

Отражение волн от подвижного упругого слоя в многомодовом волноводе

Е.С. Устинова¹ , В.И. Воловач¹ , Т.А. Антипова² , К.А. Адыширин-Заде² 

¹ Поволжский государственный университет сервиса
445017, Россия, Самарская обл., г. Тольятти,
ул. Гагарина, 4

² Самарский государственный медицинский университет
443099, Россия, г. Самара,
ул. Чапаевская, 89

Аннотация – В работе рассмотрены особенности отражения волн от подвижного слоя в волноводной структуре. Установлено, что изменение частоты в эффекте Доплера существенно зависит от индекса мод волн, распространяющихся в волноводе. С увеличением скорости движения подвижного слоя для всех мод волн наблюдается уменьшение степени зависимости частоты отраженных волн от скорости движения среды. Для каждой моды имеется критическое значение скорости движения границы, при превышении которой меняется характер зависимости частоты отраженных волн от скорости движения границы раздела. Установлено, что движение среды, заполняющей акустический волновод, приводит к невязности его параметров в прямом и обратном направлениях. Степень невязности пропорциональна скорости движения среды. Скорость движения среды также влияет на скорость распространения акустических волн и приводит к изменению критических частот или критических длин волн мод волновода. С ростом скорости движения среды увеличивается число мод, для которых выполняется условие распространения.

Ключевые слова – несимметрия структуры; волноводные структуры; волноводы; движение сред; упругие волны.

Введение

Волноводные структуры применяются для передачи энергии и информационных сигналов в широком диапазоне длин волн и по волнонаправляющим физическим свойствам обычно имеют взаимные (одинаковые) свойства в прямом и обратном направлениях. Несимметрия структуры и внешние воздействия часто могут стать причиной невязности структур для волн, распространяющихся во взаимно противоположных направлениях (это свойство хотя и ограничено, но уже используется в так называемых невязных устройствах СВЧ-, КВЧ- и оптического диапазонов: это ферритовые вентили, циркуляторы, фазовращатели) [4]. Вместе с тем невязные свойства волнонаправляющих структур, независимых от их физической природы, не рассматривались.

Рассмотрим эффект Доплера для основной и высших мод многомодового волновода со слоем магнетодиэлектрика, движущимся вдоль оси волновода. Основные свойства могут быть рассмотрены на модели плоского волновода (рис. 1). Пусть однородный слой среды 2 толщиной d с показателем преломления $n_2 = \sqrt{\epsilon_2 \mu_2}$ движется с постоянной скоростью u вдоль оси волновода Ox . Координата левого края слоя описывается во времени зависимостью $x = ut$, правого – $x = ut + d$. Слева от

границы расположена среда 1, характеризуемая показателем преломления $n_1 = \sqrt{\epsilon_1 \mu_1}$. Справа – среда 3 с показателем преломления $n_3 = \sqrt{\epsilon_3 \mu_3}$. Скорость распространения волн в первой среде равна c_1 , в третьей – c_3 . Во второй среде с учетом её движения вдоль оси волновода Ox скорости волн в прямом и обратном направлениях в общем случае различаются $c_{21} \neq c_{22}$. Для анализа особенностей отражения электромагнитных волн, падающих из области 1 на поверхность подвижного слоя, ищется решение волновых уравнений в областях 1–3 с учетом граничных условий на стенках волновода $E_\tau(y=0, d) = 0$ и на подвижных границах раздела сред ($x = ut$) в виде

$$\begin{aligned} E_{1z}(x) &= E_{2z}(x), \\ H_{1y}(x) &= H_{2y}(x), \\ E_{2z}(x+d) &= E_{3z}(x+d), \\ H_{2y}(x+d) &= H_{3y}(x+d). \end{aligned} \quad (1)$$

Анализ показывает, что решение существует в том случае, когда частоты падающих и отраженных волн в каждом из слоев в общем случае различны. Решение в каждой из областей ищется в виде [5]:

$$\begin{cases} E_{11z} = A_{11} \sin k_z z \exp[i(\omega t - k_{11} x)]; \\ E_{12z} = A_{12} \sin k_z z \exp[i(\omega_1 t + k_{12} x)], \end{cases}$$

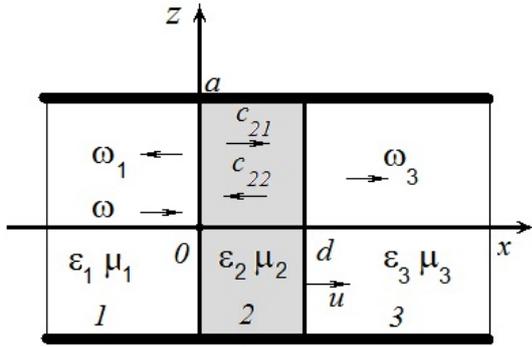


Рис. 1. Отражение и прохождение волн через подвижный слой в волноводе

Fig. 1. Reflection and transmission of waves through a moving layer in a waveguide

$x \leq 0$,

$$\begin{cases} E_{21z} = A_{21} \sin k_2 z \exp \left[i(\omega_2 t + k_{21} x) \right]; \\ E_{22z} = A_{22} \sin k_2 z \exp \left[i(\omega_3 t - k_{22} x) \right], \end{cases}$$

$x \leq 0 \leq d$,

$$E_{31z} = A_{31} \sin k_3 z \exp \left[i(\omega_4 t - k_{31} x) \right],$$

$x \geq d$,

где в общем случае волновые числа прямых и обратных волн могут различаться $k_{11} \neq k_{12}$, $k_{21} \neq k_{22}$.

Проекция волнового числа на ось Oz с учетом граничных условий в плоскостях $y=0$, $y=a$ равна $k_{zm} = m\pi/a$, $m=1,2,3,\dots$ – индекс моды. Продольные волновые числа определяются соотношениями:

$$k_{11} = k_{12} = \sqrt{n_1^2 \frac{\omega^2}{c^2} - k_{zm}^2}, \quad k_{21} = \sqrt{n_2^2 \frac{\omega_2^2}{c_{21}^2} - k_{zm}^2},$$

$$k_{22} = \sqrt{n_2^2 \frac{\omega_3^2}{c_{22}^2} - k_{zm}^2}, \quad k_{31} = \sqrt{n_3^2 \frac{\omega_4^2}{c^2} - k_{zm}^2}.$$

Для кусочно-однородной конфигурации преобразования мод на границах раздела сред не происходит. В этом случае распространяющиеся в волноводе моды, характеризуемые индексами m , между собой не взаимодействуют, и можно независимо рассматривать распространения и отражения отдельно каждой моды. Подстановка искоемых решений в граничные условия для компонент поля E_z , H_y при $x=ut$, $x=ut+d$ дает соотношения между амплитудами A_{ij} и частотами ω_i для каждого типа волн с произвольным индексом m , который для простоты записи в системе уравнений опускается:

$$\begin{aligned} & A_{11} e^{i(\omega - uk_{11})t} + A_{12} e^{i(\omega_1 + uk_{12})t} = \\ & = A_{21} e^{i(\omega_2 - uk_{21})t} + A_{22} e^{i(\omega_3 + uk_{22})t}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - \frac{k_{11}}{\rho_1} A_{11} e^{i(\omega - uk_{11})t} + \frac{k_{12}}{\rho_1} A_{12} e^{i(\omega_1 + uk_{12})t} = \\ & = - \frac{k_{21}}{\rho_2} A_{21} e^{i(\omega_2 - uk_{21})t} + \frac{k_{22}}{\rho_2} A_{22} e^{i(\omega_3 + uk_{22})t}, \\ & A_{21} e^{-\frac{i\omega_2 d}{c_{21}}} e^{i(\omega_2 - uk_{21})t} + A_{22} e^{\frac{i\omega_3 d}{c_{22}}} e^{i(\omega_3 + uk_{22})t} = \\ & = A_{31} e^{-\frac{i\omega_4 d}{c_{31}}} e^{i(\omega_4 - uk_{31})t}, \\ & - \frac{k_{21}}{\rho_2} A_{21} e^{-\frac{i\omega_2 d}{c_{21}}} e^{i(\omega_2 + uk_{21})t} + \\ & + \frac{k_{22}}{\rho_2} A_{22} e^{\frac{i\omega_3 d}{c_{22}}} e^{i(\omega_3 + uk_{22})t} = \\ & = - \frac{k_{31}}{\rho_3} A_{31} e^{-\frac{i\omega_4 d}{c_{31}}} e^{i(\omega_4 - uk_{31})t}. \end{aligned}$$

Эти соотношения должны выполняться для любого момента времени t , что приводит к условию $\omega - uk_{11}(\omega) = \omega_1 + uk_{12}(\omega_1) = \omega_2 - uk_{21}(\omega_2) = \omega_3 + uk_{22}(\omega_3) = \omega_4 - uk_{31}(\omega_4)$.

Отметим, что частоты ω_1 – отраженной от левой границы подвижного слоя волны в первой среде, волны, ω_2 – прошедшей во вторую среду, частота волны во втором слое ω_3 , отраженной от правой границы подвижного слоя 2, частота ω_4 волны, прошедшей в среду 3, в общем случае отличаются от частоты падающей волны ω и зависят: от скорости движения границы раздела сред u , от скорости движения каждой из сред v_1 , v_2 , v_3 , от типа волноводной структуры и индекса моды m . Следует отметить, что соотношения выполняются для различных типов кусочно-однородных вдоль оси Oz волноводных структур.

Рассмотрим основные особенности, которые вносит поперечная вариация поля. Частота ω_1 отраженной от подвижного слоя волны с индексом m определяется через частоту ω падающей на границу волны с тем же индексом уравнением

$$\omega - uk_{11mz}(\omega) = \omega_{1m} + uk_{12mz}(\omega_{1m}),$$

которое для плоской структуры, показанной на рис. 1 может быть представлено в виде

$$\omega - u \sqrt{n_1^2 \frac{\omega^2}{c^2} - \left(\frac{m\pi}{2a} \right)^2} = \omega_1 + u \sqrt{n_1^2 \frac{\omega_1^2}{c^2} - \left(\frac{m\pi}{2a} \right)^2} \quad (3)$$

(здесь $c_1 = c$). Для волновых чисел падающей и отраженной волн имеем соотношение

$$k - \frac{u}{c} \sqrt{n_1^2 k^2 - k_{zm}^2} = k_1 + \frac{u}{c} \sqrt{n_1^2 k_1^2 - k_{zm}^2}. \quad (4)$$

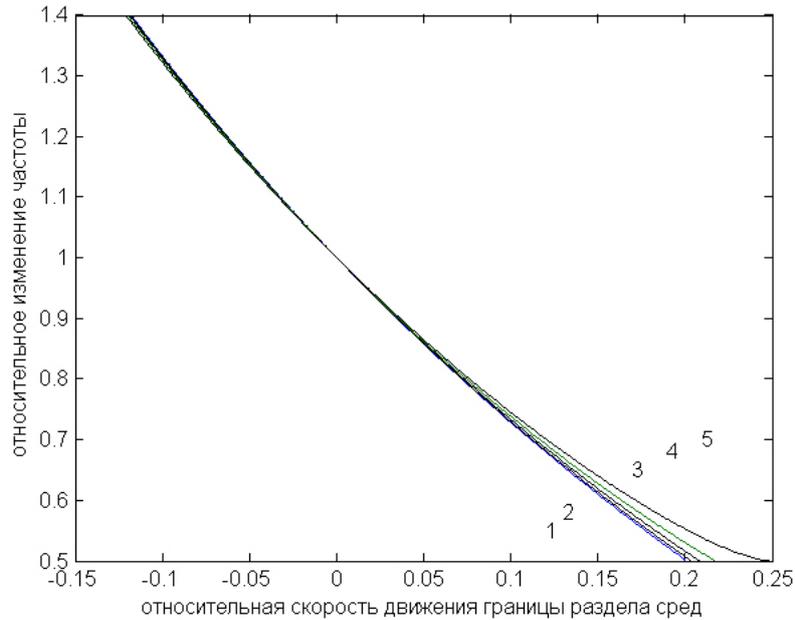


Рис. 2. Зависимость изменения частоты ω_1 / ω отраженных волн от относительной скорости u/c движения границы раздела сред (1 - $m = 0$; 2 - $m = 1$; 3 - $m = 2$; 4 - $m = 3$; 5 - $m = 4$, $pc/\omega a = 0,2$, $n = 1$)

Fig. 2. Dependence of the change in the frequency ω_1 / ω of reflected waves depending on the relative velocity u/c of the movement of the interface between the media (1 - $m = 0$; 2 - $m = 1$; 3 - $m = 2$; 4 - $m = 3$; 5 - $m = 4$, $pc/\omega a = 0,2$, $n = 1$)

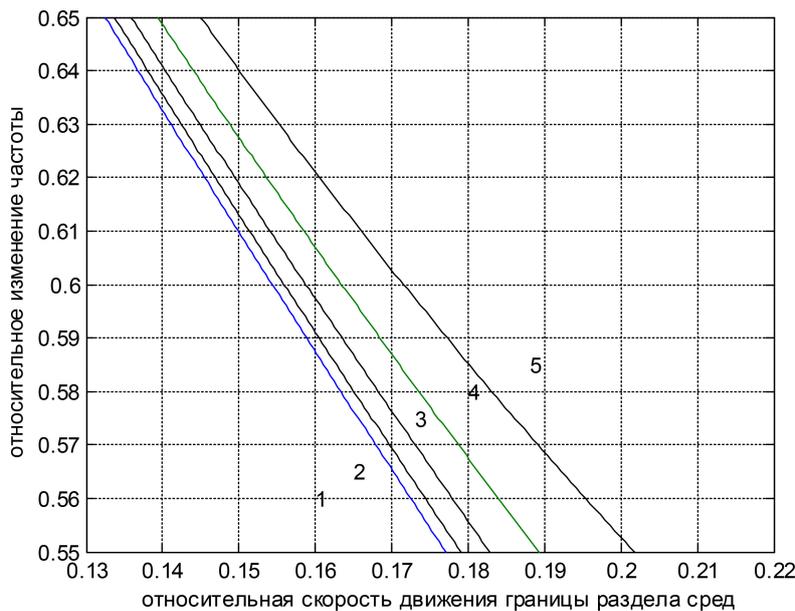


Рис. 3. Зависимость изменения частоты ω_1 / ω отраженных волн от относительной скорости u/c движения границы раздела сред (1 - $m = 0$; 2 - $m = 1$; 3 - $m = 2$; 4 - $m = 3$; 5 - $m = 4$, $pc/\omega a = 0,2$, $n = 1$)

Fig. 3. Dependence of the change in the frequency ω_1 / ω of the reflected waves depending on the relative velocity u/c of the movement of the interface between the media (1 - $m = 0$; 2 - $m = 1$; 3 - $m = 2$; 4 - $m = 3$; 5 - $m = 4$, $pc/\omega a = 0,2$, $n = 1$)

Частота отраженной волны ω_1 в волноводе, включающего движущуюся границу раздела сред, зависит от номера моды m .

На рис. 2–3 показана зависимость относительного изменения частоты отраженных волн от относительной скорости движения границы раздела сред u/c для различных мод. Если слой 2 неподвижен, тогда $u/c < 0$, как и следовало ожидать, эффект Доплера не наблюдается ($\omega_1 / \omega = 1$).

Увеличение частоты $\left(\omega_4 = \frac{c_1 - u}{c_3 - u} \omega \right)$ наблюдается при движении слоя навстречу волне ($u/c < 0$), уменьшение частоты ($\omega_1 / \omega < 1$) наблюдается при «убегании» слоя от волны ($u/c > 1$). Случай $m = 0$ соответствует одномерной структуре и сводится к известному соотношению [1; 2]:

$$\omega_1 = \frac{c - u}{c + u} \omega.$$

С увеличением индекса моды m скорость изменения частоты ω_1/ω в зависимости от скорости движения границы раздела сред u/c уменьшается и при некотором критическом значении скорости ($u/c > 1$), различном для разных мод m , зависимость ω_1/ω принимает аномальный характер: уменьшение частоты с ростом скорости меняется на увеличение частоты. При этом сохраняется условие ($\omega_1/\omega < 1$).

Частота отраженной волны ω_{1m} зависит от индекса возбуждаемой моды m . Это означает, что если граница раздела 1 и 2 сред является неоднородной (например, слой переменной толщины), то отражение от границы раздела сред в волноводе сопровождается возбуждением высших мод и каждой моде соответствует свой доплеровский сдвиг отраженной волны, и спектр отраженного сигнала обогащается увеличением числа мод и увеличением числа частот в отраженной волне.

Движение слоя приводит к тому, что каждой моде соответствует отдельная частотная составляющая ω_{1m} эффекта Доплера, формируется многомодовый и соответствующий ему многочастотный эффект Доплера [3].

Для волны, прошедшей в третью область, частоты мод прошедших волн ω_{4m} в общем случае отличаются от частоты волны, падающей на границу раздела подвижного слоя, и определяются уравнением

$$\omega - uk_{11m}(\omega) = \omega_{4m} - uk_{31m}(\omega_{4m}). \quad (5)$$

В частности, для плоской структуры:

$$\omega - u\sqrt{\frac{\omega^2}{c^2}n_1^2 - \left(\frac{m\pi}{2a}\right)^2} = \omega_{4m} - u\sqrt{\frac{\omega_{4m}^2}{c^2}n_3^2 - \left(\frac{m\pi}{2a}\right)^2}.$$

Частоты прошедших в третью сред мод не зависят от параметров второй среды. Отметим, что если параметры первой и третьей сред одинаковые ($n_1 = n_3$), то прохождение моды $m = 1$ не приводит к сдвигу частоты прошедшей волны и $\omega = \omega_{41}$. Однако частоты прошедших волн более высокого порядка ($m > 1$), которые могут возбуждаться неоднородностями структуры, не совпадают с частотой падающей волны ($\omega \neq \omega_{41}$). В частном случае $m = 0$ подвижной границы раздела в свободном пространстве ($u/c \neq 0$) имеем известные соотношения для отраженной и прошедшей волн:

$$\omega_1 = \frac{c_1 - u}{c_1 + u}\omega, \quad \omega_4 = \frac{c_1 - u}{c_3 - u}\omega.$$

Для прошедшей волны уменьшение или увеличение частоты доплеровского сдвига зависит от соотношения скоростей распространения волн в первой и третьей средах, и, если скорости волн в этих средах совпадают, доплеровский сдвиг для прошедших волн не наблюдается [6; 7].

В многомодовых волноводных структурах с подвижными средами может наблюдаться эффект Доплера для каждой моды, доплеровский сдвиг частоты зависит от индекса моды, в случае неоднородной структуры будет наблюдаться многомодовый эффект Доплера: отражение многих мод с различными частотными сдвигами по отношению к частоте падающей на неоднородность волны.

Заключение

Изучено влияние невзаимности параметров сред, заполняющих волноводную структуру, на параметры акустических и электромагнитных волноводов. Невзаимность структуры приводит к изменению критических длин волн или частот мод, распространяющихся в волноводе, в частности, к изменению количества распространяющихся мод. Движение среды, вызывающее невзаимность параметров, приводит к изменению волновых чисел и наиболее существенно при скоростях движения сред, сопоставимых со скоростью распространения волн в неподвижной среде.

Рассмотрено прохождение волн через подвижную границу раздела сред в волноводе. Получены соотношения для расчета частот отраженных и прошедших подвижную границу раздела сред в волноводе для основной и высших типов волн в зависимости от скорости движения границы раздела сред и самих сред. При наличии неоднородностей, вызывающих порождение многомодового режима, возникает формирование многокомпонентного спектра частот, соответствующих модовым компонентам, многочастотного эффекта Доплера для отраженных и для прошедших неоднородность волн.

Установлено, что отражение от движущейся границы раздела сред приводит к зависимости изменения частоты отраженного сигнала как от скорости движения границы раздела сред, так и от номера моды. Для высших типов волн эта зависимость наименьшая для малых скоростей движения границы $u/c < 0,3$ и наибольшая при больших скоростях $u/c > 0,7$.

Список литературы

1. Features of reflection acoustic waves from mobile border of section of moving media / A.G. Glushchenko [et al.] // *The European Parliament Scientific Enquiry in the Contemporary World: Theoretical Basics and Innovative Approach*. FL, USA, L&L Publishing. 2012. P. 62–67.
2. Влияние движения сред на отражение упругих волн от подвижной границы / А.Г. Глущенко [и др.] // *Научное обозрение. Физико-математические науки*. 2014. № 1. С. 25–26. URL: <https://physics.science-review.ru/ru/article/view?id=23>
3. Глущенко А.Г., Глущенко Е.П., Устинова Е.С. Невзаимные волновые процессы // *European Research*. 2015. № 10 (11). С. 9–12.
4. Никольский В.В., Никольская Т.И. *Электродинамика и распространение радиоволн*. М.: Либроком, 2010. 544 с.
5. Ле Х.Т., Полюнкин А.В. Влияние эффекта Доплера на эффективность передачи OFDM сигналов в системах связи с беспилотными летательными аппаратами // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2014. № 1. С. 28–36.
6. Глущенко А.Г., Устинова Е.С. Отражение акустических волн от подвижной границы раздела невзаимных сред // *Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации*. 2015. № 5-1. С. 198–202.
7. Глущенко А.Г., Глущенко Е.П., Устинова Е.С. Особенности отражения волн в невзаимных структурах // *Физика и технические приложения волновых процессов, ФИТПВП: мат. XIV Межд. науч.-техн. конф.* 2016. 316 с.

References

1. Glushchenko A.G. et al. Features of reflection acoustic waves from mobile border of section of moving media. *The European Parliament Scientific Enquiry in the Contemporary World: Theoretical Basics and Innovative Approach*. FL, USA, L&L Publishing, 2012, pp. 62–67.
2. Glushchenko A.G. et al. Influence of the motion of media on the reflection of elastic waves from a moving boundary. *Nauchnoe obozrenie. Fiziko-matematicheskie nauki*, 2014, no. 1, pp. 25–26. URL: <https://physics.science-review.ru/ru/article/view?id=23> (In Russ.)
3. Glushchenko A.G., Glushchenko E.P., Ustinova E.S. Nonreciprocal wave processes. *European Research*, 2015, no. 10 (11), pp. 9–12. (In Russ.)
4. Nikol'skij V.V., Nikol'skaja T.I. *Electrodynamics and Radio Propagation*. Moscow: Librokom, 2010, 544 p. (In Russ.)
5. Le H.T., Polynkin A.V. Influence of the Doppler effect on the transmission efficiency of OFDM signals in communication systems with unmanned aerial vehicles. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki*, 2014, no. 1, pp. 28–36. (In Russ.)
6. Glushchenko A.G., Ustinova E.S. Reflection of acoustic waves from a moving interface of nonreciprocal media. *Informacionnye tehnologii. Radioelektronika. Telekommunikatsii*, 2015, no. 5, pp. 198–202. (In Russ.)
7. Glushchenko A.G., Glushchenko E.P., Ustinova E.S. Features of wave reflection in nonreciprocal structures. *Fizika i tehnicheckie prilozhenija volnovykh protsessov, FiTPVP: mat. XIV Mezhd. nauch.-tehn. konf.*, 2016, 316 p. (In Russ.)

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2021, vol. 24, no. 2, pp. 73–78

DOI 10.18469/1810-3189.2021.24.2.73-78

Received 12 May 2021
Accepted 15 June 2021

Reflection of waves from a mobile elastic layer in a multimode waveguide

Elena S. Ustinova¹ , Vladimir I. Volovach¹ ,
Tatyana A. Antipova² , Kaira A. Adishirin-Zade² 

¹ Volga Region State University of Service
4, Gagarina Street,
Togliatti, Samara obl., 445017, Russia

² Samara State Medical University
89, Chapayevskaya Street,
Samara, 443099, Russia

Abstract – Waveguide structures are used to transmit energy and information signals in a wide range of wavelengths and, in terms of wave-guiding physical properties, usually have mutual (identical) properties in forward and backward directions. The asymmetry of the structure and external influences can often cause non-reciprocity of structures for waves, propagating in mutually opposite directions (this property, although limited, is already used in the so-called nonreciprocal devices of microwave, EHF and optical ranges such as ferrite valves, circulators, phase shifters). At the same time, the nonreciprocal properties of wave-guiding structures, independent of their physical nature, were not considered. It is found, that the motion of the medium filling the acoustic waveguide leads to nonreciprocity of its parameters in the forward and backward directions. The degree of nonreciprocity is proportional to the velocity of the medium. The velocity of the medium also affects the propagation velocity of acoustic waves and leads to a change in the critical frequencies or critical wavelengths of the waveguide modes. As the velocity of the medium increases, the number of modes for which the propagation condition is satisfied increases as well.

Keywords – structure asymmetry; waveguide structures; waveguides; motion of media; elastic waves.

Информация об авторах

Устинова Елена Сергеевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационного и электронного сервиса Поволжского государственного университета сервиса, г. Тольятти, Самарская обл., Россия.

Область научных интересов: волновые процессы в невязимных волноводных и резонансных структурах.

E-mail: nik-098@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2207-111X>

Воловач Владимир Иванович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационного и электронного сервиса Поволжского государственного университета сервиса, г. Тольятти, Самарская обл., Россия.

Область научных интересов: радиотехнические системы и устройства ближнего действия, информационно-измерительные системы, сети передачи данных.

E-mail: volovach.vi@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0201-2545>

Антипова Татьяна Александровна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры медицинской физики, математики и информатики Самарского государственного медицинского университета, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: биофизика, радиофизика.

E-mail: antipovata81@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5499-2170>

Адыширин-Заде Каира Алимовна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры медицинской физики, математики и информатики Самарского государственного медицинского университета, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: физика, педагогика.

E-mail: adysirinzade67@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3641-3678>

Information about the Authors

Elena S. Ustinova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor of the Department of Information and Electronic Service, Volga Region State University of Service, Togliatti, Samara region, Russia.

Research interests: wave processes in nonreciprocal waveguide and resonant structures.

E-mail: nik-098@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2207-111X>

Vladimir I. Volovach, Doctor of Technical Sciences, associate professor, head of the Department of Information and Electronic Service, Volga Region State University of Service, Togliatti, Samara region, Russia.

Research interests: radio engineering systems and short-range devices, information-measuring systems, data transmission networks.

E-mail: volovach.vi@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0201-2545>

Tatyana A. Antipova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, associate professor of the Department of Medical Physics, Mathematics and Informatics, Samara State Medical University, Samara, Russia.

Research interests: biophysics, radiophysics.

E-mail: antipovata81@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5499-2170>

Kaira A. Adishirin-Zade, Candidate of Pedagogical Sciences, associate professor of the Department of Medical Physics, Mathematics and Informatics, Samara State Medical University, Samara, Russia.

Research interests: physics, pedagogy.

E-mail: adysirinzade67@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3641-3678>