

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЕКЦИОННОЙ АНИЗОТРОПНОЙ ДИАФРАГМЫ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ¹

Аннотация.

Актуальность и цели. Рассматривается актуальная для практики задача электродинамики – задача определения тензорных электромагнитных характеристик многосекционной диафрагмы волноводным методом. Цель исследования – разработка численно-аналитического метода решения обратной задачи и его апробация на практике.

Материалы и методы. Исследуется обратная задача электродинамики: обратная задача восстановления тензоров электромагнитных параметров каждой секции многосекционной диафрагмы. Задача сводится к решению соответствующей краевой задачи для систем уравнений Максвелла.

Результаты. Получено численно-аналитическое решение обратной задачи. Разработан численный метод. Метод протестирован на нескольких сериях задач.

Выводы. Численный метод и численные результаты могут быть использованы при определении электромагнитных параметров изотропных и анизотропных современных видов материалов волноводным методом.

Ключевые слова: изотропная диафрагма, анизотропная диафрагма, задача электродинамики, комплексная диэлектрическая проницаемость, тензор магнитной проницаемости, диагональный тензор, тензор диэлектрической проницаемости, волноводный метод.

Е. Д. Derevyanchuk, N. V. Derevyanchuk, M. A. Loginov

THE INVERSE PROBLEM OF ELECTROMAGNETIC CHARACTERISTICS RECONSTRUCTION OF A MULTISECTIONAL ANISOTROPIC DIAPHRAGM IN THE RECTANGULAR WAVEGUIDE

Abstract.

Background. This work is devoted to inverse problem of electromagnetic characteristics reconstruction of isotropic and anisotropic diaphragms. The aim of study is to develop numerical-analytical methods of solving inverse problems.

Materials and methods. We consider inverse problem: inverse problem of permittivity and permeability tensors reconstruction of multi-sectional diaphragm. The problem is devoted to the boundary value problem for Maxwell's equations.

¹ Работа финансово поддержана грантом Президента РФ № МК-3604.2018.1, а также грантом Минобрнауки России (госзадание № 1.894.2017/4.6).

© Е. Д. Деревянчук, Н. В. Деревянчук, М. А. Логинов, 2019. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Results. We obtain numerical-analytical methods of the solution of the inverse problem.

Conclusions. The numerical methods of solving the inverse problem and numerical results can be used in practice to reconstruct electromagnetic characteristics of modern materials.

Keywords: isotropic material, anisotropic material, electrodynamics problem, integrated dielectric conductivity, tensor of magnetic permeability, diagonal tensor, tensor of the dielectric permittivity, waveguide method.

Введение

Данная статья посвящена обратным задачам электродинамики [1–11].

Целью данной работы является исследование обратной задачи восстановления электромагнитных характеристик анизотропной и изотропной диафрагмы, расположенной в прямоугольном волноводе. В отличие от других работ авторов, в данной работе акцент делается на апробацию численного метода, анализ численных результатов решения обратной задачи.

Численный метод решения обратной задачи (анизотропная диафрагма)

Постановка задачи

Пусть в прямоугольной декартовой системе координат задан волновод $P = \{x: 0 < x_1 < a, 0 < x_2 < b, -\infty < x_3 < \infty\}$ с идеально проводящей поверхностью ∂P (рис. 1), где a – ширина волновода, b – высота волновода.

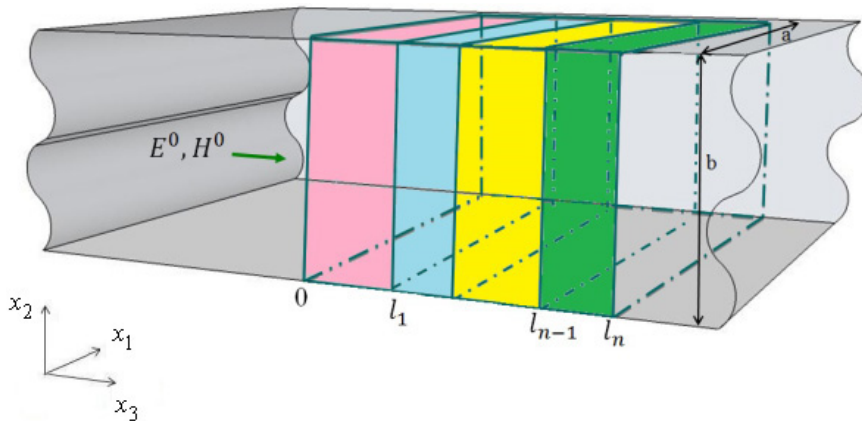


Рис. 1. Диафрагма в волноводе

Стенки волновода будем считать идеально проводящими. Внутри волновода расположена многосекционная диафрагма

$$Q = \{(x, y, z): 0 < x < a, 0 < y < b, 0 < z < l\}$$

с секциями

$$Q_j = \{(x, y, z): 0 < x < a, 0 < y < b, l_{j-1} < z < l_j\}, Q = \bigcup_{j=1}^n Q_j,$$

где $l_j - l_{j-1}$ – известная толщина j -й секции; l – толщина всей диафрагмы.

Вне диафрагмы среда изотропна и однородна. Каждая секция заполнена анизотропной средой с неизвестными тензорами:

$$\epsilon^{(j)}(\omega) = \begin{pmatrix} \epsilon_{11}^{(j)}(\omega) & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22}^{(j)}(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33}^{(j)}(\omega) \end{pmatrix}, \quad j=1, \dots, n, \quad (1)$$

и неизвестным тензором магнитной проницаемости [2, 12]:

$$\mu^{(j)}(\omega) = \begin{pmatrix} \mu_{11}^{(j)}(\omega) & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{22}^{(j)}(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{33}^{(j)}(\omega) \end{pmatrix}, \quad j=1, \dots, n. \quad (2)$$

Предполагается, что компоненты $\epsilon_{33}^{(j)}(\omega)$, $\mu_{33}^{(j)}(\omega)$ ($j=1, \dots, n$) известны.

Электромагнитное поле задается системой уравнений Максвелла вне и внутри диафрагмы:

$$\begin{cases} \text{rot } \mathbf{H} = -i\omega\epsilon_0 \mathbf{E}, \\ \text{rot } \mathbf{E} = i\omega\mu_0 \mathbf{H}, \end{cases} \quad \begin{cases} \text{rot } \mathbf{H} = -i\omega\epsilon^{(j)}(\omega) \mathbf{E}, \\ \text{rot } \mathbf{E} = i\omega\mu^{(j)}(\omega) \mathbf{H}. \end{cases} \quad (3)$$

Распространение одной волны внутри волновода достигается выбором параметров волновода таким образом, чтобы выполнялось условие для волнового числа: $\frac{\pi}{a} < k_0 < \frac{\pi}{b}$ [1, 3, 13, 14] (рис. 2).

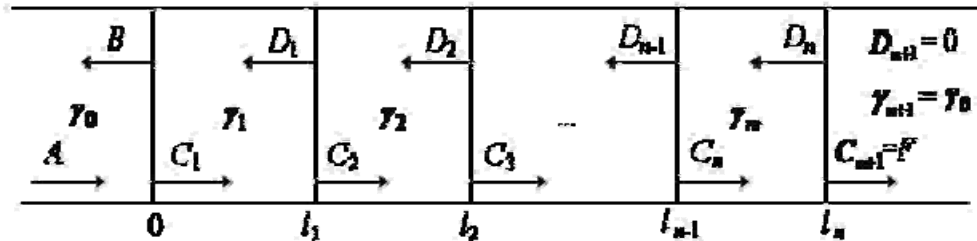


Рис. 2. Распространение волны в волноводе

Внешнее электрическое поле имеет вид

$$\mathbf{E}^0 = A \sin\left(\frac{\pi x_1}{a}\right) e^{-i\gamma_0 x_3} \bar{e}_2, \quad (4)$$

соответствующий волне типа H_{10} с известной амплитудой A , где $\gamma_0 = \sqrt{k_0^2 - \pi^2/a^2} = \sqrt{\omega^2\epsilon_0\mu_0 - \pi^2/a^2}$; γ_0 – постоянная распространения волны H_{10} ; $\bar{e}_2$ – орт вдоль оси Oy . Вектор $\mathbf{H}^0$ определяется из второго уравнения системы (3).

Будем предполагать, что волна имеет следующую поляризацию:

$$\mathbf{E} = (0 \ E_y \ 0), \quad \mathbf{H} = (H_x \ 0 \ H_z). \quad (5)$$

Полное поле внутри волновода имеет следующий вид:

$$\mathbf{E} = \begin{cases} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right)(Ae^{-i\gamma_0 z} + Be^{i\gamma_0 z})\mathbf{e}_2, & z < 0 \\ \mathbf{E} = \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right)(C_j e^{-i\gamma_j l_j} + D_j e^{i\gamma_j l_j})\mathbf{e}_2, & 0 < z < l, \\ \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right)F e^{-i\gamma_0 z}\mathbf{e}_2, & z > l, \end{cases} \quad (6)$$

здесь A – амплитуда падающей волны; C_j, D_j – неизвестные коэффициенты; B и F – коэффициенты, подлежащие измерению.

Подставляя выражения (1)–(2) в системы уравнений Максвелла (3), получим соответствующие выражения для постоянных распространения:

$$\gamma_0 = \sqrt{\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - \frac{\pi^2}{a^2}}, \quad \gamma_j = \sqrt{\left(\omega^2 \epsilon_{22}^{(j)} \mu_{33}^{(j)} - \frac{\pi^2}{a^2}\right) \frac{\mu_{11}^{(j)}}{\mu_{33}^{(j)}}}. \quad (7)$$

На границе областей выполняются условия сопряжения:

$$[E_y]_L = 0, \quad [H_x]_L = 0, \quad (8)$$

где $L := \{(x, y, z) : z = 0, z = l\}$, $[\cdot]_L$ – скачок предельных значений функции на границе раздела сред L ; E_y, H_x – тангенциальные составляющие векторов $\mathbf{E}, \mathbf{H}$ соответственно.

Постановка обратной задачи (анизотропная диафрагма): требуется по известным значениям коэффициента F/A на различных частотах и при разных положениях диафрагмы в волноводе восстановить $\epsilon^{(j)}(\omega), \mu^{(j)}(\omega)$ $j = (1, \dots, n)$.

Численный метод решения обратной задачи для анизотропной диафрагмы

Для тензоров (1)–(2) с учетом выражений (4)–(8) справедлива следующая система уравнений:

$$\frac{F}{A}(\omega_s) = \frac{2e^{-i\gamma_0(\omega_s)l_n} \prod_{j=0}^n \frac{\gamma_j(\omega_s)}{\mu_{11}^{(j)}}}{\frac{\gamma_n(\omega_s)}{\mu_{11}^{(n)}} p_{n+1}^{(+)}(\omega_s) + \frac{\gamma_0}{\mu_0} q_{n+1}^{(+)}(\omega_s)}, \quad s = 1, \dots, 2n, \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned}
 p_1 &= 1, \quad p_{j+1} = \frac{\gamma_{j-1}}{\mu_{11}^{(j-1)}} p_j \cos \alpha_j + \frac{\gamma_j}{\mu_{11}^{(j)}} q_j i \sin \alpha_j, \\
 q_1 &= 1, \quad q_{j+1} = \frac{\gamma_{j-1}}{\mu_{11}^{(j-1)}} p_j i \sin \alpha_j + \frac{\gamma_j}{\mu_{11}^{(j)}} q_j \cos \alpha_j, \quad \alpha_j = \gamma_j (l_j - l_{j-1}), \\
 \gamma_j &= \sqrt{\left(\omega^2 \varepsilon_{22}^j \mu_{33}^j - \frac{\pi^2}{a^2} \right) \frac{\mu_{11}^j}{\mu_{33}^j}} \quad j=1, \dots, n.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Система (9) представляет собой систему $2n$ действительных уравнений с $2n$ неизвестными $\varepsilon_{22}^{(j)}, \mu_{11}^{(j)}$ ($j=1, \dots, n$). В уравнения системы (9) не входят компоненты $\varepsilon_{11}^{(j)}, \mu_{22}^{(j)}$ ($j=1, \dots, n$). Поэтому для того чтобы найти другие компоненты, выполним поворот диафрагмы относительно оси Oz на 90° . В результате поворота постановка задачи не нарушается; тензоры преобразуются к виду

$$\tilde{\varepsilon}^{(j)} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{22}^{(j)} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11}^{(j)} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33}^{(j)} \end{pmatrix}, \quad \tilde{\mu}^{(j)} = \begin{pmatrix} \mu_{22}^{(j)} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{11}^{(j)} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{33}^{(j)} \end{pmatrix}. \tag{11}$$

Выражение для γ_j преобразуется к виду

$$\tilde{\gamma}_j = \sqrt{\left(\omega^2 \varepsilon_{11}^j \mu_{33}^j - \frac{\pi^2}{a^2} \right) \frac{\mu_{22}^j}{\mu_{33}^j}}.$$

Для тензоров (11) система (9) преобразуется к следующему виду:

$$\begin{aligned}
 \frac{\tilde{F}}{A}(\omega_s) &= \frac{2e^{-i\gamma_0(\omega_s)l_n} \prod_{j=0}^n \frac{\gamma_j(\omega_s)}{\mu_{11}^{(j)}}}{\frac{\tilde{\gamma}_n(\omega_s)}{\mu_{11}^{(n)}} \tilde{p}_{n+1}^{(+)}(\omega_s) + \frac{\gamma_0}{\mu_0} \tilde{q}_{n+1}^{(+)}(\omega_s)}, \quad s=1, \dots, 2n, \\
 p_1 &= 1, \quad \tilde{p}_{j+1} = \frac{\tilde{\gamma}_{j-1}}{\mu_{11}^{(j-1)}} \tilde{p}_j \cos \tilde{\alpha}_j + \frac{\tilde{\gamma}_j}{\mu_{11}^{(j)}} \tilde{q}_j i \sin \tilde{\alpha}_j, \\
 q_1 &= 1, \quad \tilde{q}_{j+1} = \frac{\tilde{\gamma}_{j-1}}{\mu_{11}^{(j-1)}} \tilde{p}_j i \sin \tilde{\alpha}_j + \frac{\tilde{\gamma}_j}{\mu_{11}^{(j)}} \tilde{q}_j \cos \tilde{\alpha}_j, \quad \tilde{\alpha}_j = \tilde{\gamma}_j (l_j - l_{j-1}), \quad j=1, \dots, n.
 \end{aligned} \tag{12}$$

Решением совместно системы (9) и (12) методом Левенберга – Марквардта полностью определяются тензоры магнитной проницаемости и диэлектрической проницаемости каждой секции анизотропной диафрагмы.

Численные результаты

В данном разделе представлены численные результаты решения поставленной обратной задачи. Все единицы измерения указаны в системе СГС.

Пример 1. Пусть параметры волновода: $a = 2$ см, высота $b = 1$ см. Точные значения: круговая частота $\omega_0 = 2,5$, что соответствует частоте $f_1 = 11,94$; длина секции $l_1 = 0,5$ см, $l_2 = 1$ см; диэлектрическая проницаемость в первой секции $\epsilon_{11}^{(1)} = 9,22$, $\epsilon_{22}^{(1)} = 9,22$, $\epsilon_{33}^{(1)} = 11,51$, $\mu_{11}^{(1)} = 1,1$, $\mu_{22}^{(1)} = 1,1$, $\mu_{33}^{(1)} = 1,1$, во второй секции: $\epsilon_{11}^{(2)} = 4,55$, $\epsilon_{22}^{(2)} = 4,55$, $\epsilon_{33}^{(2)} = 4,65$, $\mu_{11}^{(2)} = 1$, $\mu_{22}^{(2)} = 1$, $\mu_{33}^{(2)} = 1$ (табл. 1).

Таблица 1

Результаты решения обратной задачи
при абсолютной погрешности исходных данных равной $-0,001 - 0,001i$

F/A	F/A с погрешностью	max $\Delta\epsilon, \%$	max $\Delta\mu, \%$
$0,0859 + 0,8806i$	$0,0869 + 0,8816i$	0,51	2,005
$-0,3165 + 0,2716i$	$-0,3155 + 0,2726i$		
$0,0859 + 0,8806i$	$0,0869 + 0,8816i$		
$-0,3165 + 0,2716i$	$-0,3155 + 0,2726i$		

Вывод: максимальная относительная погрешность вычислений составила **2,005 %**, это не превышает 5 %, что допустимо для использования на практике.

Пример 2. Пусть параметры волновода: $a = 2$ см, высота $b = 1$ см. Точные значения: круговая частота $\omega_0 = 2,5$, что соответствует частоте $f_1 = 11,94$, длина секции $l_1 = 0,5$ см, $l_2 = 1$ см; диэлектрическая проницаемость в первой секции: $\epsilon_{11}^{(1)} = 9,22$, $\epsilon_{22}^{(1)} = 9,22$, $\epsilon_{33}^{(1)} = 11,51$, $\mu_{11}^{(1)} = 1,1$, $\mu_{22}^{(1)} = 1,1$, $\mu_{33}^{(1)} = 1,1$, во второй секции: $\epsilon_{11}^{(2)} = 3,701$, $\epsilon_{22}^{(2)} = 3,701$, $\epsilon_{33}^{(2)} = 3,932$, $\mu_{11}^{(2)} = 1$, $\mu_{22}^{(2)} = 1$, $\mu_{33}^{(2)} = 1$.

Рассмотрим результаты решения задачи при разных значениях абсолютной погрешности данных (табл. 2).

Таблица 2

Результаты решения обратной задачи
при абсолютной погрешности исходных данных равной $0,001 + 0,001i$.

F/A	F/A с погрешностью	max $\Delta\epsilon, \%$	max $\Delta\mu, \%$
$-0,2536 + 0,9155i$	$-0,2546 + 0,9145i$	0,65	0,91
$-0,4708 + 0,2755i$	$-0,4718 + 0,2745i$		
$-0,2536 + 0,9155i$	$-0,2546 + 0,9145i$		
$-0,4708 + 0,2755i$	$-0,4718 + 0,2745i$		

Вывод: максимальная относительная погрешность вычислений составила **0,91 %**.

Анализируя полученные численные результаты приходим к следующему выводу: при погрешности, не превышающей $0,001 + 0,001$, возможно использование разработанного метода на практике с заданной точностью.

Заключение

В ходе анализа результатов представленной задачи приходим к следующим выводам:

1. Разработанный в работе численный метод может быть использован при допустимой погрешности исходных данных, не превышающей $0,001 + 0,001$.

2. Восстановление тензорных электромагнитных характеристик многосекционной диафрагмы не зависит от структуры материалов, которыми заполнены каждая из секций диафрагмы.

Библиографический список

1. **Вайнштейн, Л. А.** Электромагнитные волны / Л. А. Вайнштейн. – Москва : Радио и связь, 1988. – 440 с.
2. **Деревянчук, Е. Д.** Восстановление электромагнитных характеристик многосекционной анизотропной диафрагмы в прямоугольном волноводе / Е. Д. Деревянчук, И. А. Родионова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2018. – № 2. – С. 57–63.
3. **Макеева, Г. С.** Математическое моделирование электроуправляемых устройств терагерцового диапазона на основе графена и углеродных нанотрубок : монография / Г. С. Макеева, О. А. Голованов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. – 304 с.
4. **Медведик, М. Ю.** Обратные задачи восстановления диэлектрической проницаемости неоднородного тела в волноводе / М. Ю. Медведик, Ю. Г. Смирнов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. – 76 с.
5. **Никольский, В. В.** Электродинамика и распространение радиоволн / В. В. Никольский, Т. И. Никольская. – Москва : Наука, 1989. – 544 с.
6. **Стрижаченко, А. В.** Измерение анизотропных диэлектриков на СВЧ. Теоретический анализ, устройства, методы / А. В. Стрижаченко. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 288 с.
7. Волноводные фотонные кристаллы с электрически управляемыми характеристиками / Д. А. Усанов, А. В. Скрипаль, С. А. Никитов, М. К. Мерданов, С. Г. Евтеев // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 43–51.
8. **Шван, Х. П.** Воздействие высокочастотных полей на биологические системы: Электрические свойства и биофизические механизмы / Х. П. Шван, К. Р. Фостер // ТИИЭР. – 1980. – № 1. – С. 121–132 с.
9. Analytical and numerical methods in electromagnetic wave theory / ed. by M. Hashimoto, M. Idemen, O. A. Tretyakov. – Tokyo : Science House Co., 1993.
10. **Baena, J. D.** Electrically small isotropic three-dimensional magnetic resonators for metamaterial design / J. D. Baena, L. Jelinek, R. Marques, J. Zehentner // Appl. Phys. Lett. – 2006. – Vol. 88 – P. 134108-1–3.
11. **Beilina, L.** Inverse problems and large-scale computations / L. Beilina, Yu. V. Shestopalov. – Springer International Publishing Switzerland, 2013. – 223 p.
12. **Martin, N.** Reconstruction of the constitutive parameters for an omega material in a rectangular waveguide / N. Martin, H. Sailing // IEEE Transactions On Microwave Theory Techniques. – 1995. – Vol. 43, № 6. – P. 1315–1321.
13. **Derevyanchuk, E. D.** Permittivity reconstruction of a one-sectional diaphragm in a rectangular waveguide / E. D. Derevyanchuk, Yu. G. Smirnov // Proceeding of Inter-

national Conference of Mathematics 2016. – ICNAAM, 2016. – P. 2–s2. 0–8526635622.

14. **Smirnov, Yu. G.** Mathematical methods for electromagnetic problems / Yu. G. Smirnov. – Penza, 2009. – 266 p.

References

1. Vaynshteyn L. A. *Elektromagnitnye volny* [Electromagnetic waves]. Moscow: Radio i svyaz', 1988, 440 p.
2. Derevyanchuk E. D., Rodionova I. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences]. 2018, no. 2, pp. 57–63. [In Russian]
3. Makeeva G. S., Golovanov O. A. *Matematicheskoe modelirovanie elektroupravlyаемых ustroystv teragertsovogo diapazona na osnove grafena i uglerodnykh nanotrubok: monografiya* [Mathematical modeling of electrically controlled devices of terahertz d-band based on graphene and carbon nanotubes: monograph]. Penza: Izd-vo PGU, 2018, 304 p. [In Russian]
4. Medvedik M. Yu., Smirnov Yu. G. *Obratnye zadachi vosstanovleniya dielektricheskoy prornitsaemosti neodnorodnogo tela v volnovode* [Inverse problems of reconstructing the dielectric constant of an inhomogeneous body in a waveguide]. Penza: Izd-vo PGU, 2014, 76 p. [In Russian]
5. Nikol'skiy V. V., Nikol'skaya T. I. *Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln* [Electrodynamic and radio wave propagation]. Moscow: Nauka, 1989, 544 p. [In Russian]
6. Strizhachenko A. V. *Izmerenie anizotropnykh dielektrikov na SVCh. Teoreticheskiy analiz, ustroystva, metody* [Measurement of anisotropic dielectrics in microwave. Theoretical analysis, devices, methods]. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011, 288 p. [In Russian]
7. Usanov D. A., Skripal' A. V., Nikitov S. A., Merdanov M. K., Evteev S. G. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy* [Physics of wave processes and radio engineering systems]. 2017, vol. 20, no. 3, pp. 43–51. [In Russian]
8. Shvan Kh. P., Foster K. R. *TIIEE*. 1980, no. 1, pp. 121–132 s.
9. *Analytical and numerical methods in electromagnetic wave theory*. Ed. by M. Hashimoto, M. Idemen, O. A. Tretyakov. Tokyo: Science House Co., 1993.
10. Baena J. D., Jelinek L., Marques R., Zehentner J. *Appl. Phys. Lett.* 2006, vol. 88, pp. 134108-1–3.
11. Beilina L., Shestopalov Yu. V. *Inverse problems and large-scale computations*. Springer International Publishing Switzerland, 2013, 223 p.
12. Martin N., Sailing H. *IEEE Transactions On Microwave Theory Techniques*. 1995, vol. 43, no. 6, pp. 1315–1321.
13. Derevyanchuk E. D., Smirnov Yu. G. *Proceeding of International Conference of Mathematics 2016*. ICNAAM, 2016, pp. 2–s2. 0–8526635622.
14. Smirnov Yu. G. *Mathematical methods for electromagnetic problems*. Penza, 2009, 266 p.

Деревянчук Екатерина Дмитриевна

кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник, научно-исследовательский центр
«Суперкомпьютерное моделирование
в электродинамике», Пензенский
государственный университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

Derevyanchuk Ekaterina Dmitrievna

Candidate of physical and mathematical
sciences, researcher, research
center “Supercomputer modeling
in electrodynamics”, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

E-mail: katyader11@yandex.ru

Деревянчук Наталия Владимировна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра математического обеспечения
и применения ЭВМ, Пензенский
государственный университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: natader@yandex.ru

Derevyanchuk Nataliya Vladimirovna

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of mathematical
support and computer applications, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Логинов Максим Александрович

студент, Пензенский
государственный университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: mmm@pnzgu.ru

Loginov Maksim Aleksandrovich

Student, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Деревянчук, Е. Д. Обратная задача восстановления электромагнитных характеристик многосекционной анизотропной диафрагмы в прямоугольном волноводе / Е. Д. Деревянчук, Н. В. Деревянчук, М. А. Логинов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2019. – № 4 (52). – С. 86–94. – DOI 10.21685/2072-3040-2019-4-8.