

*Е. Д. Деревянчук, Н. В. Деревянчук,
А. К. Шишкина, И. В. Подборонов, С. И. Панин*

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЕКЦИОННОЙ АНИЗОТРОПНОЙ ДИАФРАГМЫ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ¹

Аннотация.

Актуальность и цели. Рассматривается задача электродинамики – задача определения электромагнитных (тензорных) и геометрических характеристик многосекционной диафрагмы в прямоугольном волноводе. Цель исследования – разработать численно-аналитический метод решения обратной задачи.

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

Результаты. Разработан численный метод, который был протестирован на нескольких сериях задач.

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

Ключевые слова: прямоугольный волновод, анизотропная диафрагма, толщина секции диафрагмы, задача электродинамики, комплексная диэлектрическая проницаемость, диагональный тензор, тензор диэлектрической проницаемости, тензор магнитной проницаемости, волноводный метод.

*E. D. Derevyanchuk, N. V. Derevyanchuk,
A. K. Shishkina, I. V. Podboronov, S. I. Panin*

THE INVERSE PROBLEM OF RECOVERING ELECTROMAGNETIC AND GEOMETRIC PROPERTIES OF A MULTISECTIONAL ANISOTROPIC DIAPHRAGM IN A RECTANGULAR WAVEGUIDE

Abstract.

Background. This paper is devoted to inverse problem of recovering electromagnetic and geometric properties of a multisectional anisotropic diaphragm in a rectangular waveguide. 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 and thickness reconstruction of multisectional di-

¹ Работа финансово поддержана грантом Президента РФ № МК-3604.2018.1, а также грантом Министерства образования и науки РФ (госзадание № 1.894.2017/4.6).

© Деревянчук Е. Д., Деревянчук Н. В., Шишкина А. К., Подборонов И. В., Панин С. И., 2020. 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.

aphragm. The problem is devoted to the boundary value problem for Maxwell's equations.

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: rectangular waveguide, anisotropic diaphragm, thickness of the diaphragm section, electrodynamic problem, complex permittivity, diagonal tensor, dielectric permittivity tensor, magnetic permeability tensor, waveguide method.

Введение

Данная статья посвящена обратным задачам электродинамики [1–12].

Целью данной работы является исследование обратной задачи восстановления электромагнитных и геометрических характеристик многосекционной диафрагмы волноводным методом.

1. Численный метод решения обратной задачи (анизотропная диафрагма)

1.1. 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.

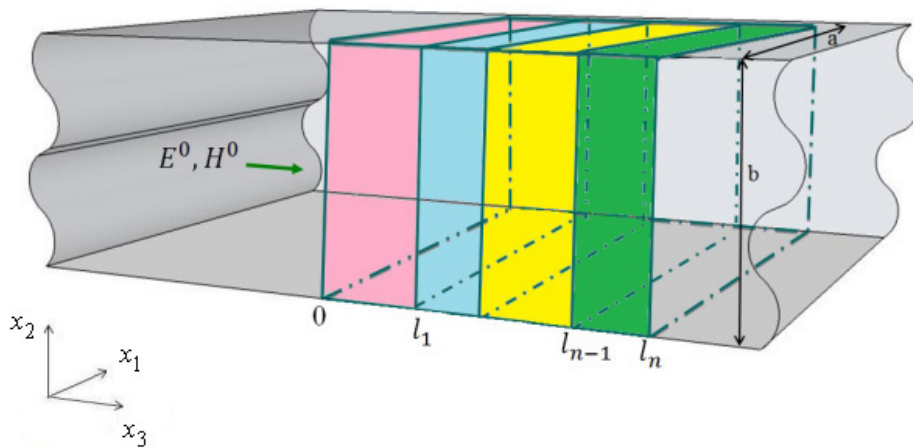


Рис. 1. Многосекционная диафрагма в волноводе

Стенки волновода будем считать идеально проводящими. Внутри волновода расположена диафрагма

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

с секциями

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

где $l_j - l_{j-1}$ – неизвестная 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 [3, 13]:

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

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: $\frac{\pi}{a} < k_0 < \frac{\pi}{b}$ [2, 4, 14, 15].

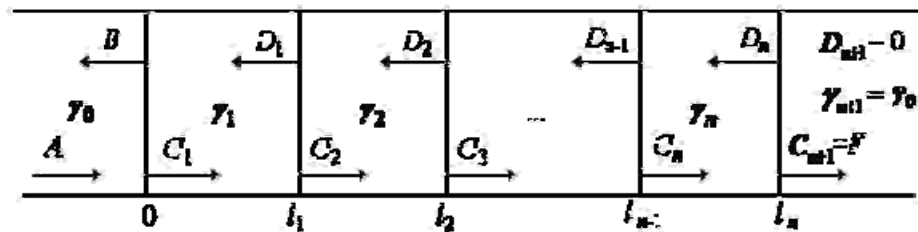


Рис. 2. Распространение волны в волноводе

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:

$$\gamma_0 = \sqrt{\omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 - \frac{\pi^2}{a^2}}, \quad \gamma_j = \sqrt{\left(\omega^2 \varepsilon_{22}^{(j)} \mu_{33}^{(j)} - \frac{\pi^2}{a^2}\right) \frac{\mu_{11}^{(j)}}{\mu_{33}^{(j)}}}. \quad (7)$$

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 $\varepsilon^{(j)}(\omega)$, $\mu^{(j)}(\omega)$, $j = (1, \dots, n)$.

1.2. 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

$$p_1 = 1, \quad p_{j+1} = \frac{\gamma_{j-1}}{\mu_{11}^{(j-1)}} p_j \cos \alpha_j + \frac{\gamma_j}{\mu_{11}^{(j)}} q_j i \sin \alpha_j,$$

$$q_1 = 1, \quad q_{j+1} = \frac{\gamma_{j-1}}{\mu_{11}^{(j-1)}} p_j i \sin \alpha_j + \frac{\gamma_j}{\mu_{11}^{(j)}} q_j \cos \alpha_j, \quad \alpha_j = \gamma_j (l_j - l_{j-1}),$$

$$\gamma_j = \sqrt{\left(\omega^2 \epsilon_{22}^j \mu_{33}^j - \frac{\pi^2}{a^2} \right) \frac{\mu_{11}^j}{\mu_{33}^j}}, \quad j = 1, \dots, n.$$

Система (9) представляет собой систему $2n$ действительных уравнений с $2n$ неизвестными $\epsilon_{22}^{(j)}, \mu_{11}^{(j)}$ ($j = 1, \dots, n$). В уравнения системы (9) не входят компоненты $\epsilon_{11}^{(j)}, \mu_{22}^{(j)}$ ($j = 1, \dots, n$). 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

$$\tilde{\epsilon}^{(j)} = \begin{pmatrix} \epsilon_{22}^{(j)} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11}^{(j)} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33}^{(j)} \end{pmatrix}, \quad \tilde{\mu}^{(j)} = \begin{pmatrix} \mu_{22}^{(j)} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{11}^{(j)} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{33}^{(j)} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Выражение для γ_j преобразуется к виду

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

Для тензоров (10) система (9) преобразуется к следующему виду:

$$\frac{\tilde{F}}{A}(\omega_s) = \frac{2e^{-i\gamma_0(\omega_s)l_n} \prod_{j=0}^n \frac{\gamma_j(\omega_s)}{\mu_{11}^{(j)}}}{\frac{\tilde{\gamma}_n(\omega_s)}{\mu_{11}^{(n)}} \tilde{p}_{n+1}^{(+)}(\omega_s) + \frac{\gamma_0}{\mu_0} \tilde{q}_{n+1}^{(+)}(\omega_s)}, \quad s = 1, \dots, 2n, \quad (11)$$

$$p_1 = 1, \quad \tilde{p}_{j+1} = \frac{\tilde{\gamma}_{j-1}}{\mu_{11}^{(j-1)}} \tilde{p}_j \cos \tilde{\alpha}_j + \frac{\tilde{\gamma}_j}{\mu_{11}^{(j)}} \tilde{q}_j i \sin \tilde{\alpha}_j,$$

$$q_1 = 1, \quad \tilde{q}_{j+1} = \frac{\tilde{\gamma}_{j-1}}{\mu_{11}^{(j-1)}} \tilde{p}_j i \sin \tilde{\alpha}_j + \frac{\tilde{\gamma}_j}{\mu_{11}^{(j)}} \tilde{q}_j \cos \tilde{\alpha}_j,$$

$$\tilde{\alpha}_j = \tilde{\gamma}_j (l_j - l_{j-1}), \quad j = 1, \dots, n.$$

Решая совместно системы (9) и (11) методом Левенберга – Марквардта, полностью определяем тензоры магнитной проницаемости и диэлектрической проницаемости каждой секции анизотропной диафрагмы.

1.3. 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 $\omega_1 = 1,7$, что соответствует частоте $f_1 = 8,12$ ГГц, $\omega_2 = 2$ соответствует $f_2 = 9,55$ ГГц, $\omega_3 = 2,5$ соответствует $f_3 = 11,95$ ГГц. Точные значения толщин секций: $l_1 = 0,5$ см, $l_2 = 1$ см, диэлектрической проницаемости в первой секции $\epsilon_{11}^{(1)} = 1,1$, $\epsilon_{22}^{(1)} = 1,2$, $\epsilon_{33}^{(1)} = 28$, $\mu_{11}^{(1)} = 1,1$, $\mu_{22}^{(1)} = 2$, $\mu_{33}^{(1)} = 3$, во второй секции $\epsilon_{11}^{(2)} = 11,6$, $\epsilon_{22}^{(2)} = 9,4$, $\epsilon_{33}^{(2)} = 9,4$, $\mu_{11}^{(2)} = 4$, $\mu_{22}^{(2)} = 5$, $\mu_{33}^{(2)} = 1,1$.

Рассмотрим результаты решения задачи при разных значениях абсолютной погрешности данных (табл. 1).

Таблица 1

Результаты решения обратной задачи при абсолютных погрешностях исходных данных: вещественной части коэффициента прохождения 0,001 и мнимой части 0,001

$F / A(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$	$\max \Delta l, \%$	$\max \Delta \epsilon, \%$	$\max \Delta \mu, \%$
$0,09022 + 0,70398i$ $0,83448 + 0,50148i$ $0,72877 - 0,54453i$	5	7,31	7,98
$0,82420 - 0,39256i$ $0,18206 - 0,75138i$ $-0,957 - 0,27077i$			

Приведем еще несколько примеров.

Пример 2 (округляем до 5 знака):

$F / A(\omega_3)$	$\max \Delta l, \%$	$\max \Delta \epsilon, \%$	$\max \Delta \mu, \%$
$-0,95669 - 0,27077i$	5	0,06	0,07

Пример 3 (округляем до 4 знака):

$F / A(\omega_3)$	$\max \Delta l, \%$	$\max \Delta \epsilon, \%$	$\max \Delta \mu, \%$
$-0,9566 - 0,2707i$	5	2,44	2,85

Вывод: максимальная относительная погрешность вычислений составила **5 %**, что допустимо для использования на практике.

Анализируя полученные численные результаты, приходим к следующему выводу: при абсолютной погрешности вещественной части, не превышающей 0,001, и абсолютной погрешности мнимой части, не превышающей 0,001 коэффициента прохождения, возможно использование разработанного метода на практике.

Заключение

В ходе анализа результатов представленной задачи приходим к следующим выводам:

1. Разработанный численный метод может быть использован на практике.
2. Восстановление тензорных электромагнитных характеристик многосекционной диафрагмы не зависит от структуры материалов, которыми заполнены каждая из секций диафрагмы.

Библиографический список

1. **Анго, А.** Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго. – Москва, 1965. – 774 с.
2. **Вайнштейн, Л. А.** Электромагнитные волны / Л. А. Вайнштейн. – Москва : Радио и связь, 1988. – 440 с.
3. **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.
4. **Макеева, Г. С.** Математическое моделирование электроуправляемых устройств терагерцового диапазона на основе графена и углеродных нанотрубок / Г. С. Макеева, О. А. Голованов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. – 304 с.
5. **Медведик, М. Ю.** Обратные задачи восстановления диэлектрической проницаемости неоднородного тела в волноводе / М. Ю. Медведик, Ю. Г. Смирнов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. – 42 с.
6. **Никольский, В. В.** Электродинамика и распространение радиоволн / В. В. Никольский, Т. И. Никольская. – Москва : Наука, 1989. – 544 с.
7. **Стрижаченко, А. В.** Измерение анизотропных диэлектриков на СВЧ. Теоретический анализ, устройства, методы / А. В. Стрижаченко. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 288 с.
8. 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.
9. **Шван, Х. П.** Воздействие высокочастотных полей на биологические системы: Электрические свойства и биофизические механизмы / Х. П. Шван, К. Р. Фостер // Труды Института инженеров по электронике и радиоэлектронике. – 1980. – Т. 68, № 1. – С. 121–132.
10. Analytical and numerical methods in electromagnetic wave theory / ed. by M. Hashimoto, M. Idemen, and O. A. Tretyakov. – Tokyo : Science House Co., Ltd., 1993. – 702 p.
11. **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.
12. **Beilina, L.** Inverse problems and large-scale computations / L. Beilina, Yu. V. Shestopalov. – Springer International Publishing Switzerland, 2013. – 218 p.
13. **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.
14. **Derevyanchuk, E. D.** Permittivity reconstruction of a one-sectional diaphragm in a rectangular waveguide / E. D. Derevyanchuk, Yu. G. Smirnov // Proceeding of International Conference of Mathematics 2016. – ICNAAM, 2016. – P. 2–s2. 0–8526635622.

15. Smirnov, Yu. G. Mathematical methods for electromagnetic problems / Yu. G. Smirnov. – Penza, 2009. – 268 p.

References

1. Ango A. *Matematika dlya elektro- i radioinzhenerov* [Mathematics for electrical and radio engineers]. Moscow, 1965, 774 p. [In Russian]
2. Vaynshteyn L. A. *Elektromagnitnye volny* [Electromagnetic waves]. Moscow: Radio i svyaz', 1988, 440 p. [In Russian]
3. 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]
4. Makeeva G. S., Golovanov O. A. *Matematicheskoe modelirovanie elektroupravlyаемых ustroystv teragertsovogo diapazona na osnove grafena i uglerodnykh nanotrubok* [Mathematical modeling of terahertz electrically controlled devices based on graphene and carbon nanotubes]. Penza: Izd-vo PGU, 2018, 304 p. [In Russian]
5. Medvedik M. Yu., Smirnov Yu. G. *Obratnye zadachi vosstanovleniya dielektricheskoy pronitsaemosti neodnorodnogo tela v volnovode* [Inverse problems of recovering the dielectric constant of an inhomogeneous body in a waveguide]. Penza: Izd-vo PGU, 2014, 42 p. [In Russian]
6. Nikol'skiy V. V., Nikol'skaya T. I. *Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln* [Electrodynamics and radio wave propagation]. Moscow: Nauka, 1989, 544 p. [In Russian]
7. 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]
8. 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]
9. Shvan Kh. P., Foster K. R. *Trudy Instituta inzhenerov po elektronike i radioelektronike* [Proceedings of Institute of electronics and radioelectronics]. 1980, vol. 68, no. 1, pp. 121–132. [In Russian]
10. *Analytical and numerical methods in electromagnetic wave theory*. Ed. by M. Hashimoto, M. Idemen, and O. A. Tretyakov. Tokyo: Science House Co., Ltd., 1993, 702 p.
11. Baena J. D., Jelinek L., Marques R., Zehentner J. *Appl. Phys. Lett.* 2006, vol. 88, pp. 134108 1–3.
12. Beilina L., Shestopalov Yu. V. *Inverse problems and large-scale computations*. Springer International Publishing Switzerland, 2013, 218 p.
13. Martin N., Sailing H. *IEEE Transactions On Microwave Theory Techniques*. 1995, vol. 43, no. 6, pp. 1315–1321.
14. Derevyanchuk E. D., Smirnov Yu. G. *Proceeding of International Conference of Mathematics 2016*. ICNAAM, 2016, pp. 2–s2. 0–8526635622.
15. Smirnov Yu. G. *Mathematical methods for electromagnetic problems*. Penza, 2009, 268 p.

Деревянчук Екатерина Дмитриевна
кандидат физико-математических наук,
доцент, кафедра математики
и суперкомпьютерного моделирования,
Пензенский государственный
университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: katyader11@yandex.ru

Derevyanchuk Ekaterina Dmitrievna
Candidate of physical and mathematical
sciences, associate professor,
sub-department of mathematics
and supercomputer modeling,
Penza State University
(40, Krasnaya street, Penza, Russia)

Деревянчук Наталия Владимировна

кандидат технических наук,
преподаватель, кафедра наземных
радиотехнических устройств,
Пензенский филиал Военной
академии материально-технического
обеспечения имени генерала армии
А. В. Хрулева (Россия, Пенза-5,
Военный городок)

E-mail: natader@yandex.ru

Derevyanchuk Nataliya Vladimirovna

Candidate of engineering sciences, lecturer,
sub-department of ground-based radio
engineering devices, Penza branch
of military academy of logistics named
after General Army A. V. Khrulyov
(Voeniy gorodok, Penza-5, Russia)

***Шишкина Анастасия
Константиновна***

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

E-mail: nastja1999.sh1999@yandex.ru

Shishkina Anastasiya Konstantinovna

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

Подборонов Иван Владиславович

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

E-mail: ivan.podboronov@gmail.com

Podboronov Ivan Vladislavovich

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

Панин Сергей Игоревич

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

E-mail: panin19981998@mail.ru

Panin Sergey Igorevich

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

Образец цитирования:

Обратная задача восстановления электромагнитных и геометрических характеристик многосекционной анизотропной диафрагмы в прямоугольном волноводе / Е. Д. Деревянчук, Н. В. Деревянчук, А. К. Шишкина, И. В. Подборонов, С. И. Панин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2020. – № 1 (53). – С. 88–96. – DOI 10.21685/2072-3040-2020-1-7.