фильтры
- Устройства на микрополосковых линиях
- Волноводные устройства
- Устройства по технологии LTCC

109316, Москва, Волгоградский проспект, 42 Отдел продаж: +7 495 95 777 45 Техподдержка: +7 495 361 09 04

была специально разработана для использования в высокочастотных цепях с целью максимально возможного снижения влияния паразитной емкости и обеспечения ультранизких активных потерь.

Преимущество использования широкополосных конических индуктивностей хорошо видно на примере сравнения двух блок-схем аналогичного назначения (рис. 10) [13]. Как нетрудно заметить, для схемы, представленной на рис. 10а, требуется в три раза больше электронных компонентов (индуктивностей и конденсаторов), чем для схемы, приведенной на рис. 10б. Уменьшение количества компонентов снижает паразитные помехи и наводки, возникающие в том числе за счет взаимоиндукции катушек индуктивности, и не требует дополнительных мер для их компенсации. Также значительно снижаются прямые потери при прохождении сигнала. Это особенно важно для высокочастотных и СВЧ-цепей, в которых основным источником радиотеплового шума, снижающего чувствительность, являются собственные шумы пассивных радиокомпонентов. Кроме того, необходимость совмещения полос пропускания отдельных фильтров требует использования переменных (variable) радиокомпонентов и широкополосной измерительной аппаратуры.

Прямое сравнение конических индуктивностей разных производителей достаточно затруднительно, поскольку производители стараются соответствовать требованиям стандартов MIL-T. Тем не менее, следует обращать внимание на дополнительные параметры, которые, как правило, указываются в технической документации:

- диаметр проволоки, которой производится намотка. От этого параметра зависит проявление

Таблица 1. Сравнительные характеристики конических индуктивностей основных мировых производителей*

Компания-изготовитель	Диапазон рабочих частот	Диапазон охватываемых номиналов, мкГн	Добротность на частоте 10 МГц
Piconics	10 МГц – 65 ГГц	0,5–7,0	12–60
Coilcraft	10 МГц – 40 ГГц	0,53–8,0	12–55
Gowanda	40 МГц – 73 ГГц**	0,165–10,7	15–70

* Данные взяты из документации, доступной на официальных сайтах производителей.

** Существуют модели, предназначенные для работы на частотах до 100 ГГц.

скин-эффекта и, соответственно, величина прямых потерь на прохождение. Компания Piconics, например, применяет при изготовлении конических индуктивностей провод диаметром от 0,0799 мм (40 AWG) до 0,035 мм (47 AWG);

- материал, из которого изготавливается провод. Чаще всего применяется латунь (сплав меди, цинка и олова в разном соотношении). Но некоторые компании, в частности AVX, Gowanda и Piconics, используют либо чистую медь, либо серебро, либо сплав меди и серебра типа биллона или шибуичи ($\frac{3}{4}$ меди и $\frac{1}{4}$ серебра);
- состав припоя, которым покрываются контактные площадки или выводы индуктивностей. У качественных индуктивностей выводы покрываются золотом, а контактные площадки выполняются из сплава титана и вольфрама, которые тоже покрываются золотом. В качестве припоя, который наносится на поверхности, используется низкоплавкий припой Гутри.

Сравнение характеристик конических индуктивностей разных производителей приведено в табл. 1.

Еще одним интересным видом индуктивностей с воздушным сердечником можно считать так называемые

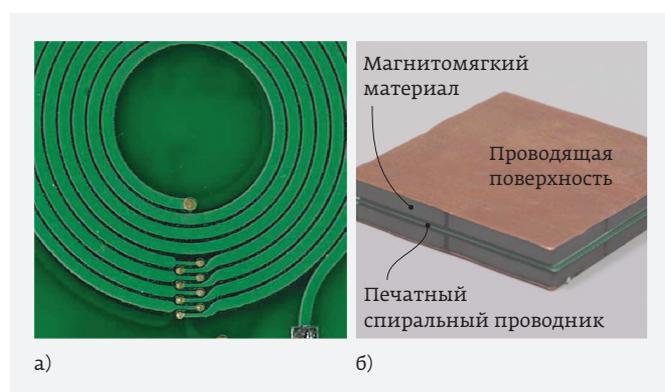


Рис. 11. Планарная «псевдолопосковая» индуктивность: а – топология; б – внешний вид готовой индуктивности

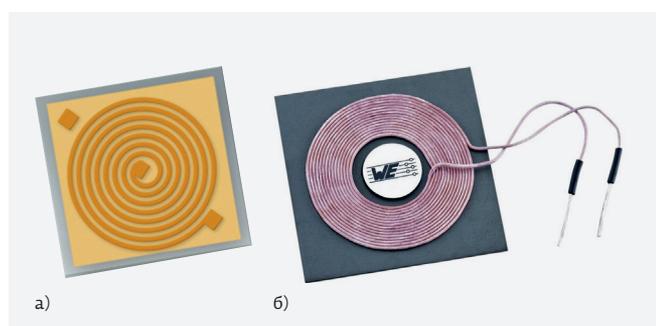


Рис. 12. Сравнение внешнего вида планарных индуктивностей, изготовленных по разным технологиям: а – по технологии напыления с последующим травлением; б – намоткой провода с проклеиванием



САМОЕ ПОСЕЩАЕМОЕ ОТРАСЛЕВОЕ
МЕРОПРИЯТИЕ СЕВЕРО-ЗАПАДА
РОССИИ!*

XXI МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА
& ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**

21-23
СЕНТЯБРЯ
2022
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ



**НАПОЛНЯЙТЕ КЛИЕНТСКУЮ БАЗУ
- ОСНОВУ ВАШЕЙ ЭКОСИСТЕМЫ!**



*Выставку 2021 года посетили более 7 700 специалистов



www.radelexpo.ru
(812) 718-35-37

планарные индуктивности. Они изготавливаются на керамической подложке. При этом следует различать планарные (planar) индуктивности и пленочные (thin) индуктивности, о которых будет рассказано отдельно. Различие заключается в способе изготовления. Планарные индуктивности производятся методом фотолитографии или ионного травления (фрезерования).

При работе с англоязычной технической документацией следует обратить внимание на то, что индуктивности обозначаются термином coil, а термин inductor относится к трансформаторам. Поэтому thin coil или planar coil – это, соответственно, пленочная или планарная индуктивность, а planar inductor – плоский трансформатор. Хотя в некоторых случаях термин inductor применяют и в отношении индуктивностей, что может приводить к путанице при поиске необходимой технической документации.

Одним из лидеров в производстве планарных индуктивностей является компания IBM (Ion Beam Milling) [14]. Компания IBM тесно сотрудничает с фирмой Piconics и изготавливает планарные индуктивности по ее заказу. Отличительной особенностью индуктивностей данного типа является то, что в качестве подложки используются соединения, имеющие малые потери на высоких частотах и высокое значение диэлектрической проницаемости. Например, кварц ($\epsilon=4,2$) или сапфир ($\epsilon=9,5-11,5$). Это позволяет уменьшить геометрические размеры как проводников, так и самой индуктивности и использовать планарные индуктивности в интегральных сборках и СВЧ- и КВЧ-цепях, в частности задающих.

Планарные индуктивности изготавливаются и по так называемой псевдодолосковой технологии. В этом случае печатный проводник в виде спиральной или прямоугольной катушки помещается между пластинами диэлектрика с односторонней металлизацией, как это показано на рис. 11 [15]. Стандартный размер пластины вне зависимости от номинальной индуктивности составляет $0,64 \times 0,64 \times 0,38$ мм.

Конструкция индуктивностей этого типа относится к так называемым слоеным конструкциям (Layered construction) и позволяет комбинировать слои в зависимости от задачи. Для некоторых задач между печатным проводником (рис. 11а) и металлической поверхностью размещается диэлектрик, а для других – слои из магнетомягкого материала, например пермендюра, феррита или магнитного диэлектрика. Сам же печатный проводник изготавливается из диэлектрика с односторонним фольгированием.

К этому же типу планарных индуктивностей можно отнести и индуктивности, изготавливаемые простой намоткой провода на плоскую поверхность или травлением полосок на одностороннем диэлектрике. В основном, данный вид индуктивностей используется в качестве антенн в мобильных устройствах или в качестве датчиков, например в набирающей популярность системе RFID-меток.

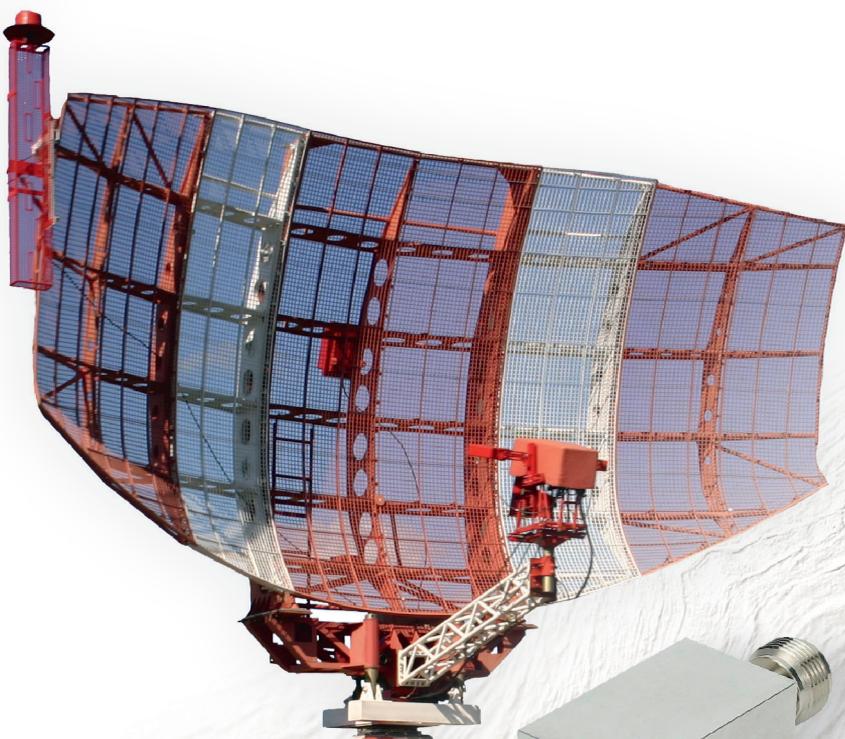
При изготовлении возможна и простая намотка с последующим приклеиванием по месту, и вваривание готовой катушки в диэлектрик, например гибкий. Для сравнения на рис. 12 показаны планарная интегральная индуктивность компании SemiGen (рис. 12а) [16] (выполнена по технологии напыления с последующим травлением) и проводная планарная индуктивность, используемая в качестве антенны в приемниках компании Würth Elektronik (рис. 12б) [17] (выполнена по технологии намотки провода с приклеиванием).

ЛИТЕРАТУРА

1. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А. М. Прохоров, ред. кол. Д. М. Алексеев, А. М. Бонч-Бруевич, А. С. Боровик-Романов и др. – М.: Советская энциклопедия, 1984.
2. <https://online.mephi.ru/courses/physics/electricity/data/course/6/6.2.html>
3. <http://uralnash.ru/catalog/korpora-i-komponenty/komponenty/39-katushki-induktivnosti>
4. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294832/4294832813.htm>
5. Chip Inductors. – Murata Manufacturing Co., Ltd, O05E.pdf. Nov. 25, 2013.
6. <https://saratov.terraelectronica.ru/news/5962>
7. <https://www.electricaltechnology.org/2019/07/types-of-inductors.html>
8. Square Air Core RF Inductors. AS Series: <https://www.kyocera-avx.com/products/inductors/rfmicrowave-inductors/>
9. RF/Microwave Inductors AL Series – Air Core Inductors: <https://www.kyocera-avx.com/products/inductors/rfmicrowave-inductors/>
10. Wire wound chip inductor. LCWC Series: <https://www.kyocera-avx.com/products/inductors/rfmicrowave-inductors/>
11. Surface Mount Broadband Conical Inductors. Rev A-2018: <https://www.piconics.com/wp-content/uploads/2021/03/SMT-Broadband-Conical-Data-Sheet.pdf>
12. Gowanda: индуктивности, дроссели, трансформаторы, EMI / RFI фильтры: http://www.radiocomp.ru/joom/images/storage/docs/brochure/Gowanda_www.pdf
13. Piconics. Broadband Conical Inductors. Rev.A-2009: https://www.tect-electronics.com/uploads/files/Piconics/Conical%20page%201%20_%20page%202.pdf
14. **Кочемасов В., Хорев С.** Продукция компании Ion Beam Milling (краткий обзор) // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2013. № 5. С. 102–106.
15. **Chi Kwan Lee, Su Y. P., Ron Hui S. Y.** Printed Spiral Winding Inductor With Wide Frequency Bandwidth // IEEE Transactions on Power Electronics. 2011. V. 26. № 10. PP. 2936–2945.
16. Spiral Inductor Coils – SemiGen: www.semigen.net.
17. <https://www.fv-elektrotechnik.de/files/fv/schlussberichte/Schlussbericht%20IGF%2092%20EN%20WiPoS.pdf>

Малозумящие усилители Yingtron

Компания **Yingtron Microwave Electronics** выпускает широкий ассортимент малозумящих усилителей в бескорпусном исполнении (в виде кристаллов). Все усилители согласованы по входу и выходу на 50 Ом, имеют высокую линейность, их коэффициент усиления слабо зависит от частоты.



Радары

СВЧ модули

Беспроводная связь

Измерительная аппаратура



- Коэффициент усиления, в зависимости от модели: от 8 до 29 дБ;
- Коэффициент шума, в зависимости от модели: от 0,6 до 5 дБ;
- Диапазон рабочих частот: от DC до 40 ГГц.



Tellur Electronics

Подберём нужные усилители;
предоставим даташиты;
выполним поставку.

ООО «ТЕЛЛУР ЭЛЕКТРОНИКС»

📍 Москва, ул. Бултерова, д.17
☎ +7 495 120-50-91
✉ info@tellur-el.ru
🌐 tellur-el.ru