УДК 534.27

А. И. Лутовинов, А. Н. Перегудов, М. М. Шевелько

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ. ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Рассмотрены теоретические основы возбуждения акустических волн круговой поляризации. Предложена конструкция преобразователя циркулярно поляризованных волн. В ходе экспериментальных исследований созданного устройства получены качественные результаты, свидетельствующие о круговом характере движения частиц в волне, излученной преобразователем предложенной конструкции.

Ультразвуковой преобразователь, объемные волны, круговая поляризация, циркулярно поляризованная акустическая волна

В теории электромагнитного поля хорошо известны волны, конец поляризационного вектора которых описывает в плоскости, поперечной направлению распространения, эллипс или, как частный случай, окружность. Последние получили название циркулярно поляризованных волн. Способы их возбуждения и приема известны и описаны в соответствующей литературе. Линейно-поляризованная поперечная волна может быть описана как суперпозиция двух циркулярно поляризованных волн с одинаковыми волновыми векторами и амплитудами. В изотропной среде проекции векторов поля этих двух волн на плоскость поляризации изменяются синфазно, и их сумма равна вектору поля суммарной линейно-поляризованной волны. Если фазовые скорости циркулярно поляризованных волн в среде различны (циркулярная анизотропия среды), то одна из волн отстает от другой, что приводит к появлению разности фаз между колебаниями указанных проекций на выбранную плоскость. Эта разность фаз изменяется при распространении волны (в однородной среде – линейно растёт). Для электромагнитных колебаний такая среда называется оптически активной или гиротропной. Что же касается упругих колебаний, то в твердых изотропных средах и в отдельных направлениях кристаллических сред (так называемые акустические оси) помимо продольных и сдвиговых волн могут распространяться акустические волны, траектория движения частиц в которых представляет собой эллипс или, как частный случай, окружность. Последние по аналогии получили название циркулярно поляризованных волн или акустических волн круговой поляризации. Однако в отличие от области электромаг-

нитных колебаний в акустике вопрос возбуждения такого типа волн не освещен, а современные исследования данной темы отсутствуют. В первую очередь это связано с тем, что отсутствовала необходимость использования акустических волн круговой поляризации.

На кафедре электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ» была показана возможность применения особенностей распространения акустических волн для построения чувствительных элементов датчиков параметров движения [1]–[8]. Как показали исследования, для этих целей, в том числе, могут быть использованы волны круговой поляризации. Авторами была предложена схема чувствительного элемента на основе циркулярно поляризованных акустических волн. Так возникла необходимость разработки ультразвукового преобразователя для возбуждения волн круговой поляризации.

Анализ литературы [9] показывает, что циркулярно поляризованная акустическая волна может быть получена за счет интерференции двух чисто сдвиговых волн ортогональной поляризации с разностью фаз, равной четверти периода колебаний. Этот процесс имеет место для определенных осей анизотропных сред, в которых сдвиговые волны, имеющие ортогональную поляризацию, распространяются с разными скоростями. При этом излученная плоскополяризованная сдвиговая волна *1* по мере распространения в среде *3* трансформируется в эллиптически-поляризованную, затем в волну, поляризованную по кругу, и далее в обратной последовательности (рис. 1, *а*).

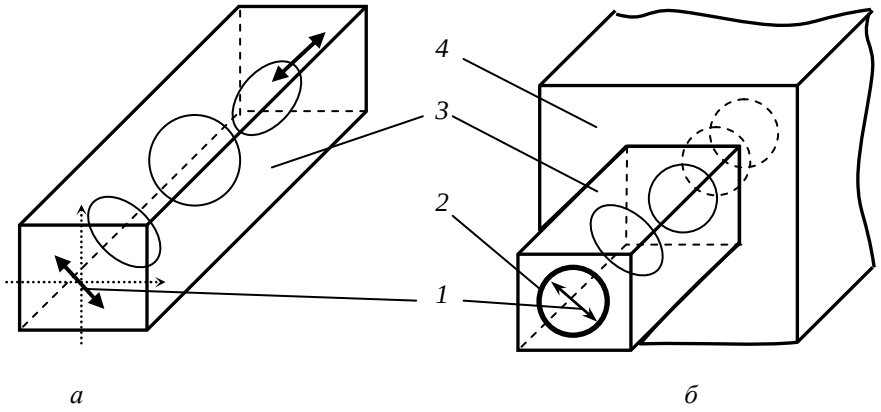

Рис. 1

На основе данного эффекта возможно построение излучателя циркулярно поляризованных волн. Для этого на одной из граней буферного стержня *3* (рис. 1, *б*), выполненного из такого материала, необходимо возбудить поперечные колебания линейной поляризации *1* с помощью пьезопластины *2*, ориентированные под некоторым углом по отношению к поляризациям базовых поперечных волн. По мере распространения волны будет происходить изменение вида ее поляризации, и на некотором расстоянии волна приобретет круговую поляризацию. Если в этом месте сделать противоположную грань буферного стержня, то траектория частиц на его поверхности будет представлять окружность. Если приводить в акустический контакт эту грань со звукопроводом *4*, то в последнем будет формироваться волна с круговой поляризацией. Однако реализованная на данном эффекте конструкция обладает недостатками, в частности, большими габаритами.

Авторами предложен другой способ построения преобразователя, позволяющего непосредственно излучать циркулярно поляризованные волны (рис. 2). На рисунке две пьезоэлектрические пластины *1* и *2* находятся в акустическом контакте друг с другом. Пластина *1* совершает сдвиговые колебания в направлении оси *X*, тем самым возбуждая поперечные колебания в указанном направлении (на рисунке отмечены вертикальной стрелкой). Аналогично пьезопластина *2* возбуждает сдвиговые колебания в перпендикулярном направлении *Z*. Внешние грани обеих пластин акустически соединены со звукопроводами *3*.

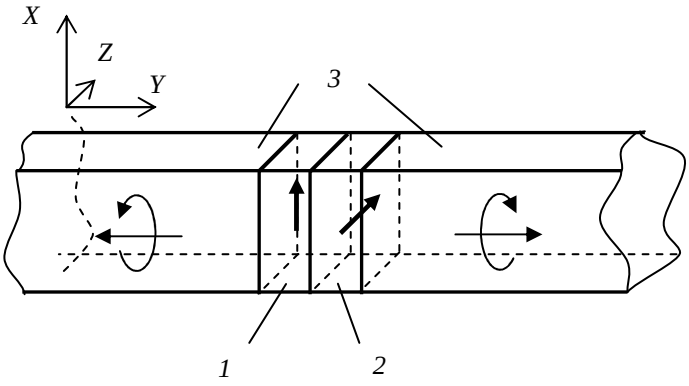

Рис. 2

Таким образом, поляризации излучаемых в звукопровод ультразвуковых волн ортогональны друг другу. Толщины пьезопластин подобраны таким образом, что волна в каждой из них проходит четверть периода колебаний. На заданной частоте это обеспечивает сложение волн ортогональной поляризации в момент времени, когда разность их фаз равна $\pi/2$. Суммарная волна, имеющая круговую поляризацию, распространяется в материале звукопроводов. В силу симметрии конструкции излучение осуществляется обеими наружными поверхностями пьезопластин.

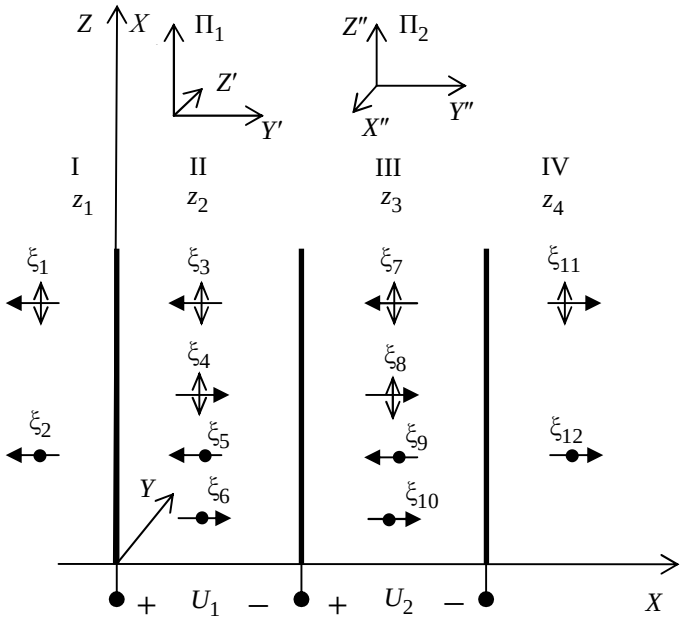

Рис. 3

Работа такой конструкции анализировалась теоретически. Для этого была решена задача распространения двух типов поперечных волн: с поляризацией по оси X и с поляризацией по оси Z – в многослойной системе, представляющей собой акустически соединенные пьезопластины, внешние грани которых находятся в контакте с материалом звукопроводов (рис. 3).

На рис. 3 представлена система, состоящая из четырех слоев I–IV, где I и IV представляют собой изотропные звукопроводы с акустическими сопротивлениями z_1, z_4; II и III – пьезопластины Π_1 и Π_2 с акустическими сопротивлениями z_2, z_3. На рисунке обозначены: ξ_1–ξ_{12} – волны, распространяющиеся в этих средах, причем горизонтальной стрелкой показано направление распространения волны, а вертикальной и точкой – направление поляризации (смещения частиц среды): вдоль осей Z и X соответственно; U_1, U_2 – электрические напряжения, подводимые к электродам, нанесенным на пьезоэлектрические пластины.

Распространение волн внутри каждого элемента описывается одномерным уравнением, решение которого в общем случае представляет собой совокупность двух волн, движущихся навстречу друг другу. Их можно записать в виде

$$\xi_i = \xi_{i,0} \cdot \exp[\, j(\omega t \pm k_i x)], \tag{1}$$

где $\xi_{i,0}$ – неизвестные амплитуды смещения в волнах; ωt – временной набег фазы; k_i – волновой вектор волны. Для нахождения неизвестных компонент $\xi_{i,0}$ была составлена система граничных условий, которые заключаются в непрерывности векторов смещений на границе слоев и равенстве нормальных компонент напряжений:

$$\begin{aligned}
&\xi_1|_{x=0} = \xi_3 + \xi_4|_{x=0}; && \sigma_{12}^{\mathrm{I}}|_{x=0} = \sigma_{12}^{\mathrm{II}}|_{x=0};\\
&\xi_2|_{x=0} = \xi_5 + \xi_6|_{x=0}; && \sigma_{13}^{\mathrm{I}}|_{x=0} = \sigma_{13}^{\mathrm{II}}|_{x=0};\\
&\xi_3 + \xi_4|_{x=d_1} = \xi_7 + \xi_8|_{x=d_1}; && \sigma_{12}^{\mathrm{II}}|_{x=d_1} = \sigma_{12}^{\mathrm{III}}|_{x=d_1};\\
&\xi_5 + \xi_6|_{x=d_1} = \xi_9 + \xi_{10}|_{x=d_1}; && \sigma_{13}^{\mathrm{II}}|_{x=d_1} = \sigma_{13}^{\mathrm{III}}|_{x=d_1};\\
&\xi_7 + \xi_8|_{x=d_1+d_2} = \xi_{11}|_{x=d_1+d_2}; && \sigma_{12}^{\mathrm{III}}|_{x=d_1+d_2} = \sigma_{12}^{\mathrm{IV}}|_{x=d_1+d_2};\\
&\xi_9 + \xi_{10}|_{x=d_1+d_2} = \xi_{12}|_{x=d_1+d_2}; && \sigma_{13}^{\mathrm{III}}|_{x=d_1+d_2} = \sigma_{13}^{\mathrm{IV}}|_{x=d_1+d_2}.
\end{aligned} \tag{2}$$

Механическое напряженное состояние изотропной среды определяется как

$$\sigma_{ij} = (\lambda + 2\mu)\frac{\partial \xi_i}{\partial x_j}, \tag{3}$$

где λ и μ – упругие постоянные Ламэ.

Механическое напряжение пьезоэлектрической среды и вектор электрической индукции в этой среде описываются системой уравнений пьезоэффекта, которые в матричной записи имеют вид

$$\begin{cases} \sigma_j = C_{jq}^E u_q - e_{jk} E_k; \\ D_i = e_{iq} u_q + \varepsilon_{ik}^u E_k, \end{cases} \tag{4}$$

где σ_j – компоненты механических напряжений; C_{jq}^{E} – модули упругости среды при постоянном электрическом поле; u_q – компоненты упругих деформаций; e_{jk} – пьезопостоянные среды; E_k – компоненты вектора напряженности электрического поля; $\varepsilon_{ik}^{u} = \varepsilon_0(\varepsilon_{ik}^{u})'$ – компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды при постоянной деформации (ε_0 – диэлектрическая постоянная; $(\varepsilon_{ik}^{u})'$ – относительные значения компонентов).

Компоненты u_q и E_k могут быть выражены через искомые амплитуды волн. Если подставить (1), (3), (4) в (2), получим систему из двенадцати уравнений относительно двенадцати неизвестных амплитуд волн. В случае использования пьезокварца необходимо учитывать продольную составляющую, связанную с анизотропией материала. Решение системы уравнений позволило получить характеристики движения частиц, находящихся на поверхности пьезопластин. На рис. 4 представлена траектория движения частиц для случая равных приложенных напряжений $U_1 = U_2$, в качестве звукопроводов использован плавленый кварц ($z_1 = z_4$).

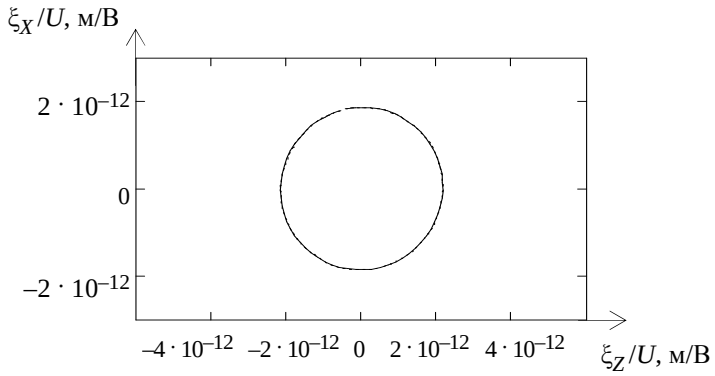

Рис. 4

Согласно расчетам направления вращения частиц для волн, распространяющихся в противоположных направлениях, различны. Важным замечанием является то, что акустические сопротивления звукопроводов ρc, являющиеся нагрузками на преобразователь, должны быть равны.

Для проверки того, что излученная преобразователем такой конструкции волна имеет круговую поляризацию, были проведены экспериментальные исследования. Прием производился с противоположного торца звукопровода пьезопластиной, реагирующей только на линейно-поляризованные волны, через буферный стержень. Отсутствие зависимости амплитуды принятого сигнала от ориентации приемной пластины является свидетельством того, что принимаемая акустическая волна является волной с круговой поляризацией.

Для реализации поставленной задачи была собрана установка, схема которой представлена на рис. 5.

Внешний вид звукопроводов, акустически соединенных с пьезоэлектрическими пластинами, а также экспериментальной установки в целом представлен на рис. 6.

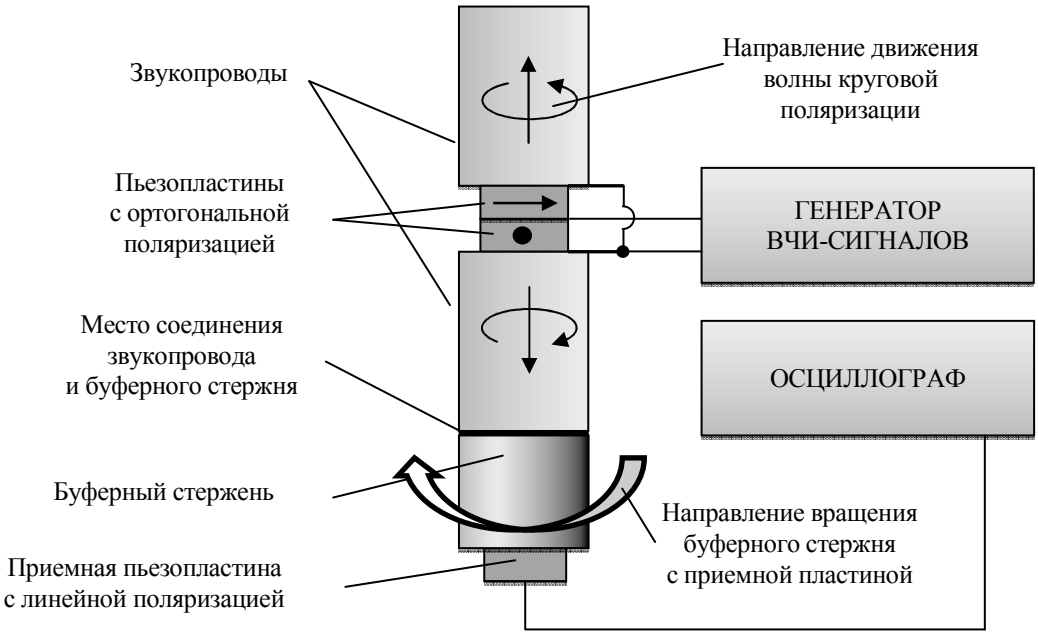

Рис. 5

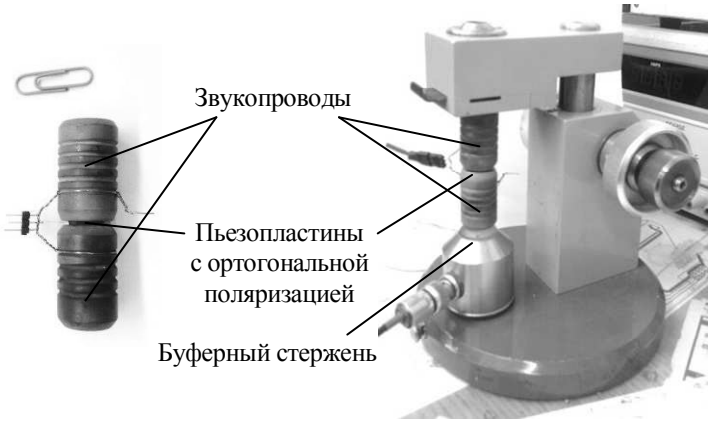

Рис. 6

Так как положение приемной пластины необходимо менять во время эксперимента, в качестве контакного вещества была выбрана эпоксидная смола без отвердителя, физические свойства которой позволяют передавать сдвиговые колебания.

В ходе эксперимента определялась зависимость амплитуды принятого сигнала от угла поворота приемной пьезопластины в диапазоне углов 0…360° по отношению к исходному направлению ориентации, принятому за 0, на внешних торцах обоих звукопроводов (рис. 7). Треугольниками отмечены экспериментальные точки. Длина радиуса-вектора соответствует амплитуде принятого сигнала при соответствующем угле.

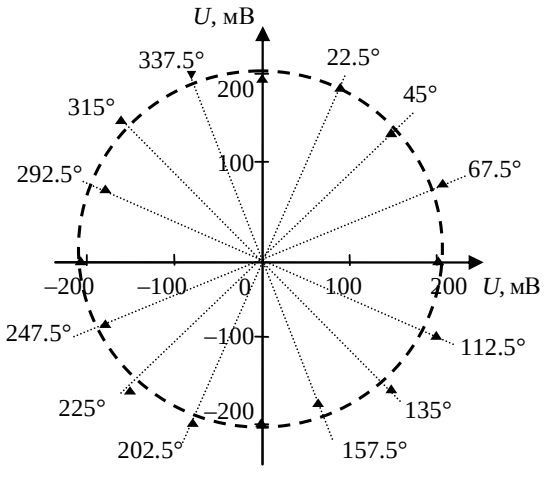

Рис. 7

Снятое угловое распределение амплитуды представляет собой окружность. Полученное отклонение от правильной окружности может быть связано с изменением качества акустического контакта при проведении измерений. В целом полученный результат свидетельствует том, что характер движения частиц среды в излученной волне близок к круговому. Таким образом, проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали возможность излучения циркулярно поляризованных волн с помощью преобразователя предложенной конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2392625 Российская Федерация. Способ измерения угловой скорости / Е. С. Грибкова, Д. П. Лукьянов, А. Н. Перегудов, М. М. Шевелько.
2. Пат. 2397445 Российская Федерация. Чувствительный элемент гироскопа / Е. С. Грибкова, Д. П. Лукьянов, А. Н. Перегудов, М. М. Шевелько.
3. Пат. 2426132 Российская Федерация. Способ и устройство для измерения угловой скорости / Е. С. Грибкова, Д. П. Лукьянов, А. Н. Перегудов, М. М. Шевелько, С. Ю. Шевченко.
4. Пат. 2457436 Российская Федерация. Устройство для измерения угловой скорости / Е. С. Грибкова, А. Н. Перегудов, А. А. Поженская, М. М. Шевелько.
5. Пат. 2460078 Российская Федерация. Способ измерения угловой скорости / Е. С. Грибкова, А. Н. Перегудов, А. А. Поженская, М. М. Шевелько.
6. Грибкова Е. С., Перегудов А. Н., Шевелько М. М. Особенности распространения объемных акустических волн во вращающихся твердых средах // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2009. № 1. С. 53–59.
7. Gribkova E., Peregudov A., Shevelko M. Theoretical and Experimental Researches of Bulk Acoustic Wave's Availability in Angular Motion Sensors (Теоретические и экспериментальные исследования возможности применения объемных акустических волн в сенсорах углового движения) // Proceedings of the IEEE Russia. NorthWestsection. 2011. Vol. 1. P. 69–72.
8. Исследование возможности использования акустических волн в датчиках вращения / Е. С. Грибкова, А. А. Поженская, А. И. Лутовинов, С. А. Похоруков, А. Н. Перегудов, М. М. Шевелько // Сб. докл. 65-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб., 2012. С. 184–187.
9. Лямов В. Е. Поляризационные эффекты и анизотропия взаимодействия акустических волн в кристаллах. М: Изд-во Моск. ун-та, 1983.

A. I. Lutovinov, A. N. Peregudov, M. M. Shevelko

ULTRASONIC CIRCULAR POLARIZED WAVE TRANSDUCER. THEORY AND EXPERIMENT

The theoretical basis of circular polarized acoustic waves excitation is considered. The new design of circular polarized wave sensor is proposed. In device experimental researches qualitative results are obtained, which show the nature of the particles circular motion in the wave emitted by the proposed design transmitter.

Ultrasonic transducer, bulk waves, circular polarization, circularly polarized acoustic wave

УДК 004.358

М. С. Коровина

ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЕ МЭМС-ДАТЧИКИ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО САМОХОДНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Рассмотрены вопросы применения трехкомпонентных МЭМС-датчиков для диагностики технического состояния металлоконструкций специального самоходного подвижного состава. Произведено виртуальное моделирование поведения исследуемой конструкции под воздействием внешних нагрузок с помощью расчетного модуля Simulation в программной среде SolidWorks с целью определения наиболее оптимальных мест установки датчиков.

МЭМС-датчики, программная среда SolidWorks, мониторинг технического состояния, частотный анализ

Мониторинг технического состояния специального самоходного подвижного состава (ССПС) является необходимым условием обеспечения безопасности движения поездов.