

Отечественные ВЧ- и СВЧ-резисторы, поглотители и терминаторы. Состояние и перспективы производства

Юрий САНКИН
Борис ИВАНОВ
Михаил ДВОЕШЕРСТОВ
Сергей СИМАКОВ
Валерий УТКИН
Игорь КУЛАГА

Развитие СВЧ-электроники в последнее десятилетие приобрело колоссальный размах. Это, в первую очередь, появление радиотелекоммуникационных средств связи и навигации гражданского применения, например хорошо всем известные системы GSM, GPRS, GPS, ГЛОНАСС и другие. Системы цифровой обработки и передачи информации также уже работают на сверхвысоких частотах, современные процессоры — в СВЧ-диапазоне. Быстрыми темпами идет развитие радиолокации всех видов базирования. Автомобильная промышленность внедряет системы активной безопасности на базе СВЧ-радиолокации. Параллельно развивается измерительная техника СВЧ. Все перечисленные направления являются сферой применения ВЧ- и СВЧ-резисторов, терминаторов (согласующие нагрузки) и поглотителей (аттенуаторы). В статье рассмотрены виды выпускаемых ВЧ и СВЧ пассивных электронных компонентов в России, а также освещены проблемы и перспективы развития их производства.

Российский рынок ВЧ- и СВЧ-резисторов, поглотителей и терминаторов

В настоящее время в России основными поставщиками ВЧ- и СВЧ-резисторов, терминаторов и поглотителей являются ОАО «КБ «ИКАР»» и ОАО «НПО «ЭРКОН»».

В зависимости от видов радиоэлектронных устройств ВЧ- и СВЧ-резисторы выполняют функцию оконечных и балластных нагрузок, используются в сумматорах и аттенуаторах. Их конструкция, как правило, непосредственно связана с типом линии передачи. Для коаксиальных линий предназначены цилиндрические резисторы, для полосковых — полосковые (планарные).

Для коаксиальных линий разработан ряд резисторов широкого диапазона частот и мощностей. В таблице 1 приведены основные параметры резисторов для коаксиальных линий.

Условно эти изделия можно разделить на три группы:

- 1) маломощные резисторы (С2-10 (а, б), С6-2, С6-3, С6-7, С6-6-II, Р1-6);
- 2) СВЧ-резисторы средней и большой мощности:
 - а) с естественным воздушным охлаждением (Р1-69, ПРТ1, Р1-53);

Таблица 1. Основные параметры резисторов для коаксиальных линий

Тип резистора	Мощность рассеяния, Вт	Номинальное сопротивление, Ом	Диапазон рабочих частот, ГГц	КСВН, не более
С2-10 (а, б)	0,5; 1,0; 2,0	50, 75, 100, 270	0–1,0	–
С6-2	0,125; 0,25; 0,5	10, 20, 30, 40, 50, 75	0–7,0	–
С6-3	1,0	50	0–18,0	1,5*
С6-7	0,25; 0,5	25, 36, 50	0–18,0	1,25*
С6-6-II*	0,5; 1,0; 2,0; 5,0	50, 75	0–20,0	2,5*
Р1-6*	0,25	50	0–40,0	2,0*
Р1-69 (МОУ)	5; 10; 25; 50; 100; 200	10–150	0–3,0	–
ПРТ1*	160; 250; 500	50	0–1,0 (6,0–18,0)	1,3 (1,4)*
Р1-53	500; 1000	160	0,0015–0,06	–
СОВ	1000; 1500; 3000; 7500; 8000	24–150	50–250	–
ПВС	3000; 8000	50, 75	0,0005–1,0	–
УВ	5000; (20 000; 50 000)	47–300	0,005–1,0 (0,005–0,25)	–
ППВН	250 000	22–120	0–0,002	–
ПРЖ	10 000; 50 000; (150 000; 300 000)	50	0–0,75 (0–0,25)	1,2*

* Значения КСВН в конкретном диапазоне частот уточняются в ТУ и при поставке

б) с принудительным воздушным охлаждением (СОВ, ПВС);

3) мощные водоохлаждаемые резисторы и поглотители (УВ, ППВН, ПРЖ).

Увеличение мощности и рабочих частот трактов, а также уменьшение размеров пассивных ВЧ/СВЧ компонентов налагают свои ограничения на конструкцию и технологию их изготовления. Как правило, в современ-

ных СВЧ-цепях используются чип-резисторы и терминаторы, выполненные по толсто- или тонкопленочной технологии.

Первые полосковые СВЧ-резисторы С6-4, С6-9 и Р1-8 были разработаны в 1970-х годах. Конструкция резистора представляла собой плоскую прямоугольную керамическую подложку с нанесенными на одну сторону резистивным слоем и контактными площадками.

Таблица 2. Основные параметры полосковых СВЧ-резисторов

Тип резистора	Мощность рассеяния, Вт	Номинальное сопротивление, Ом	Диапазон рабочих частот, ГГц	КСВН, не более
С6-9	0,125	10–1000	0–18,0	–
P1-1	3	50, 100	0–4,0	–
P1-8	0,125; 0,25	5,11–6,81×10 ³	0–2,0	–
P1-47	0,5	50, 100	0–4,0	–
С6-6-I	0,5; 1,0; 5; 10	50, 75	0–7,0 *	1,35*
P1-2	5	50, 100	0–4,0	1,3
P1-3	10, 25, (50)	5,11–311	0–1,5 (0–0,2)*	1,5*
P1-5	0,5; 3	5,11–311	0–3,0*	1,5*
P1-9	40; (50)	50, 75, 100	0–4,0 (0–2,0)	1,25
P1-17	100; 150; 250; 400	12,5; 25; 50; 75; 100; 150	0–2,0*	1,25*

* Значения КСВН в конкретном диапазоне частот уточняются в ТУ и при поставке

Резистивный слой наносился по тонкопленочной технологии. В качестве материалов резистивного слоя использовалась разработанная в то же время серия резистивных сплавов на основе силицидов хрома (РС3710, 5402 и т. п.). Данные материалы обеспечивают приемлемые значения стабильности резистора под электрической нагрузкой и ТКС в пределах +150 ppm/град. Контактные площадки были либо только со стороны резистивного слоя (P1-1, P1-47), либо с заходом на торцы резистора (С6-9), либо с заходом на торцы и обратную сторону подложки (P1-8). Появление мощных полосковых СВЧ-транзисторов дало толчок к проектированию мощных СВЧ-усилителей, построенных по этому принципу. Одновременно появились полосковые СВЧ-резисторы на соответствующие мощности. Это серия резисторов С6-6-I, P1-2, P1-3, P1-5, P1-9, P1-17. Основные параметры полосковых СВЧ-резисторов приведены в таблице 2.

Полосковые резисторы устанавливаются либо на плоский теплоотвод с помощью пайки (С6-6-I, P1-17-1), либо на промежуточный элемент крепления — винт (P1-3, P1-5) или фланец (P1-2, P1-9, P1-17).

Отдельную группу резистивных СВЧ-поглотителей представляют планарные аттенюаторы и делители мощности. Данный вид изделий может быть использован в качестве навесных элементов гибридных интегральных схем или в качестве поглощающего элемента коаксиального СВЧ-аттенюатора. Основные характеристики приведены в таблице 3.

Таблица 3. Основные характеристики резистивных СВЧ-поглотителей

Тип	Номинальная мощность, Вт	Величина ослабления, Дб	Диапазон рабочих частот, ГГц	КСВН, не более
ПР1-1	0,5	0,5–32	0–1,2 1,2–18,0	1,15* 1,5*
ПР1-11	0,25		0–2 2–10	1,2* 1,8*
ПР1-ИЗ	1,0	1–50	0–18,0 18,0–26,0	1,6* 2,0*
С6-8	1,0	1–60	0–18,0	1,6*
П2-4	1,0	1–80	0–12,4	1,6*

* Значения КСВН в конкретном диапазоне частот уточняются в ТУ и при поставке

$$C = \varepsilon \times \varepsilon_0 \times D_c,$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки; ε_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м; D_c — конструктивный коэффициент для емкости, зависящий от площади резистивного слоя, толщины подложки, конструкции резистора, м.

Введем показатель K — коэффициент частотно-мощностного поглощения резисторов, терминаторов или поглотителей (иначе коэффициент качества поглощения с точки зрения достижения частотно-мощностных характеристик), $K = F \times P$.

Связь между мощностью, частотой и номинальным сопротивлением терминатора определяется соотношением:

$$K = [D_F / (\lambda_0 \times D_c)] \times [(\lambda \times \Delta T) / \varepsilon] / R, \quad (1)$$

где D_F — коэффициент, зависящий от конструкции.

Можно представить (1) в виде:

$$D_K = D_F / (\varepsilon_0 \times D_c),$$

где D_K — общий конструктивный коэффициент; D_M — коэффициент, зависящий от материала подложки $D_M = \lambda \Delta T / \varepsilon$; R — сопротивление поглотителя.

Таким образом

$$K = D_K \times D_M / R. \quad (2)$$

Следовательно, для поглощающих мощность изделий подобного класса качество поглощения $(P \times F) = (\text{качество конструкции} \times \text{качество материала}) / R$.

Из (2) следует несколько выводов:

- Качество материала подложки с точки зрения достижимых характеристик резистора зависит от соотношения коэффициентов теплопроводности и диэлектрической проницаемости ее материала. (Например, нитрид алюминия имеет показатель λ/ε в 7 раз более высокий по сравнению с поликором).
- Максимально допустимая разность температур пленки и теплоотвода (или максимальная температура пленки при фиксированной температуре теплоотвода, определяющая термостойкость пленки) пропорционально влияет на K резистора. Допустимая температура зависит от материала резистивной пленки и технологии изготовления резистора. Более высокая температура приводит к температурной нестабильности и более быстрому старению пленки, однако облегчает реализацию теплоотвода.
- Номинальное сопротивление резистора R связано с его показателем K обратной зависимостью. Например, от резистора с сопротивлением 100 Ом следует ожидать вдвое меньшей мощности или диапазона рабочих частот, чем от резистора 50 Ом.

Направления и особенности проектирования пассивных ВЧ- и СВЧ-компонентов

Проектирование ВЧ/СВЧ пассивных компонентов с высокими частотно-мощностными характеристиками связано с выбором материалов, технологии нанесения пленочных проводящих и резистивных слоев, схемно-конструктивными вопросами обеспечения равномерности тепловыделения, оптимизации геометрии резистивной пленки и контактов, расчетом топологии цепей коррекции паразитных параметров.

В настоящее время достигнуты большие успехи в области высокотемпературных материалов (окмал, теплонит, нитрид бора с коэффициентами теплопроводности λ порядка 400–600 Вт/(м·К). Технологически освоен процесс нанесения на керамические подложки алмазных пленок с $\lambda \approx 1000$ Вт/(м·К), позволяющий в пять–восемь раз повысить удельную импульсную рассеиваемую резистором мощность. Другой способ — увеличение массы резистивного слоя за счет перехода к толстопленочной технологии, но толстые пленки отличаются большей структурной неоднородностью. Третий способ — улучшение теплоотвода со стороны резистивной пленки.

Мощные резисторы охлаждаются за счет отвода тепла через подложку на теплоотвод [1]. Доля мощности, отводимой непосредственно от тепловыделяющей пленки за счет конвекции и излучения, может составлять менее 1%. Мощность, отдаваемую резистором на теплоотвод через подложку, можно определить по формуле:

$$P = D \times \lambda \times \Delta T,$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала подложки при рабочей температуре подложки, Вт/м·град; ΔT — допустимая разность температур резистивной пленки и теплоотвода с фланцем, град; D — конструктивный коэффициент изделия по отношению к мощности, зависящий от размеров и формы изделия.

Емкость между резистивным слоем и нижней металлизированной поверхностью резистора (терминатора) приблизительно будет

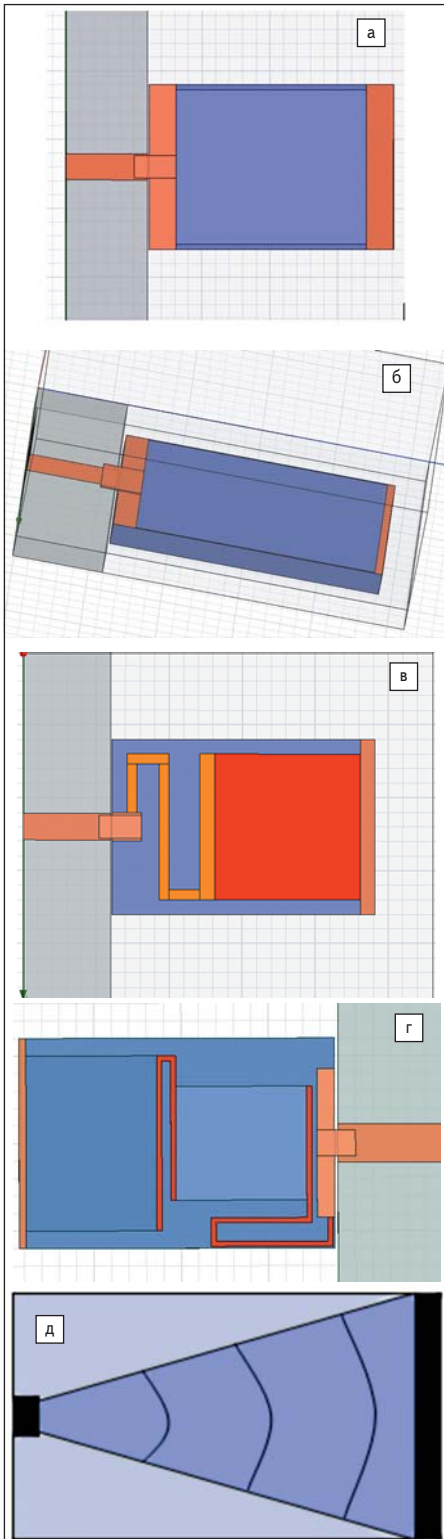


Рис. 1. Поглощающие изделия: а) группы 1; б) группы 2; в) группы 3; г) группы 4; д) группы 5

Зависимость нарушается при низких значениях номинала ($R \ll 50$ Ом), когда основное влияние на частотный диапазон будет оказывать индуктивность.

Условно можно разделить поглощающие изделия на несколько групп в зависимости от способов и уровня их согласования с подводящим волновым трактом.

Группа 1. Изделия с широкой (по сравнению с шириной согласованного полоска) пленкой, не согласованные по волновому сопротивлению с подводящим полосковым трактом

Эти изделия могут монтироваться в торец линии, методом перевернутого кристалла и др. Уровень рассогласования и КСВН зависит от конструкции собственно терминатора и способа монтажа. Наиболее распространенная конструкция. Достижимая величина для подложек на нитриде алюминия примерно $K \leq 70$ Вт·ГГц (рис. 1а).

Группа 2. Изделия на подложке оптимальных размеров при согласовании выводом

Размеры подложки выбираются из условия частичного согласования с волновым трактом. Частично «подсогласуются» за счет полоскового вывода и подбора зазоров между подложкой и терминатором. Ширина резистивной пленки на выбранной подложке должна быть примерно такой, чтобы полосок указанной ширины имел волновое сопротивление 30–40 Ом [6]. Достижимая величина примерно $K \leq 140$ Вт·ГГц (рис. 1б).

Группа 3. Изделия однозвенные, согласованные выделенными элементами

Фундаментальная оценка сверху для качества согласования любой комплексной нагрузки была получена Фано [2] на основании работ Боде [3]:

$$|\Gamma|_{\max} \geq \exp(-\pi/Q'_N),$$

где $Q'_N = (\Delta f/f_0)$ — полосовая добротность нагрузки; $\Delta f = (f_b - f_n)$ — полоса согласования; $f_0 = \sqrt{f_n \times f_b}$ — средняя частота полосы согласования; f_n, f_b — нижняя и верхняя частоты полосы согласования. На практике такая оценка малоприменяема, поскольку она не дает ответа на вопрос о качестве согласования при конечном (в нашем случае — небольшом) числе элементов цепи. Дополнительные согласующие элементы (обычно в виде прямого или изогнутого тонкого полоска) используются в ряде серийно выпускаемых конструкций терминаторов. Практически достижимая величина для нитрида алюминия $K \leq 250$ –450 Вт·ГГц (рис. 1в).

Группа 4. Изделия двух- и многозвенные с элементами согласования

Содержат несколько звеньев с резистивными пленками и индуктивно-емкостными элементами. Ограничения Фано – Юлы для многозвенных цепей смягчаются, поскольку относятся к каждому звену отдельно, полосовая добротность которого становится меньше добротности однозвенной конструкции. Практически достижимая величина для двухзвенной конструкции на подложке из нитрида алюминия $K \leq 500$ –600 Вт·ГГц (рис. 1г).

Группа 5. Поглощающие изделия с объемной подложкой или неоднородной пленкой, согласованные с волновым процессом

Теоретически не имеют ограничений на рассеиваемую мощность и диапазон частот. Требуют использования нескольких пленок (минимум двух), или непрямоугольной формы подложки (сужающейся), или расширяющейся по определенному закону формы пленки, или использования пленок с неодинаковым по поверхности сопротивлением. Разнообразие конструкций велико. Величина K определяется конструкцией и ограничивается ее габаритами и погрешностью реализации конструктивных параметров. Ее можно оценить как $K \sim 2000$ –5000 Вт·ГГц и более для не слишком сложных конструкций (рис. 1д).

Цепи согласования позволяют расширить частотный диапазон резисторов в 2–3 раза и больше. Повышение порядка согласующей цепи требует чрезвычайно точной реализации номиналов согласующих элементов.

Ограничения согласующих цепей:

- допустимые погрешности реализации, которых требуют согласующие цепи, — 2–5% при однозвенной цепи, 0,5–1% при двухзвенной и сотые доли процента при многозвенной;
- разброс диэлектрической проницаемости материала подложки может достигать для разных партий нескольких процентов;
- требуемый допуск воспроизведения геометрических размеров согласующих элементов составляет 0,5–5 мкм и менее;
- разброс сопротивления резистивной пленки (до 10–15% от номинала) регулируется путем подгонки, которая изменяет геометрические размеры резистивного слоя, согласующие же элементы в цепочках высокого порядка рассчитаны на номинальные размеры резистивного слоя с высокой точностью; подгонка приводит к частичному рассогласованию конструкции;
- согласующие элементы занимают заметную часть подложки (при минимальной ширине полосков 0,1–0,2 мм — до половины подложки), что снижает удельную рассеиваемую мощность.

Толщина подложки:

- оптимальная толщина подложки зависит от рассеиваемой мощности и диапазона частот;
- для мощностей 200–500 Вт при использовании нитрида алюминия она составляет 1,5–2 мм (при выполнении согласования), для мощностей в десятки ватт — 0,5–1 мм. Неудачная толщина подложки требует повышенных издержек на реализацию согласующих цепей или использования меньшей части подложки для нанесения резистивной пленки, что снижает коэффициент K (снижение достигает 15–25% от возможного уровня K при данном типе конструкций).

Многозвенная конструкция включает несколько резистивных пленок на одной подложке, связанных через согласующие элементы. Такая конструкция лучше однозвенной.

Использование нескольких резистивных слоев позволяет:

- уменьшить номиналы согласующих элементов;
- упростить конструктивную реализацию согласующих элементов (например, толщина индуктивностей может составлять 200 мкм вместо 5 мкм);
- расширить (при двух резистивных пленках с одним значением сопротивления) частотный диапазон примерно в 2 раза по сравнению с согласованными элементами с одной пленкой и в 6–8 раз по сравнению с несогласованными элементами;
- повысить удельную мощность рассеивания за счет лучшего использования поверхности подложки, даже при пленках с одинаковым номиналом поверхностного сопротивления. Удельная мощность может быть повышена еще на 20% при реализации резистивных пленок с разными номиналами сопротивлений.

При уменьшении всех конструктивных размеров резистора или терминатора (как и любых полосковых изделий) в два раза, ровно в два раза возрастает его максимальная рабочая частота и так же уменьшается допустимая рассеиваемая мощность (конвекция и излучение малы и не учитываются). При этом толщина подложки и размеры всех согласующих элементов должны быть уменьшены тоже в два раза. Поверхностное сопротивление пленки остается прежним.

Пропорциональное изменение размеров в N раз может быть успешно применено в ограниченном диапазоне коэффициента пропорциональности, например, резистор на подложке толщиной 1,5 мм с максимальной рабочей частотой 1 ГГц может быть пересчитан для подложки 1 мм с максимальной частотой 1,5 ГГц и для подложки 0,5 мм — с частотой 3 ГГц.

При увеличении размеров резистора относительно прототипа происходит возрастание объема изделия в N^3 раз (в то время как мощность растет только в N раз) и увеличение толщины подложки. Требования к точности изготовления резистора снижаются.

При уменьшении размеров резистора относительно прототипа происходит уменьшение толщины подложки до слишком малых величин, уменьшение размеров согласующих элементов, контактов и выводов в N раз с соответствующим сокращением допусков на их изготовление. Толщина пленки при этом не меняется для сохранения поверхностного сопротивления, что слегка нарушает пропорциональность конструкции. При изменении толщины подложки и ширины выводов в широких пределах может быть нарушено согласование с подводющим волновым трактом.

На рис. 2 приведены частотно-мощностные параметры спроектированных и проверенных путем трехмерного электродинамического моделирования терминаторов. Видно, что достаточно хорошо выполняется соотношение:

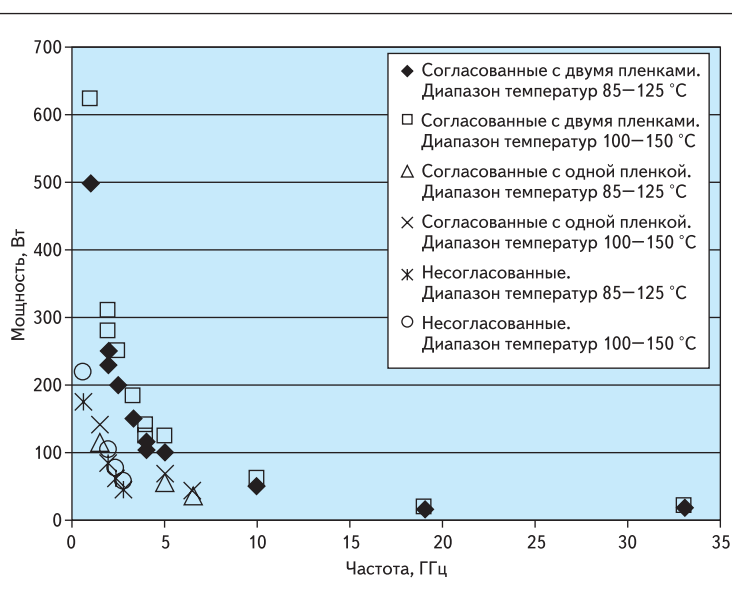


Рис. 2. Частотно-мощностные параметры терминаторов

$$P \times F = const.$$

Константа зависит от числа звеньев (однозвенная или двухзвенная схема), в некоторой степени от толщины подложки, минимально допустимой ширины проводника и других конструктивных факторов.

Увеличение показателя K до величин, более высоких, чем полученная величина 500–600 Вт·Гц, при использовании подложек нитрида алюминия с коэффициентом теплопроводности около 150 Вт/м·град сопряжено со следующими проблемами:

- конструкции резисторов требуют реализации входящих в них элементов с погрешностью не более 1–5 мкм (в первую очередь, это зазоры, выполняющие функцию емкости, согласующие индуктивности и др.);
- требуется высокоэффективный теплоотвод, который не должен приводить к заметному увеличению теплового сопротивления резистора при эквивалентной толщине медного фланца 0,75–1 мм (возможно, теплоотвод с жидкостным охлаждением для резисторов мощностью более сотен ватт). Учитывая современные тенденции развития СВЧ-радиоэлектроники, можно выделить основные направления развития СВЧ-резисторостроения.

1. Резкое расширение номенклатуры СВЧ-резисторов. Сейчас мы предлагаем не более 5–10% от номенклатурного ряда мирового рынка. Это касается в первую очередь полосковых СВЧ-резисторов и аттенуаторов.
2. Микроминиатюризация СВЧ-резисторов за счет применения сверхвысокотеплопроводных материалов. Проведенные исследования показали, что, например, резистор мощностью 150 Вт, изготовленный на алмазной подложке, в 2 раза меньше по размерам и работает на частоте 6 ГГц против 2 ГГц резистора на нитриде алюминия.

3. Создание интегрированных СВЧ-структур. Это R, L, C наборы и функциональные схемы, сформированные на одном чипе. Одним из массовых применений являются схемы развязки СВЧ-шин передачи цифровой информации. Построение таких устройств на дискретных чип-резисторах, конденсаторах и индуктивностях уже практически невозможно.
4. Детальное и точное исследование СВЧ-характеристик уже выпускаемых и вновь разрабатываемых резисторов, поглотителей и терминаторов.

Литература

1. Садков В. Д., Моругин С. Л., Славинский О. К., Перепонов А. Д. Математическая модель ЧИП-резистора в микрополосковом тракте. Конструирование и исследование радиоэлементов и узлов на основе машинного проектирования. М.: Радиотехнический институт АН СССР, 1987.
2. Боде Г. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью. М.: ГИИЛ, 1948.
3. Фано Р. Теоретические ограничения полосы согласования произвольных импедансов / Пер. с англ.; под ред. Г. И. Слободенюка. М.: Советское радио, 1965.
4. Кудрявцев А. М., Никулин С. М. Интеллектуальные информационно-измерительные системы ВЧ- и СВЧ-диапазона. Н. Новгород: НГТУ, 2006.
5. Ульриксон Б. Преобразование данных из частотной области во временную // ТИИЭР. 1986. Т. 74. № 1.
6. Беднов А. В., Кудрявцев А. М., Никулин С. М. Цифровая обработка результатов СВЧ-измерений методом «спектрального окна» // Датчики и системы. 2004. № 6.
7. Вайткус Р. Л. Широкополосный метод вынесения с использованием короткозамкнутой цепи, разомкнутой цепи и промежуточной линии // ТИИЭР. 1986. Т. 74. № 1.