

УДК 621.372.5

АЛГОРИТМ СИНТЕЗА ПЛЕНОЧНОГО АТТЕНЮАТОРА С РАВНОМЕРНЫМ РАССЕЯНИЕМ МОЩНОСТИ ПО ЕГО ДЛИНЕ

Д.А. Юзвик, М.А. Степанов

Новосибирский государственный технический университет

Рассмотрена задача синтеза пленочного аттенюатора, выполненного при помощи нанесения на проводник поглощающего диэлектрика. Так как поглощающий диэлектрик имеет параметр максимальной рассеиваемой мощности на единицу площади, то при синтезе аттенюатора на ослабление высоких мощностей может возникнуть проблема превышения максимальной рассеиваемой мощности на единицу площади. Была предложена секционная структура аттенюатора, которая представляет набор секций, имеющих различное затухание, для уменьшения мощности, рассеиваемой на единицу площади. Предложен алгоритм синтеза секционного аттенюатора. Теоретические расчеты подтвердились результатами моделирования в CST Microwave Studio. Распределение мощности было подтверждено результатами моделирования. Были рассмотрены свойства функций, применяемых для распределения затухания применительно к рассматриваемой задаче. Графики зависимости мощности по секциям аттенюатора представлены в данной работе. Было произведено сравнение параметров согласования секционного и односекционного аттенюатора.

Ключевые слова: пленочный аттенюатор, микрополосковая линия, СВЧ-моделирование, микроволновые абсорберы.

DOI: 10.17212/1727-2769-2022-2-60-69

Введение

При проектировании и разработке генераторов, передатчиков СВЧ сигнала, требуется производить измерение их параметров. Современная номенклатура контрольно-измерительного оборудования имеет максимальную мощность входного сигнала на уровне от десятков милливатт до единиц ватта [1–4]. Следовательно, для измерения сигнала, мощность которого превышает максимально допустимую входную мощность измерительной аппаратуры, необходимо использовать СВЧ аттенюаторы [2, 3].

Одним из видов СВЧ аттенюаторов являются пленочные аттенюаторы, выполненные на микрополосковой линии путем нанесения на проводник поглощающего материала с высокими значениями тангенса угла диэлектрических потерь [4].

Поглощающий диэлектрик обладает параметром максимальной рассеиваемой мощности на единицу площади [4, 5]. При синтезе аттенюатора на небольшие значения мощности не требуется принимать меры, направленные на снижение удельной мощности.

Остается открытой задача синтеза аттенюатора на высокие значения мощности, поиск алгоритма синтеза аттенюатора с равномерным рассеиваемой мощности вдоль его длины. Это и послужило целью настоящей работы.

1. Структура пленочных аттенюаторов

Аттенюаторы в нашем случае делятся на два типа: 1) с постоянным погонным затуханием; 2) с изменяющимся погонным затуханием. Аттенюаторы с постоянным погонным затуханием выполняются в виде одной секции. В пределах этой секции поглощающий материал нанесен на проводник в виде цельного прямо-

угольника (рис. 1, *a*). Будем называть их односекционным аттенуатором. Аттенуаторы с изменяющимся погонным затуханием выполняются в виде нескольких последовательно включенных однотипных секций, каждая из которых реализует определенное затухание (рис. 1, *б*). Затухание в каждой из секций выбирается таким образом, чтобы мощность, рассеиваемая на единицу площади секции аттенуатора, не превышала максимально возможную мощность, которую может рассеять поглощающий материал. Назовем такой аттенуатор секционным.

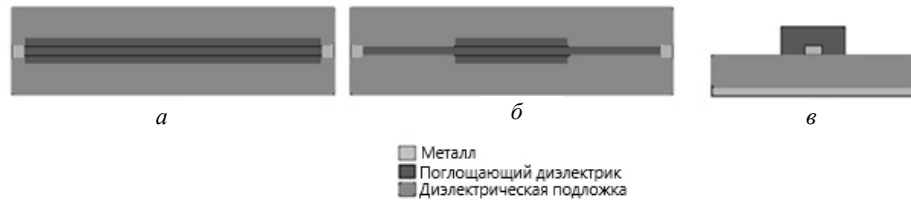


Рис. 1 – Структуры предлагаемых аттенуаторов:

a – односекционный аттенуатор; *б* – секционный аттенуатор; *в* – аттенуатор в разрезе

Fig. 1 – Structures of proposed attenuators:

a – one-section attenuator; *b* – sectional attenuator; *c* – a sectional view of attenuator

В данной работе рассматривается влияние поглощающего материала только на электрическую компоненту электромагнитного поля, магнитная проницаемость принимается равной единице, а тангенс угла магнитных потерь приравняется нулю [5].

2. Алгоритм синтеза аттенуатора

Исходя из описанного выше синтез аттенуатора можно производить по следующему алгоритму.

1. Синтез односекционного аттенуатора на требуемое затухание.

Синтез осуществляется следующим образом.

Определяем погонное затухание в поглощающем диэлектрике [6–8]:

$$a_d = \frac{27,3}{1000} \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_r - 1} + \frac{\varepsilon_{ef} - 1}{\sqrt{\varepsilon_{ef}}} \frac{\operatorname{tg} \delta}{\lambda_0} \left[\frac{\text{дБ}}{\text{мм}} \right], \quad (1)$$

где ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость поглощающего материала; ε_{ef} – эффективная диэлектрическая проницаемость поглощающего материала; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь поглощающего материала; λ_0 – длина волны в свободном пространстве.

Общее затухание аттенуатора с учетом диэлектрических проницаемостей подложки и поглощающего материала:

$$Loss = \frac{1}{\frac{\varepsilon_{ef,sub} + \varepsilon_{ef,ab}}{2} + \frac{\varepsilon_{r,ab} + 1}{2}} La_d, \quad (2)$$

где L – длина аттенуатора, мм; $\varepsilon_{ef,sub}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость подложки; $\varepsilon_{ef,ab}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость поглощающего материала.

Из (2) выражается длина аттенюатора, обеспечивающего заданное затухание:

$$L = \frac{\frac{Loss}{1}}{\frac{\frac{\varepsilon_{ef.sub} + \varepsilon_{ef.ab}}{2} + \frac{\varepsilon_{r.ab} + 1}{2}} a_d}, \quad (3)$$

2. Необходимо проверить, превышает ли мощность, рассеивающаяся на аттенюаторе, максимальную мощность, которая может рассеиваться на поглощающем материале. Мощность, рассеиваемая на аттенюаторе, не должна превышать максимальное значение для поглощающего материала.

$$P_{\max} \geq \frac{P_{\text{расс}}}{S_{\text{атт}}}, \quad (4)$$

где $P_{\text{расс}}$ – мощность, рассеивающаяся на аттенюаторе; $S_{\text{атт}} = Lb$ – площадь поглощающего материала аттенюатора; b – ширина поглощающего материала.

Для определения рассеивающейся на аттенюаторе мощности воспользуемся выражением

$$P_{\text{расс}} = P_{\text{вх}} - \left(P_{\text{вх}} 10^{\frac{-Loss}{10}} \right), \quad (5)$$

где $P_{\text{вх}}$ – мощность, подаваемая на вход аттенюатора.

Если мощность, рассеивающаяся на единицу площади аттенюатора, не превышает максимально возможную мощность, которая может быть рассеяна поглощающим материалом, можно остановиться на простой топологии, представляющей собой прямоугольник.

3. Если условие из пункта 2 не выполняется, и мощность, которая будет рассеиваться на единицу площади поглощающего материала превышает максимально возможную рассеиваемую материалом мощность, следует выполнить синтез секционного аттенюатора.

Синтез секционного аттенюатора предполагается производить по следующему алгоритму.

- Заданное затухание аттенюатора необходимо разделить пополам: $L_{\Sigma} = Loss / 2$ – величина затухания секционного аттенюатора. Это делается с той целью, что мы производим синтез половины аттенюатора, вторая половина будет представлять зеркальную копию. Зеркальная копия второй половины аттенюатора необходима, чтобы аттенюатор был взаимным устройством. Если не требуется синтезировать взаимный аттенюатор, то этот пункт можно опустить. Тогда $L_{\Sigma} = Loss$.

- Разделить аттенюатор на N секций, суммарное затухание которых составляет L_{Σ} .

Распределение затухания по секциям аттенюатора предлагается производить с использованием рядов Тейлора. Коэффициенты степенного ряда при этом будут определять затухание соответствующей секции аттенюатора. Это определяет требование к степенному ряду: все его коэффициенты должны быть положительными. К числу таких функций относится, например, экспонента ($f(x) = e^x$). Ее разложение в ряд Тейлора [9]:

$$f(x) = \sum_{i=0}^N \frac{x^i}{i!}, \quad (6)$$

где $x = \ln(L_{\Sigma})$.

Очевидно, что точность обеспечения затухания аттенюатора определяется количеством членов степенного ряда, равного количеству секций синтезируемого аттенюатора (N).

Далее необходимо проверить условие равенства суммарного затухания секций требуемой величине:

$$\sum_{i=1}^N L_i = L_{\Sigma}. \quad (7)$$

Возможны три варианта: $\sum_{i=1}^N L_i = L_{\Sigma}$; $L_{\Sigma} > \sum_{i=1}^N L_i$; $L_{\Sigma} < \sum_{i=1}^N L_i$.

Если условие (7) выполняется, то следует перейти к следующему пункту алгоритма.

Если $L_{\Sigma} > \sum_{i=1}^N L_i$, тогда необходимо вычислить разность между требуемым затуханием и суммарным затуханием секций:

$\Delta L = L_{\Sigma} - \sum_{i=1}^N L_i$. После этого произвести корректировку (уменьшение) затухания секции с наибольшим рассчитанным затуханием $\max(L_i)$ на величину ΔL , для выполнения условия (7).

Если $L_{\Sigma} < \sum_{i=1}^N L_i$, тогда необходимо вычислить разность между суммарным затуханием и требуемым затуханием

$\Delta L = \sum_{i=1}^N L_i - L_{\Sigma}$ и произвести корректировку (увеличение) затухания секции с наименьшим рассчитанным затуханием $\min(L_i)$ на величину ΔL , для выполнения условия (7).

Нумерация секций производится начиная от центральной секции и показана на рис. 2.

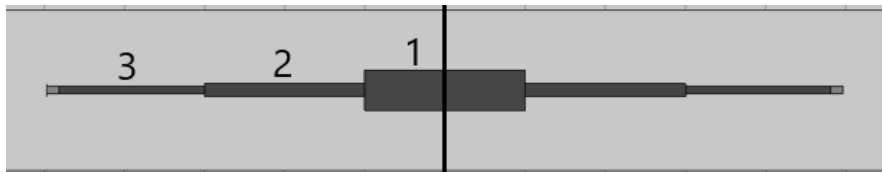


Рис. 2 – Пример нумерации секций для трехсекционного ступенчатого аттенюатора

Fig. 2 – An example of section numbering for a 3-section attenuator

• Далее необходимо вернуться к пункту 1, произвести синтез каждой из секций. Проверить условие в пункте 2 для каждой секции. Если условие выполняется, то реализовать аттенюатор из двух секций. Если условие не выполняется, то необходимо увеличить количество секций аттенюатора $N = N + 1$, пропорционально уменьшив шаг затуханий для каждой из секций. Итерации следует повторять до тех пор, пока условие из пункта 2 не будет удовлетвориться для каждой секции.

3. Пример синтеза аттенюатора

Применим предложенный алгоритм для синтеза аттенюатора на мощность 100 Вт. Диапазон рабочих частот 8–12 ГГц. КСВн не более 1,3. Затухание 10 дБ \pm 10 %.

Для решения данной задачи используем подложку из поликора $\epsilon_r = 9,6$ [10]. Поглощающий материал C-RAM RGD [5] с параметрами $\epsilon_r = 1,5$; $\operatorname{tg} \delta = 1$. Его максимальная удельная рассеиваемая мощность P_{\max} . $P = 35$ Вт/см².

Рассчитав аттенюатор по выражениям (1–5), получим следующие параметры (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Параметры односекционного аттенюатора
Parameters of a one-section attenuator

$P_{\text{расс}}, \text{Вт}$	Loss, дБ	$L, \text{мм}$	$\epsilon_{\text{ef.sub}}$	$\epsilon_{\text{ef.ab}}$
90	10	57,832	6,115	1,297

На рис. 3 изображена модель односекционного аттенюатора. Ширина поглотителя 3 мм, длина 57 мм. Ширина подводящих полосков составляет 1 мм, ширина полоска под поглотителем 0,1 мм. Площадь поглотителя составляет 171 мм² или 1,71 см².

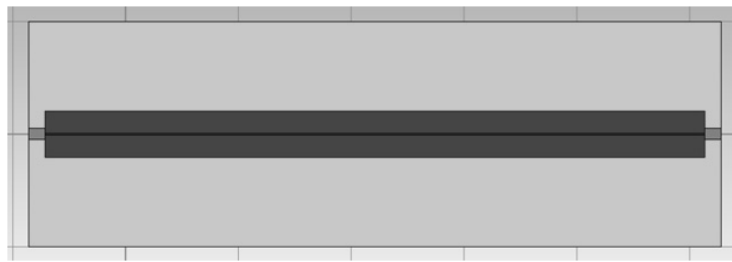


Рис. 3 – 3D модель односекционного аттенюатора

Fig. 3 – A 3D model of a one-section attenuator

Таким образом, 90 Вт рассеется на площади 1,71 см², и удельная мощность составит 52,63 Вт/см², что превышает предельную мощность на единицу площади, равную 35 Вт/см².

Переходим к секционной структуре аттенюатора, разделим это затухание между тремя секциями. Рассчитаем затухания секций по выражению (6). Ввиду малого количества членов ряда значения, рассчитанные по выражению (6), не дали в сумме L_{Σ} , поэтому была произведена корректировка затухания секции L_1 на величину $\Delta L = 1,1$ дБ для выполнения равенства (7). Рассчитанные затухания секций L_3 и L_2 были округлены до ближайшей десятичной доли (табл. 2, 3).

Таблица 2 / Table 2

Рассчитанные затухания секций аттенюатора
Calculated attenuation of attenuato sections

$L_3, \text{дБ}$	$L_2, \text{дБ}$	$L_1, \text{дБ}$	$L_{\Sigma}, \text{дБ}$
1,3	1,6	2,1	5

Таблица 3/ Table 3

Мощность, рассеивающаяся на каждой из секций, и удельная мощность
для каждой из секций

Power dissipated in each of the sections, and the specific power for each
of the sections

Номер секции	3	2	1
$P_{\text{расс}}, \text{Вт}$	25,869	22,845	5
$P_{\text{уд}}, \text{Вт/см}^2$	24,482	18,245	14,218

Видно, что затухание на каждой из секций не превышает максимальное значение для материала 35 Вт/см^2 . При синтезе обеспечим наибольшую возможную площадь каждой из секций за счет увеличения ее длины, но уменьшения ширины [11, 12].

Как видно из рис. 4, мы распределили затухание по каждой из секций, сделали зеркальную копию второй половины аттенюатора и обеспечили суммарное затухание в 10 дБ.

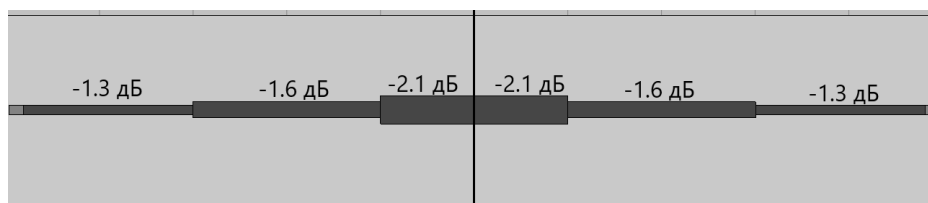


Рис. 4 – Секционная структура аттенюатора

Fig. 4 – Section structure of attenuator

На рис. 5 изображен график S1.1 для односекционного аттенюатора (а) и для секционного (б), переход к секционной структуре положительно сказался на согласовании аттенюатора.

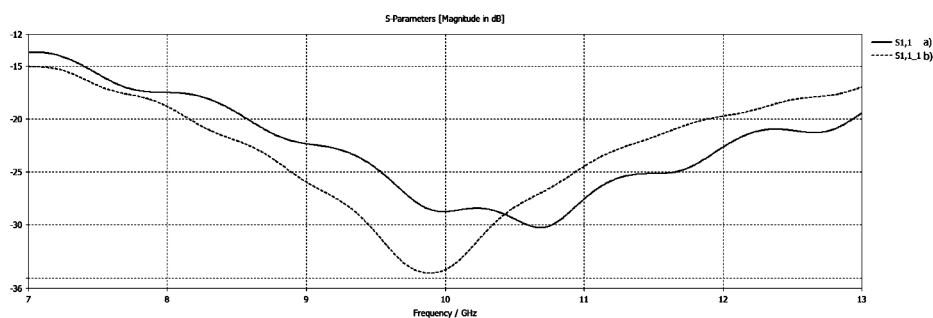


Рис. 5 – Параметр S1.1:

а – односекционного аттенюатора; б – секционного аттенюатора

Fig. 5 – Parameter S1.1:

а – one-section attenuator; б – section attenuator

На рис. 6 изображен график S2.1 для односекционного аттенюатора (а) и для секционного (б), из графиков видно, что при переходе к секционной структуре удалось обеспечить необходимое ослабление с небольшой погрешностью.

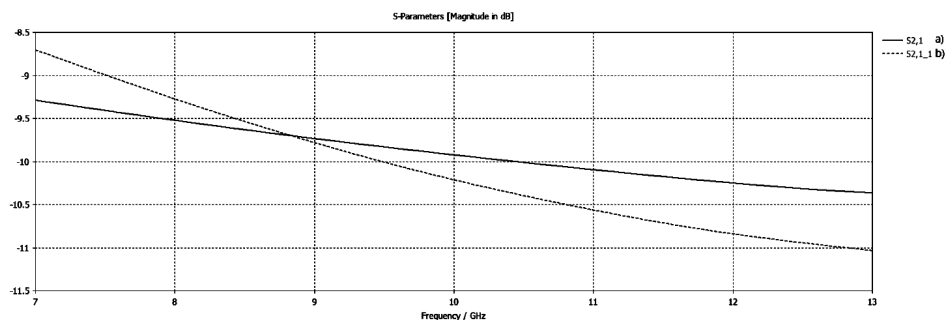


Рис. 6 – Параметр S2.1:

a – односекционного аттенюатора; b – секционного аттенюатора

Fig. 6 – Parameter S2.1:

a – one-section attenuator; b – section attenuator

На рис. 8 представлена зависимость мощности вдоль длины аттенюатора, модель которого представлена на рис. 7.

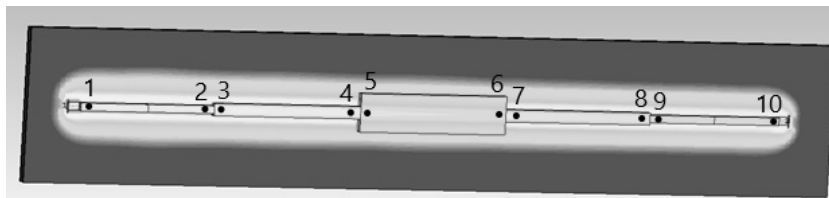


Рис. 7 – Результаты моделирования распределения затухания

Fig. 7 – Simulation results of attenuation distribution

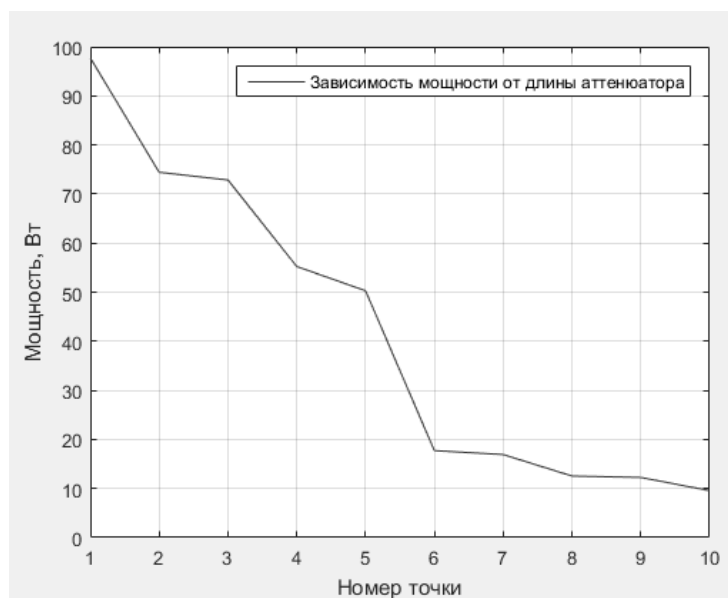


Рис. 8 – Зависимость мощности вдоль длины аттенюатора

Fig. 8 – Power dependence along the length of the attenuator

Заключение

Предложен алгоритм синтеза пленочного аттенюатора, который обеспечит постепенное ослабление мощности сигнала вдоль его длины, не вызывая превышения уровня рассеиваемой мощности для адсорбирующего материала. Для определения затухания секций такого аттенюатора используются коэффициенты степенного ряда. Для апробации предложенного алгоритма произведен синтез секционного аттенюатора для диапазона частот 8–12 ГГц на мощность 100 Вт. Результаты теоретических расчетов были проверены моделированием в САПР CST Microwave Studio. Результаты моделирования подтвердили корректность алгоритма.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Iuzvik D.A., Stepanov M.A.** Study of influence of absorbing material on parameters of line with losses // 2020 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE). – Novosibirsk, 2020. – P. 59–63.
2. Broadband microwave attenuators of the higher lever power / M.G. Rubanovich, V.P. Razinkin, V.A. Khrustalev, G.G. Nikolaev, A.A. Stolyarenko, K.J. Aubakirov // 2014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)-34006 proceedings. – Novosibirsk, 2014. – Vol. 1. – P. 390–392. – DOI: 10.1109/APEIE.2014.7040923.
3. The microwave attenuator / M.G. Rubanovich, V.P. Razinkin, V.A. Khrustalev, A.A. Stolyarenko, P.G. Bogomolov, Yu.V. Vostryakov // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2017, Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2017. – Novosibirsk, 2017. – P. 134–137.
4. **Steer M.B.** Microwave and RF design: a systems approach. – Raleigh, NC: SciTech Pub., 2010. – 952 p.
5. Материалы марки C-RAM RGD от Cuming Microwave.
6. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / под ред. В.И. Вольмана. – М.: Радио и связь, 1982. – 328 с.
7. **James J.R., Hall P.S., Wood C.** Microstrip antenna: theory and design. – London; New York: Peregrinus on behalf of the Institution of Electrical Engineers, 1981. 290 p.
8. **Golio M., Golio J.** RF and microwave circuits, measurements, and modeling. – Boca Raton: CRC Press, 2007.
9. **Mauch S.** Introduction to methods of applied mathematics or Advanced mathematical methods for scientists and engineers. – Mauch Publishing Co., 2003. – 1430 p.
10. **Steer M.B.** Fundamentals of microwave and RF design. – Raleigh, NC: University of North Carolina Press, 2019. – 229 p.
11. **Gilmore R., Besser L.** Practical RF circuit design for modern wireless systems. – Boston, MA: Artech House, 2013.
12. **Pozar D.M.** Microwave engineering. – Hoboken, NJ: Wiley, 2011. – 732 p.

AN ALGORITHM FOR SYNTHESIS OF A FILM ATTENUATOR WITH UNIFORM POWER DISSIPATION ALONG ITS LENGTH

Yuzvik D.A., Stepanov M.A.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The problem of synthesizing a film attenuator made by applying an absorbing material to a conductor is considered. Since the absorbing material has a parameter of maximum dissipated power per unit area, then when synthesizing an attenuator to attenuate high powers, the problem of exceeding the maximum dissipated power per unit area may arise. A sectional attenuator structure has been proposed, which is a set of sections having different attenuation to reduce the power

dissipated per unit area. An algorithm for the synthesis of a sectional attenuator is proposed. The attenuator sections are rectangles of various widths. The attenuation distribution is performed using the Taylor series expansion of mathematical functions. The properties of the functions used to distribute the attenuation related to the problem under consideration were considered. The graphs of the dependence of power on the attenuator section are presented. Power distribution has been confirmed by simulation results. Theoretical calculations were confirmed by simulation results in the CST Microwave Studio software.

Keywords: film attenuator, microstrip line, microwave simulation, microwave absorbers.

DOI: 10.17212/1727-2769-2022-2-60-69

REFERENCES

1. Iuzvik D.A., Stepanov M.A. Study of influence of absorbing material on parameters of line with losses. *2020 1st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE)*, Novosibirsk, 2020, pp. 59–63.
2. Rubanovich M.G., Razinkin V.P., Khrustalev V.A., Nikolaev G.G., Stolyarenko A.A., Aubakirov K.J. Broadband microwave attenuators of the higher lever power. *2014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)-34006 proceedings*, Novosibirsk, 2014, vol. 1, pp. 390–392. DOI: 10.1109/APEIE.2014.7040923.
3. Rubanovich M.G., Razinkin V.P., Khrustalev V.A., Stolyarenko A.A., Bogomolov P.G., Vostryakov Yu.V. The microwave attenuator. *18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2017*, Altai, Erlagol, 29 June – 3 July 2017. Novosibirsk, 2017, pp. 134–137.
4. Steer M.B. *Microwave and RF design: a systems approach*. Raleigh, NC, SciTech Pub., 2010. 952 p.
5. Microwave absorbers C-RAM RGD from Cuming Microwave.
6. Vol'man V.I., ed. *Spravochnik po raschetu i konstruirovaniyu SVCh poloskovykh ustroystv* [Guide to the calculation and design of microwave strip devices]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 328 p.
7. James J.R., Hall P.S., Wood C. *Microstrip antenna: theory and design*. London, New York, Peregrinus on behalf of the Institution of Electrical Engineers, 1981. 290 p.
8. Golio M., Golio J. *RF and microwave circuits, measurements, and modeling*. Boca Raton, CRC Press, 2007.
9. Mauch S. *Introduction to methods of applied mathematics or Advanced mathematical methods for scientists and engineers*. Mauch Publishing Co., 2003. 1430 p.
10. Steer M.B. *Fundamentals of microwave and RF design*. Raleigh, NC, University of North Carolina Press, 2019. 229 p.
11. Gilmore R., Besser L. *Practical RF circuit design for modern wireless systems*. Boston, MA. Artech House, 2013.
12. Pozar D.M. *Microwave engineering*. Hoboken, NJ, Wiley, 2011. 732 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Юзвик Денис Андреевич – родился в 1994 году, аспирант Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: радиотехника. Опубликовано четыре научные работы. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: zetanicestar@gmail.com).

Yuzvik Denis Andreevich a post-graduate student at the Department of Radio Receiving and Radio Transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University, His research interests are focused on radioengineering. He has published 4 research papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: zetanicestar@gmail.com).



Степанов Максим Андреевич – д-р техн. наук. Заведующий кафедрой РПИППУ в Новосибирском государственном техническом университете. Область научных интересов: радиотехника. Опубликовано более 80 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: m.stepanov@corp.nstu.ru).

Stepanov Maksim Andreevich, D.Sc. (Eng.), associate professor, Department of Radio receiving and Radio transmitting Devices, Novosibirsk State Technical University. His research interests are focused on radioengineering. He has above 80 publications. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail m.stepanov@corp.nstu.ru).

Статья поступила 17 февраля 2022 г.

Received February 17, 2022

To Reference:

Yuzvik D.A., Stepanov M.A. Algoritm sinteza plenochного attenuatora s ravnomernym rasseyaniem moshchnosti po ego dline [An algorithm for synthesis of a film attenuator with uniform power dissipation along its length]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2022, no. 2 (55), pp. 60–69. DOI: 10.17212/1727-2769-2022-2-60-69.