УДК 621.372.852.3

МЕТОДЫ УВЕЛИЧЕНИЯ УРОВНЯ ВХОДНОЙ МОЩНОСТИ В МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ СВЧ АТТЕНЮАТОРАХ

А.С. Митьков, В.П. Разинкин, В.А. Хрусталеv

Новосибирский государственный технический университет

В работе описаны принципы построения многоэлементных широкополосных СВЧ аттенюаторов высокого уровня мощности на пленочных резисторах. Предложенные подходы позволяют в несколько раз увеличить уровень входной мощности или при неизменной входной мощности существенно расширить полосу рабочих частот. Исследованные аттенюаторы с вносимым ослаблением 1-10 дБ обеспечивают высокое качество согласования в полосе частот 0...2 ГГц при уровне входной мощности до 500 Вт. Данные параметры получены за счет введения четвертьволновых отрезков линий передачи с определенным волновым сопротивлением в продольные и поперечные ветви согласованных П-образных и Т-образных диссипативных структур.

Ключевые слова: СВЧ аттенюатор, пленочный резистор, согласование, линия передачи, вносимое ослабление.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-3-32-43

Введение

В данной работе представлены результаты исследования широкополосных пленочных СВЧ аттенюаторов, выполненных в виде модифицированных П-образных и Т-образных структур на пленочных резисторах, в которые дополнительно введены четвертьволновые отрезки линии передачи, позволившие разнести в пространстве диссипативные элементы и улучшить их охлаждение. Данная модернизация направлена на повышение допустимого уровня входной СВЧ мощности. За основу модифицированных аттенюаторов были взяты П-образная и Т-образная согласованные симметричные структуры (рис. 1).

Рис. 1 – П-образный согласованный аттенюатор

Fig. 1 – U-shaped resistors matched attenuator

Для согласованной П-образной структуры (рис. 1, а) номинальные значения пленочных микрополосковых резисторов определяются следующими соотношениями:

$$R_1 = R_3 = R \frac{1 + K_U}{1 - K_U} = R \frac{A + 1}{A - 1}; \quad (1)$$

$$R_2 = R \frac{1 - K_U^2}{2K_U} = R \frac{A^2 - 1}{2A}, \quad (2)$$

где R_1 , R_2 – значения сопротивления пленочных микрополосковых крайних резисторов П-образной структуры; R_3 – значение сопротивления среднего пленочного микрополоскового резистора П-образной структуры; R – сопротивление нагрузки; K_U – коэффициент передачи аттенюатора по напряжению; $A = 1/K_U$ – вносимое ослабление (затухание) по напряжению.

Мощности, рассеиваемые на соответствующих резисторах П-образной структуры, рассчитываются по следующим формулам [1]:

$$P_1 = P_{in} \frac{A-1}{A+1}, \quad P_2 = P_{in} \frac{2(A-1)}{A(A+1)}, \quad P_3 = P_{in} \frac{A-1}{A^2(A+1)}, \quad (3)$$

где P_{in} – мощность входного СВЧ сигнала.

Если в соотношениях (3), описывающих П-образную согласованную структуру, провести нормировку к величине входной СВЧ мощности P_{in} , то закон сохранения энергии в рассматриваемой диссипативной системе имеет вид

$$\sum_{k=1}^3 \bar{P}_k = 1 - 1/A^2, \quad (4)$$

где $\bar{P}_k$ – нормированная мощность рассеивания на k -м резисторе П-образной структуры.

На графиках (рис. 2) показаны нормированные мощности, рассеиваемые на соответствующих резисторах П-образной структуры, используемой в качестве согласованного аттенюатора. Из рассмотрения данных графиков видно, что при малых значениях вносимого ослабления на всех трех резисторах рассеиваются примерно одинаковые мощности. При больших значениях вносимого ослабления входная СВЧ мощность в основном рассеивается на первом резисторе. Поэтому для построения аттенюаторов высокого уровня мощности применяют многоэлементные аттенюаторы, которые могут быть соединены в виде многокаскадной структуры. За счет соответствующего выбора вносимого ослабления при каскадном включении нескольких согласованных аттенюаторов обеспечивается равномерное распределение СВЧ мощности по всем пленочным резисторам и каскадам [2, 3, 6].

Как показали экспериментальные исследования при реализации пленочных резисторов на диэлектрической подложке из бериллиевой керамики толщиной 4 мм, обладающей высокой теплопроводностью (300 Вт/м·К), обеспечивается в длительном режиме рассеивание СВЧ мощности до 250 Вт. Такая величина рассеиваемой СВЧ мощности достигнута при использовании принудительного воздушного охлаждения, при котором поддерживается температура резистивной пленки порядка 105° градусов Цельсия. Следует отметить, что близкое расположение пленочных резисторов в широкополосных П-образных и Т-образных структурах приводит к их взаимному дополнительному перегреву. Для устранения этого эффекта необходимо разработать схемотехнические решения, позволяющие разнести диссипативные элементы на значительное расстояние друг от друга и при этом сохранить полосу рабочих частот.

Рис. 2 – Нормированные мощности, рассеиваемые на резисторах П-образной структуры.

Fig. 2 – Normalized power dissipated by U-shaped resistors

В типовых конструкциях мощных СВЧ аттенюаторов пленочные резисторы, как правило, имеют большую ширину и малую длину. Поэтому в диапазоне частот до 1...2 ГГц паразитной индуктивностью можно пренебречь. Необходимо учитывать только паразитную емкость, которая имеет величину порядка 1...2 пФ. Как известно, емкость, включенная параллельно входу СВЧ устройства, ограничивает полосу его рабочих частот. В соответствии с общей теорией согласования комплексных импедансов полоса частот качественного согласования СВЧ аттенюатора на пленочных микрополосковых резисторах определяется следующим выражением [2]:

$$\Delta f = \frac{1}{2RC \ln(1/\bar{S}_{11})} \eta(n), \quad (5)$$

где Δf – полоса рабочих частот СВЧ аттенюатора; C – паразитная емкость первого пленочного микрополоскового резистора П-образной структуры;

$$\eta(n) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2n}\right) \ln\left(\operatorname{cth}\left(\frac{h_d}{17,37}\right)\right)}{\pi \operatorname{sh}\left(\ln\left(\operatorname{cth}\left(\frac{h_d}{17,37}\right)\right)\right)} - \text{коэффициент, учитывающий порядок согласу-$$

ющей цепи; $\bar{S}_{11} = \int_0^1 \sqrt{1 - \frac{1}{1 + h^2 (\cos(n \arccos \Omega))^2}} d\Omega$ – среднее значение модуля

коэффициента отражения в нормированной полосе рабочих частот;

$$h = \sqrt{|S_{11}|_{\max}^2 / (1 - |S_{11}|_{\max}^2)} - \text{коэффициент, учитывающий уровень пульсации АЧХ}$$

в полосе рабочих частот; h_d [дБ] – уровень пульсации АЧХ в дБ; $|S_{11}|_{\max}$ – модуль допустимого коэффициента отражения по входу; n – порядок согласующей цепи.

Из соотношения (5) следует, что полоса рабочих частот П-образных и Т-образных аттенюаторов Δf обратно пропорциональна паразитной емкости первого пленочного микрополоскового резистора, которая определяется его площадью и параметрами диэлектрической подложки. При этом очевидно, что в согласованных СВЧ аттенюаторах увеличение уровня входной мощности всегда будет приводить к уменьшению полосы рабочих частот, потому что потребуются пленочные резисторы с большей площадью и, соответственно, большей емкостью. Исходя из вышеизложенного для сохранения полосы частот качественного согласования в многоэлементных аттенюаторах необходимо применять внешние согласующие цепи.

1. Модернизированный П-образный аттенюатор

Приведена схема исходного и модернизированного П-образного аттенюатора с разнесенными в пространстве диссипативными элементами (рис. 3).

Рис. 3 – П-образный аттенюатор с разнесенными диссипативными элементами

Fig. 3 – U-shaped attenuator with spaced dissipative elements

На рис. 3 схематически показан переход от обычной согласованной симметричной П-образной структуры на трех резисторах к модифицированному варианту, содержащему шесть резисторов [5]. Из рассмотрения (рис. 3) видно, что в модифицированной схеме каждый пленочный резистор выполнен в виде последовательного соединения двух одинаковых резисторов в два раза меньшей величины, между которыми включены четвертьволновые отрезки линии передачи. Это существенно увеличивает расстояние между пленочными резисторами. Как будет показано ниже, предлагаемая модернизация не приводит к уменьшению полосы рабочих частот.

Для нахождения коэффициента передачи и коэффициента отражения по входу модифицированного П-образного аттенюатора (рис. 3) воспользуемся методом четного и нечетного возбуждения. Целесообразность использования данного метода обусловлена симметрией схемы и конструкции аттенюатора. За счет того, что в методе четного и нечетного возбуждения анализ четырехполюсника сводится к анализу двух двухполюсников, существенно упрощается вывод соотношений для расчета волновых сопротивлений четвертьволновых отрезков линий передачи.

При четном возбуждении относительно оси симметрии образуется режим холостого хода. Входная проводимость (Y_{++}) в этом случае будет равна:

$$Y_{++} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{0,5R_2 - j\rho_2 \operatorname{ctg}\left(\frac{\pi}{2} \frac{f}{f_0}\right)}, \quad (6)$$

где f – частота входного сигнала; f_0 – средняя частота рабочего диапазона;

$\rho_2 = \frac{R_1 R}{R_1 + R} + 0,5R_2$ – волновое сопротивление четвертьволнового отрезка линии

передачи, включенного в разрыв среднего резистора П-структуры.

Отметим, что соотношение (6) получено с учетом того, что волновое сопротивление четвертьволнового отрезка линии передачи, включенного в разрыв крайних резисторов П-структуры, для обеспечения режима согласования выбрано равным $\rho_1 = 0,5R_1$.

При нечетном возбуждении относительно оси симметрии возникает режим короткого замыкания. В том режиме в соответствии со схемой (рис. 3) входная проводимость Y_{+-} определяется соотношением

$$Y_{+-} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{0,5R_2 + j\rho_2 \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} \frac{f}{f_0}\right)}. \quad (7)$$

Далее запишем выражения для коэффициента отражения в режиме четного (Γ_{++}) и нечетного (Γ_{+-}) возбуждения:

$$\Gamma_{++} = \frac{1 - Y_{++} R}{1 + Y_{++} R}, \quad \Gamma_{+-} = \frac{1 - Y_{+-} R}{1 + Y_{+-} R}. \quad (8)$$

На основе соотношений (8) запишем выражения для коэффициента отражения по входу (Γ) и коэффициента передачи по напряжению (K_U) модифицированного аттенюатора:

$$\Gamma = 0,5(\Gamma_{++} + \Gamma_{+-}), \quad K_U = 0,5(\Gamma_{++} - \Gamma_{+-}). \quad (9)$$

После подстановки (6)–(8) в соотношения (9) получим итоговые формулы для коэффициента передачи и коэффициента отражения по входу для модифицированного П-образного аттенюатора:

$$K_U = 0,5 \left(\frac{R_1 - R}{R_1 + R} - \frac{R_1 R_2 - R(2R_1 + R_2)}{R_1 R_2 + R(2R_1 + R_2)} \right) = \operatorname{const}; \quad (10)$$

$$\Gamma = \operatorname{const} = 0. \quad (11)$$

Из анализа соотношений (10) и (11) следует, что введение отрезков линий передачи не повлияло на частотные свойства идеализированной П-образной согласованной структуры, в которой паразитными емкостями микрополосковых пленочных резисторов можно пренебречь. В этом случае полоса рабочих частот может быть сколь угодно большой. Данное приближение справедливо для мало-мощных аттенюаторов.

Для аттенюаторов большой мощности была составлена эквивалентная схема модифицированного П-образного аттенюатора в сосредоточенном элементном базисе с внешними согласующими цепями (рис. 4). В качестве внешних согласующих цепей использованы чебышёвские фильтры нижних частот (ФНЧ) третьего порядка. Это обусловлено тем, что оптимальной согласующей цепью, обеспечивающей полосу рабочих частот, близкую к максимально достижимой, является чебышёвский фильтр [1, 2, 7]. При этом в данном случае один из емкостных элементов чебышёвского согласующего ФНЧ замещается паразитной емкостью пленочного резистора. Для аттенюатора с вносимым ослаблением 6 дБ волновые сопротивления отрезков линий передачи в соответствии с обозначениями формулы (5) равны: $\rho_1 = \rho_3 = 75 \text{ Ом}$; $\rho_2 = 56 \text{ Ом}$. Отметим, что вносимое ослабление 6 дБ используется во втором каскаде трехкаскадной структуры аттенюатора с равномерным распределением рассеиваемых мощностей [6, 8, 9].

Рис. 4 – Модифицированный П-образный СВЧ аттенюатор 6 дБ

Fig. 4 – Modified U-shaped microwave attenuator 6 dB.

Результаты компьютерного моделирования частотной зависимости коэффициента стоячей волны и коэффициента передачи по напряжению K_U (дБ) приведены на рис. 5. Как видно из графиков, рассматриваемый модифицированный П-образный аттенюатор с вносимым ослаблением 6 дБ имеет полосу рабочих частот 0...1,7 ГГц при значении входного КСВ не более 1,1. Неравномерность АЧХ данного аттенюатора не превышает ± 1 дБ. Практически такое же значение полосы рабочих частот было получено при расчете по соотношению (5) для $n = 3$, $h_d = 0,044$ дБ и $C = 2$ пФ. Это означает, что в модифицированном аттенюаторе полоса рабочих частот сохраняется, а допустимый уровень входной мощности

существенно повышается за счет удвоения количества диссипативных элементов и увеличения расстояния между ними на длину четвертьволновых отрезков линий передачи, как было сказано во вводной части.

Рис. 5 – Частотные характеристики П-образного аттенюатора 6 дБ

Fig. 5 – Frequency characteristics of U-shaped microwave attenuator 6 dB.

При использовании принудительного воздушного охлаждения пленочных резисторов, расположенных на диэлектрической подложке из оксида бериллия толщиной 4 мм, на вход данного аттенюатора можно подводить СВЧ мощность до 300 Вт. Это обусловлено тем, что каждый пленочный резистор имеет площадь порядка 80 мм² (паразитная емкость одного резистора равна 2 пФ). Данная площадь резистивной пленки обеспечивает диссипацию 150 Вт непрерывной СВЧ мощности. Оставшаяся входная СВЧ мощность рассеивается на других пленочных резисторах.

2. Модернизированный Т-образный аттенюатор

Предложенный подход в виде включения между пленочными резисторами отрезков линий передачи был применен и для согласованного Т-образного СВЧ аттенюатора 2,6 дБ (рис. 6), который используется в качестве первого каскада для трехкаскадной структуры мощного аттенюатора [5].

Рис. 6 – Модифицированный Т-образный СВЧ аттенюатор 2,6 дБ

Fig. 6 – Modified T-shaped microwave attenuator 2.6 dB.

Особенностью аттенюатора, показанного на рис. 6, является использование распределенного элементного базиса с диссипативными потерями, при этом средний резистор исходного Т-образного аттенюатора реализован в виде двух распределенных резисторов, соединенных параллельно между собой с помощью четвертьволнового отрезка линии передачи без потерь. Значения волновых сопротивлений соединительных отрезков линий передачи для схемы рис. 6 также были определены методом четного и нечетного возбуждения, как и для модифицированного П-образного аттенюатора.

Нахождение погонной емкости и погонной индуктивности микрополосковых пленочных резисторов для схемы рис. 6 проведено на основе аппроксимационной формулы Г. Уилера, Э. Хаммерстада и О. Дженсена для волнового сопротивления микрополосковых линий, которая широко применяется в компьютерных САПР [5]. В данном случае она была адаптирована для тонкопленочной технологии, в которой толщина резистивной пленки не превышает 10 мкм. Погонная емкость C' [Ф/м] и погонная индуктивность L' [Г/м] были рассчитаны по следующим соотношениям:

$$C' = \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{3 \cdot 10^8 \rho}, \quad L' = C' \cdot \rho^2, \quad (12)$$

где $\rho = 60 \left(\left(6 + (2\pi - 6) \exp \left(- \left(30,666 \frac{h}{W} \right)^{0,7528} \right) \right) \frac{h}{W} + \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{W} \right)^2} \right)$ – волновое со-

противление микрополоскового резистора; ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость подложки; h – толщина подложки; W – ширина микрополоскового резистора.

В схеме модифицированного Т-образного аттенюатора (рис. 6) на входе также, как и в предыдущем случае, применена согласующая цепь в виде чебышёвского ФНЧ 3-го порядка. При этом пленочные резисторы описаны в виде линий пере-

дачи с потерями в резистивном микрополоске длиной 8 мм. Погонные реактивные параметры линии с потерями рассчитаны по соотношениям (12) и соответствуют характеристическому сопротивлению 50 Ом для идеальной линии без потерь. Такой выбор параметров обеспечивает минимальную неоднородность микрополоскового тракта рассматриваемой диссипативной системы. При указанных на рис. 6 параметрах линий с потерями использование внутренних согласующих элементов не потребовалось. По данной эквивалентной схеме рис. 6 было проведено моделирование частотных характеристик Т-образного аттенюатора 2,6 дБ (рис. 7).

Рис. 7 – Модифицированный Т-образный СВЧ аттенюатор 2,6 дБ

Fig. 7 – Modified T-shaped microwave attenuator 2.6 dB

Как видно из рассмотрения графиков, полоса рабочих частот модифицированного Т-образного СВЧ аттенюатора 2,6 дБ составляет 0...1,8 ГГц, при этом неравномерность АЧХ составляет 0,9 дБ. Результирующая паразитная емкость и паразитная индуктивность каждого пленочного резистора для аттенюатора (см. рис. 6) соответственно равны: $C = 171,3 \text{ пФ/м} \cdot 0,008 \text{ м} = 1,4 \text{ пФ}$; $L = 428,2 \text{ нГ/м} \cdot 0,008 \text{ м} = 3,4 \text{ нГ}$. Данные значения паразитных параметров сопоставимы со значениями, приведенными на схеме (рис. 7). Пленочные резисторы с таким параметрами способны рассеивать СВЧ мощность 75...100 Вт. Для указанных параметров пленочных резисторов за счет меньшего вносимого ослабления (2,6 дБ) модернизированный Т-образный аттенюатор рассчитан на допустимый уровень входной мощности порядка 500 Вт.

Было проведено также компьютерное моделирование частотных свойств модифицированного Т-образного аттенюатора (рис. 7) для значения погонной емкости микрополоскового резистора $C = 260$ пФ/м. Это значение соответствует волновому сопротивлению резистивного микрополоска 40 Ом. При использовании подложки из оксида бериллия толщиной 4 мм площадь каждого пленочного резистора соответственно равна 100 мм^2 . В этом случае на вход аттенюатора может быть подведена СВЧ мощность 700 Вт. Полоса рабочих частот по уровню входного КСВ 1,1 составила $0 \dots 1,7$ ГГц.

Выводы

1. Предложенные в работе модифицированные П-образные и Т-образные аттенюаторы с дополнительными четвертьволновыми отрезками линий передачи представляют собой многоэлементные диссипативные структуры, в которых обеспечивается качественное согласование в полосе частот $0 \dots 2$ ГГц.

2. При использовании в многоэлементных согласованных аттенюаторах пленочных резисторов с неизменной площадью достигается кратное увеличение допустимого уровня входной СВЧ мощности при сохранении исходной полосы рабочих частот. Кратность увеличения мощности равна отношению количества диссипативных элементов в модифицированной структуре к количеству диссипативных элементов в первоначальной конструкции аттенюатора.

3. При уменьшении площади пленочных резисторов, между которыми включены отрезки линий передачи, происходит соответствующее кратное увеличение полосы рабочих частот при сохранении уровня допустимой входной мощности.

4. Для обеспечения работы на предельно высоком уровне мощности предложенный метод увеличения количества диссипативных элементов и разнесения их в пространстве на значительное расстояние друг от друга может быть применен в одном аттенюаторе неоднократно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / под ред. В.И. Вольмана. – М.: Радио и связь, 1982. – 328 с.
2. **Разинкин В.П., Хрусталеv В.А., Матвеев С.Ю.** Широкополосные управляемые СВЧ устройства высокого уровня мощности: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 316 с. – (Монографии НГТУ).
3. Nonlinear polarization effects in dielectrics with hydrogen bonds / V.A. Kalytka, M.V. Korovkin, A.D. Mekhtiyev, A.V. Yurchenko // Russian Physics Journal. – 2018. – Vol. 54 (7). – P. 757–769. – DOI: 10.1007/s11182-018-1457-8.
4. Патент 2743940 Российская Федерация, H01P 1/22 (2021.01). Фиксированный аттенюатор / А.С. Митьков, В.П. Разинкин, В.А. Хрусталеv, А.Ю. Коратовский, О.А. Коланцов. – Оpubл. 01.03.2021.
5. **Wheeler J.A.** Transmission-line properties of electric parallel strips separated by a dielectric sheet // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1965. – Vol. 13 (2). – P. 172–175.
6. Многокаскадные СВЧ-аттенюаторы на планарных пленочных резисторах / П.Г. Богомолов, В.П. Разинкин, В.А. Хрусталеv, К.Я. Аубакиров // Успехи современной радиоэлектроники. – 2016. – № 11. – С. 233–237.
7. Синтез согласующих цепей для пленочных СВЧ-нагрузок и аттенюаторов / В.П. Разинкин, Г.Г. Савенков, М.Г. Рубанович, В.В. Югай // Вопросы радиоэлектроники. – 2017. – № 4. – С. 77–80.
8. **Савенков Г.Г., Разинкин В.П., Мехтиев А.Д.** Многоступенчатая микрополосковая СВЧ-нагрузка // Вопросы радиоэлектроники. – 2018. – № 4. – С. 53–57.

9. Савенков Г.Г., Разинкин В.П., Хрусталеv В.А. Широкополосные СВЧ-нагрузки на ступенчато-неоднородных линиях с потерями // Вопросы радиоэлектроники. – 2018. – № 4. – С. 68–72.

METHODS OF INCREASING THE INPUT POWER LEVEL IN MULTI-ELEMENT FILM MICROWAVE ATTENUATORS

Mitkov A.S., Razinkin V.P., Khrustalev V.A.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The paper describes the design principles of multi-element broadband microwave attenuators of a high power level on film resistors. The proposed approaches make it possible to increase the input power level by several times or, at a constant input power, to significantly expand the operating frequency band. The studied attenuators with an insertion loss of 1-10 dB provide high-quality matching in the 0-2 GHz frequency band at an input power level of up to 500 W. These parameters are obtained by introducing quarter-wave sections of transmission lines with a certain wave impedance into the longitudinal and transverse branches of matched U-shaped and T-shaped dissipative structures.

Keywords: microwave attenuator, film resistor, matching, transmission line, insertion attenuation.

DOI: 10.17212/1727-2769-2021-3-32-43

REFERENCES

1. Vol'man V.I., ed. *Spravochnik po raschetu i konstruirovaniyu SVCh poloskovykh ustroystv* [Handbook for design and implementation of microwave strip-line devices]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 328 p.
2. Razinkin V.P., Khrustalev V.A., Matveev S.Yu. *Shirokopolosnye upravlyaemye SVCh ustroystva vysokogo urovnya moshchnosti* [Controlled broadband high power level microwave devices]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2008. 316 p.
3. Kalytko V.A., Korovkin M.V., Mekhtiyev A.D., Yurchenko A.V. Nonlinear polarization effects in dielectrics with hydrogen bonds. *Russian Physics Journal*, 2018, vol. 54 (7), pp. 757–769. DOI: 10.1007/s11182-018-1457-8.
4. Mitkov A.S., Razinkin V.P., Khrustalev V.A., Korotkovskii A.Yu., Kolantsov O.A. *Fiksirovannyi attenuator* [Fixed attenuator]. Patent RF, no. 2743940, 2021.
5. Wheeler J.A. Transmission-line properties of electric parallel strips separated by a dielectric sheet. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1965, vol. 13 (2), pp. 172–175.
6. Bogomolov P.G., Razinkin V.P., Khrustalev V.A., Aubakirov K.Ya. *Mnogokaskadnye SVCh-attenuatory na planarnykh plenochnykh rezistorakh* [Many-stage microwave attenuators on planar film resistors]. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki = Achievements of Modern Radioelectronics*, 2016, no. 11, pp. 233–237.
7. Razinkin V.P., Savenkov G.G., Rubanovich M.G., Yugai V.V. Sintez soglasuyushchikh tsepei dlya plenochnykh SVCh-nagruzok i attenuatorov [Synthesis of matching circuits for film microwave attenuators and loads]. *Voprosy radioelektroniki = Issues of radio electronics*, 2017, no. 4, pp. 77–80.
8. Savenkov G.G., Razinkin V.P., Mekhtiev A.D. *Mnogostupenchataya mikropoloskovaya SVCh-nagruzka* [Multistage microstrip microwave load]. *Voprosy radioelektroniki = Issues of radio electronics*, 2018, no. 4, pp. 53–57.
9. Savenkov G.G., Razinkin V.P., Khrustalev V.A. *Shirokopolosnye SVCh-nagruzki na stupenchatо-neodnorodnykh liniyakh s poteryami* [Wideband UHF loads based on stepped-heterogeneous lines with losses]. *Voprosy radioelektroniki = Issues of radio electronics*, 2018, no. 4, pp. 68–72.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Митьков Александр Сергеевич – родился в 1993 году, инженер кафедры электронных приборов Новосибирского государственного технического университета, область научных интересов: широкополосные СВЧ, диссипативные системы и устройства. Опубликовано 12 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: am@alfa-instr.ru).

Mitkov Aleksandr Sergeevitch (b. 1993), an engineer at the Department of Electronic Devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on broadband microwave dissipative systems and devices. He is the author of 12 scientific papers. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: am@alfa-instr.ru).

Разинкин Владимир Павлович – родился в 1952 году, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры теоретических основ радиотехники, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: СВЧ устройства с диссипативными потерями. Опубликовано 190 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: razinkin@corp.nstu.ru).

Razinkin Vladimir Pavlovich (b.1952) – Doctor of Sciences (Eng.), Professor, professor of Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on microwave devices with dissipative losses. He is the author of 190 scientific papers. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: razinkin@corp.nstu.ru).

Хрусталеv Владимир Александрович – родился в 1952 году, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электронных приборов, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: широкополосные СВЧ системы с диссипативными потерями. Опубликовано 205 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: khrustalev@corp.nstu.ru).

Khrustalev Vladimir Alexandrovich (b. 1952), Doctor of Sciences (Eng.), Professor, professor at the Department of Electronic Devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on broadband microwave systems with dissipative losses. He is the author of 205 scientific papers. (Address: 20, K. Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: khrustalev@corp.nstu.ru).

Статья поступила 1 июля 2021 г.

Received July 01, 2021

To Reference:

Mitkov A.S., Razinkin V.P., Khrustalev V.A. Metody uvelicheniya urovnya vkhodnoi moshchnosti v mnogoelementnykh plenochnykh SVCh attenuatorakh [Methods of increasing the input power level in multi-element film microwave attenuators]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2021, no. 3 (52), pp. 32–43. DOI: 10.17212/1727-2769-2021-3-32-43.