

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКИХ, ОПТИЧЕСКИХ И РАДИОВОЛН MEASURING SYSTEMS AND INSTRUMENTS BASED ON ACOUSTIC, OPTICAL AND RADIO WAVES

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-1-56-65>

УДК 534.27

Я. Дурукан[✉], А. Н. Перегудов, М. М. Шевелько

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)
ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия

АНАЛИЗ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА ДАТЧИКА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ¹

Аннотация. Изменение характеристик ультразвуковых волн, распространяющихся в твердых вращающихся средах, лежит в основе функционирования акустических датчиков угловой скорости. Уровень информативного сигнала зависит от коэффициента передачи акустического тракта чувствительного элемента (ЧЭ) датчика такого типа, в связи с чем актуальны работы по достижению максимального коэффициента. Акустический тракт ЧЭ на объемных волнах состоит из излучающего и приемного пластинчатых пьезопреобразователей, среды распространения (звукопровода), контактных слоев и электрической нагрузки. Он идентичен тракту ультразвуковых линий задержки. Теоретический анализ характеристик трактов такого типа широко представлен в литературе, однако анализ базируется на решении систем волновых уравнений в одномерном приближении. В этом случае расчеты выполняются без учета ограниченности поперечных размеров. На практике тракт ЧЭ должен иметь ограниченные поперечные размеры, которые могут повлиять на значение коэффициента передачи. Описания экспериментальных исследований в литературе не приводятся. Таким образом, потребовалось провести комплекс теоретических и экспериментальных исследований по анализу коэффициента передачи акустического тракта датчика угловой скорости. Для теоретического анализа разработана моделирующая тракт программа в системе Mathcad. Для экспериментальных исследований создана установка и изготовлен ряд макетов с преобразователями из пьезокварца и пьезокерамики. В результате показано, что теоретические положения, разработанные для одномерного приближения, могут применяться для определения коэффициента передачи акустического тракта ограниченных размеров. Кроме того, использование согласованной электрической нагрузки позволяет увеличить коэффициент передачи. Например, для макета с преобразователями из пьезокварца Y-среза это увеличение составило 20 дБ.

Ключевые слова: ультразвуковые волны, акустический тракт, коэффициент передачи, датчик угловой скорости

Для цитирования: Дурукан Я., Перегудов А. Н., Шевелько М. М. Анализ коэффициента передачи акустического тракта датчика угловой скорости // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 1. С. 56–65.

doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-1-56-65

Yasemin Durukan[✉], Alexander N. Peregudov, Michael M. Shevelko

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
5, Professor Popov Str., 197376, St. Petersburg, Russia

ANALYSIS OF ACOUSTIC PATH TRANSMISSION FACTOR FOR ANGULAR VELOCITY SENSOR

Abstract. The change in characteristics of ultrasonic waves' transmission in solid rotating media is the basis for the operation of acoustic angular velocity sensor. The transmission coefficient of the sensing element (SE) of the acoustic path de-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации НШ-4165.2018.8.

termines the level of angular velocity sensor informative signal based on detecting changes in characteristics of bulk acoustic waves in solid media. In this regard, the efforts aimed at obtaining maximum transmission coefficient are relevant and represent an important stage in the design of such devices. The sensitive element of the acoustic path consists of radiating and receiving plate piezoelectric transducers, propagation medium (acoustic duct), contact layers and electrical load. The coefficient is identical to the path of ultrasonic delay lines on bulk acoustic waves. Although, many sources present the theoretical analysis of the path of this type, they carry out the analysis in so-called one-dimensional approximation, i.e. they perform the analysis without taking into account the limited transverse dimensions, whereas the path of the sensing element should have limited lateral dimensions, which can affect the value of transmission coefficient. The above-mentioned sources do not present the results of experiments. Thus, it is necessary to conduct a complex of simulation and experiments to analyze the acoustic path transmission coefficient of the angular velocity sensor. Authors of the paper developed a path-modeling program in Mathcad software to perform simulation. For implementation of the experiment, authors created the installation, as well as a number of proto-types with transducers made of piezoelectric quartz and piezoelectric ceramics. The results demonstrate that fundamental statements developed for one-dimensional approximation one can use to determine the transmission coefficient of the acoustic path with limited dimensions. Besides, the use of the matched electrical load gives the opportunity to increase the transmission coefficient. For example, in case of Y-cut piezoelectric quartz converter prototype the increase reached 20 dB.

Key words: ultrasound waves, acoustic path, transmission factor, angular velocity sensor

For citation: Durukan Ya., Peregudov A. N., Shevelko M. M. Analysis of Acoustic Path Transmission Factor for Angular Velocity Sensor. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 1, pp. 56–65. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-1-56-65 (In Russian)

Введение. Исследование возможности использования особенностей распространения объемных акустических волн (ОАВ) во вращающейся твердой среде для создания датчиков угловой скорости (ДУС) представляет интерес как в теоретическом [1]–[4], так и в практическом плане [5]–[7].

В рамках работ, проводимых на кафедре электроакустики и ультразвуковой техники (ЭУТ) Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (СПбГЭТУ) "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), был предложен ряд концепций построения ДУС на ОАВ [5]–[7]. Чувствительный элемент (ЧЭ) (рис. 1) датчика представляет собой твердотельный звукопровод 3, на противоположных торцах которого расположены излучающая пьезопластина ИП и приемная пьезопластина ПП ультразвуковых колебаний с толщинами $d_{И}$ и $d_{П}$ соответственно. Для обеспечения передачи этих колебаний между ИП и 3; 3 и ПП расположены контактные слои КС.

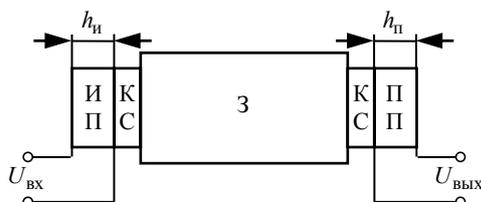


Рис. 1. Схема чувствительного элемента
Fig. 1. Sensing Element Diagram

Информативный выходной сигнал ДУС вне зависимости от предлагаемых концепций определяется следующим соотношением:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} K_{\Gamma} K_{\text{ак}} \Omega,$$

где $U_{\text{ВХ}}$ – напряжение, подаваемое на ИП; K_{Γ} – коэффициент передачи гироскопической составляющей, определяемый концепцией построения датчика [6]; $K_{\text{ак}}$ – коэффициент передачи акустического тракта датчика; Ω – угловая скорость вращения ЧЭ.

$K_{\text{ак}}$ во многом определяется свойствами конструктивных элементов ЧЭ: материалами и значением резонансных частот преобразователей, материалом и толщинами КС, а также параметрами электрической нагрузки. Таким образом, исследования по оптимизации конструкции акустического тракта, обеспечивающей максимальный коэффициент передачи, представляют неотъемлемую часть работ по созданию рассматриваемого типа ДУС. Для излучения и приема ультразвуковых волн в мегагерцевом частотном диапазоне применение нашли пьезоэлектрические пластинчатые преобразователи. Преобразователи такого типа широко используются в дефектоскопии, ультразвуковой толщинометрии, структурометрии, медицинской диагностике, исследованиях физико-химических свойств материалов, а также в устройствах акустоэлектроники [8]. Система акустического тракта ДУС аналогична тракту ультразвуковых линий задержки (УЛЗ).

Работы по анализу факторов, влияющих на коэффициент передачи акустического тракта, проводились на кафедре ЭУТ СПбГЭТУ "ЛЭТИ" на протяжении долгого времени [9]–[16]. Основной целью исследований была оптимизация кон-

структивных элементов преобразователя с учетом влияния КС и электрических цепей на коэффициент передачи. Выполненные работы относятся как к области дефектоскопии [9]–[11], так и к задачам оптимизации конструкции УЛЗ [12]–[16]. В [9] впервые были получены выражения, описывающие коэффициент передачи для многослойного преобразователя, состоящего из пьезопластины, демпфера и ряда согласующих слоев. Важно отметить, что теоретические соотношения были получены для так называемого одномерного приближения, т. е. без учета ограниченности поперечных размеров среды распространения и преобразователей. В [10] описана возможность построения согласованного пьезокерамического преобразователя, чувствительность которого не зависит от толщины КС. Как показывают результаты численных расчетов и выполненных экспериментов, чувствительность ПП из пьезокерамики в 20 раз выше, чем у кварцевого преобразователя.

Полоса пропускания УЛЗ исследована в [12], где решена задача обеспечения равномерности частотной характеристики и малого акустического поглощения в звукопроводе. В работе отмечено, что при наличии КС максимум коэффициента передачи лежит выше антирезонансной частоты пьезокварцевого преобразователя X-среза. В этой же работе исследовано влияние электрической нагрузки в виде электрического колебательного контура на значение полосы пропускания. Показано, что при отсутствии КС резонансные свойства колебательного контура проявляются максимально. При толщине КС, составляющей 0.02 толщин ИП и ПП, частотная зависимость $K_{ак}(f)$ имеет два максимума, а полоса пропускания заметно увеличивается. Резонансные свойства контура в этом случае менее выражены. Дальнейшее увеличение толщины КС нецелесообразно, поскольку резонансные свойства контура сказываются слабее, более заметно проявляется эффект механического резонанса в системе "пьезопластина–КС". Аналогичные вопросы рассмотрены в [12], [14] для ИП Y-среза. Полученные результаты согласуются с ранее проведенным исследованием. В [14] описана вся система волн в пьезопластинах, КС и З в режимах излучения и приема. Анализ колебательных систем пьезоэлектрических преобразователей ультразвуковых дефектоскопов, а также основные соотношения, необходимые для расчета и проектирования колебательных систем таких преобразователей, приводятся в [16].

Большое количество работ, посвященных получению оптимальных характеристик акустического тракта, подтверждают актуальность проводимых исследований. Однако следует отметить, что:

1. Используемые для анализа акустического тракта соотношения были получены для так называемого одномерного приближения, т. е. без учета ограниченности поперечных размеров среды распространения и преобразователей, в то время как ЧЭ ДУС имеет ограниченные размеры.

2. В большинстве перечисленных работ представлены результаты теоретических исследований, не имеющие достоверного экспериментального подтверждения. В связи с этим наибольший интерес представляют собой данные, полученные в результате экспериментальных исследований, и условия, при которых они были получены.

3. Целью проводимого анализа для большинства случаев было достижение широкой полосы пропускания акустического тракта, что обуславливалось необходимостью использования коротких импульсов, обеспечивающих высокую разрешающую способность (преобразователи дефектоскопов), а также большую информационную емкость УЛЗ. В ДУС на ОАВ используется импульсный режим работы. Длительность импульса из условия отсутствия образования стоячих волн должна быть меньше удвоенного времени прохождения импульса по звукопроводу. Это допускает значительно большую длительность импульса и не предъявляет высоких требований к ширине полосы пропускания.

В связи с этим возникла необходимость проведения комплекса экспериментальных исследований по определению влияния конструктивных элементов акустического тракта ЧЭ ДУС на коэффициент передачи. Кроме того, изучение влияния ограниченности поперечных размеров акустического тракта на $K_{ак}$ проведено для оценки допустимости одномерного приближения. Исследования такого рода ранее не выполнялись, поскольку в области дефектоскопии среда распространения считается полубезграничной, ее размеры много больше длины ультразвуковой волны. Исходя из этого в серии проведенных авторами настоящей статьи экспериментов макеты имеют ограниченные размеры, приближающиеся к размерам ЧЭ проектируемых ДУС.

Теоретический анализ коэффициента передачи акустического тракта. Исследуемый тракт ДУС с ЧЭ представляет на рис. 2. На схеме наряду с ЧЭ указаны: R_T – выходное сопротивление

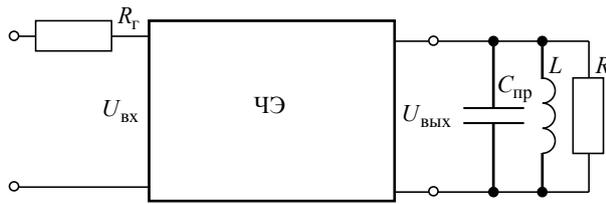


Рис. 2. Тракт датчика угловой скорости с чувствительным элементом
Fig. 2. The path of the angular velocity sensor with a sensitive element

ние генератора; $C_{\text{пр}}$ – емкость ПП и внешней электрической цепи; L – индуктивность внешней цепи; R – сопротивление нагрузки.

Коэффициент передачи рассматриваемой системы $K_{\text{ак}} = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$ есть многопараметрическая функция, поскольку зависит от ряда характеристик системы: толщин КС, резонансных частот ИП и ПП, добротности электрического контура на выходе, акустических импедансов входящих в систему материалов [16].

Для определения $K_{\text{ак}}$ введем обозначения акустических импедансов элементов ЧЭ $z_{\text{и}}$, $z_{\text{КС}}$, $z_{\text{з}}$ и $z_{\text{п}}$ для ИП, КС, З и ПП соответственно, а также акустические импедансы входного преобразователя электрической волны в акустическую $z_{0\text{и}} = z_{\text{и}} j \operatorname{tg} x_{\text{и}}$ и выходного преобразователя акустической волны в электрическую $z_{\text{п}0} = z_{\text{п}} j \operatorname{tg} x_{\text{п}}^2$. Распространение акустической волны по отдельным элементам ЧЭ опишем с вводом понятия акустических толщин этих элементов $x_{\text{и}} = k_{\text{а}} h_{\text{и}}$, $x_{\text{КС}} = k_{\text{КС}} h_{\text{КС}}$ и $x_{\text{п}} = k_{\text{п}} h_{\text{п}}$ для И, КС и П соответственно ($k_{\text{л}} = 2\pi f/c_{\text{л}}$, $\text{I} \in \{\text{и}, \text{КС}, \text{п}\}$ – волновые числа; $c_{\text{л}}$ – скорости акустической волны). Также введем понятия отношений импедансов $\alpha_{\text{л}|\text{п}} = z_{\text{л}}/z_{\text{п}}$, $\text{I}, \text{п} \in \{0, \text{и}, \text{КС}, \text{з}, \text{п}\}$.

$K_{\text{ак}}$ определяется произведением коэффициентов преобразования амплитуды электрической волны в амплитуду ультразвуковой в режиме излучения $K_{\text{и}}$ и обратного преобразования в режиме приема $K_{\text{п}}$ при условии равенства амплитуд смещения (колебательной скорости) волн на границах ИП и ПП:

$$K(f) = K_{\text{и}} K_{\text{п}} =$$

$$= \frac{2C_{\text{пр}} f_{\text{а.и}}}{Y + j2\pi f C_{\text{пр}}} \frac{2k_{\text{св.и}}^2 k_{\text{св.п}}^2 z_{\text{п}}}{z_{\text{з}}} \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{и}} \rho_{\text{и}}}{\varepsilon_{\text{п}} \rho_{\text{п}}}} F_{\text{и}}(x_{\text{и}}) F_{\text{п}}(x_{\text{п}}),$$

где f – частота ультразвуковых колебаний; $f_{\text{а.и}}$ – частота антирезонанса ИП; Y – проводимость нагрузки, представленной колебательным контуром $C_{\text{пр}}L$; $k_{\text{св.и}}$, $k_{\text{св.п}}$ – коэффициенты электромеханической связи ИП и ПП соответственно; $\varepsilon_{\text{и}}$, $\varepsilon_{\text{п}}$ – диэлектрические проницаемости материалов ИП и ПП соответственно; $\rho_{\text{и}}$, $\rho_{\text{п}}$ – плотности материалов ИП и ПП соответственно; $F_{\text{и}}$, $F_{\text{п}}$ – частотно-зависимые части коэффициентов передачи ИП и ПП соответственно.

Частотно-зависимые части коэффициентов передачи излучения определяются по следующим формулам:

$$F_{\text{и}}(x_{\text{и}}) = [1 - \cos(x_{\text{и}}) - j\alpha_{0|\text{и}} \sin(x_{\text{и}})] / \Delta_{\text{и}};$$

$$F_{\text{п}}(x_{\text{п}}) = [1 - \cos(x_{\text{п}}) - j\alpha_{\text{п}0} \sin(x_{\text{п}})] / \Delta_{\text{п}}.$$

Знаменатели определяются как

$$\Delta_{\text{и}} = Q \cos(x_{\text{и}}) + jR_1 \sin(x_{\text{и}}) - j(k_{\text{св.и}}^2/x_{\text{и}}) \{2R_0 [1 - \cos(x_{\text{и}})] - jQ \sin(x_{\text{и}})\};$$

$$\Delta_{\text{п}} = Q \cos(x_{\text{п}}) + jR_1 \sin(x_{\text{п}}) - j(k_{\text{св.п}}^2 B/x_{\text{п}}) \{2R_0 [1 - \cos(x_{\text{п}})] - jQ \sin(x_{\text{п}})\},$$

где

$$Q = (1 + \alpha_{0|\text{з}}) \cos(x_{\text{КС}}) + j(\alpha_{0|\text{КС}} + \alpha_{\text{КС}|\text{з}}) \sin(x_{\text{КС}});$$

$$R_1 = (\alpha_{0|\text{и}} + \alpha_{\text{и}|\text{з}}) \cos(x_{\text{КС}}) + j(\alpha_{\text{и}|\text{КС}} + \alpha_{0|\text{и}} \alpha_{\text{КС}|\text{з}}) \sin(x_{\text{КС}});$$

$$R_0 = \alpha_{\text{и}|\text{з}} \cos(x_{\text{КС}}) + j\alpha_{\text{и}|\text{КС}} \sin(x_{\text{КС}})$$

– коэффициенты, определяемые схемой тракта; $B = Y/(Y + j2\pi f C_{\text{пр}})$.

Для теоретического анализа разработана программа в системе MathCad. Программа позволяет анализировать работу акустического тракта в различных режимах работы ПП. Режим холостого хода обеспечивался равенством нулю проводимости внешней цепи Y . Режим нагрузки на резонансный контур создавался представлением проводимости Y в виде параллельного соединения $C_{\text{пр}}$ и L . Потери на дифракционное расхождение в теоретической модели не учитывались, поскольку ИП работает в ближней зоне.

² В силу узкополосности рассматриваемой задачи влияние демпферов и тыловых нагрузок указанных преобразователей [16] не учитывается.

Экспериментальные исследования. Структурная схема установки для экспериментального определения исследуемого коэффициента $K_{ак}$ представлена на рис. 3, где ГРИ – генератор радиоимпульсов; Щ1, Щ2 – осциллографические щупы (входная емкость 16 пФ, входное сопротивление 10 МОм); К1, К2 – сигнальные входы, Синхр – вход сигнала синхронизации. При проведении экспериментальных исследований использовался ГРИ АКИП 3402, осциллограф Tektronix TDS 1002 В. В качестве КС применялся салол, обеспечивающий возможность многократной переклейки пьезопреобразователей.

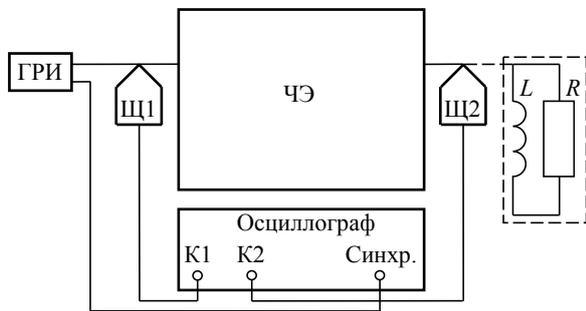


Рис. 3. Структурная схема установки для проведения эксперимента
Fig. 3. Test Facility Block Diagram

Для проведения экспериментальных исследований был изготовлен ряд идентичных звукопроводов из плавленного кварца, на базе которых создавались акустические тракты, параметры которых представлены в таблице.

Далее приведены результаты сравнительного анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований указанных макетов.

Макет 1. На рис. 4 представлены частотные зависимости $K_{ак}(f)$ первого макета в режиме холостого хода для нескольких значений толщины КС $d_{КС}$. Штриховая кривая получена в ходе проведения экспериментов³. Теоретический анализ показал, что изменение толщины КС в реально достижимых пределах приводит к изменению значения $K_{ак}$ в пределах 6 дБ. Наилучшая сходимость результатов расчета и эксперимента наблюдается при толщине КС $h_{КС} = 4$ мкм. На этом основании можно сделать вывод, что эквивалентная толщина КС исследованного экспериментального образца составляет 4 мкм.

Анализ работы этого макета в режиме нагрузки на колебательный контур с различными значениями индуктивности представлен на рис. 5. Черными кривыми показаны результаты теоретического анализа, серыми – результаты экспериментов.

Параметры макетов
Model Parameters

Размеры звукопровода Acoustic Duct Dimensions	Макет Model				
	1	2	3		
Длина, мм Length, mm	23				
Диаметр, мм Diameter, mm	20				
Параметр Parameter	ИП/ПП Radiating piezoplates/ receiving piezoplate	ИП Radiating piezoplates	ПП Receiving piezoplate	ИП Radiating piezoplates	ПП Receiving piezoplate
Материал Material	Пьезокварц Y-срез Piezokvarts Y-cut	Пьезокерамика ЦТС-19 Piezoceramics LZT-19			
Форма Form	Прямоугольная Rectangular	Круглая Round			
Длина и ширина, мм Length and width, mm	10×16	–	–	–	–
Диаметр, мм Diameter, mm	–	15.7	15.7	15	15
Толщина, мм Thickness, mm	0.6	0.95	1.0	0.32	0.32
Резонансная частота f_p , МГц Resonance Frequency f_p , MHz	3.25	2.0	1.94	5.9	6.25
Антирезонансная частота f_a , МГц Antiresonant Frequency f_a , MHz	3.26	2.33	2.17	7.00	7.3

³ Здесь и далее маркеры представляют результаты экспериментов.

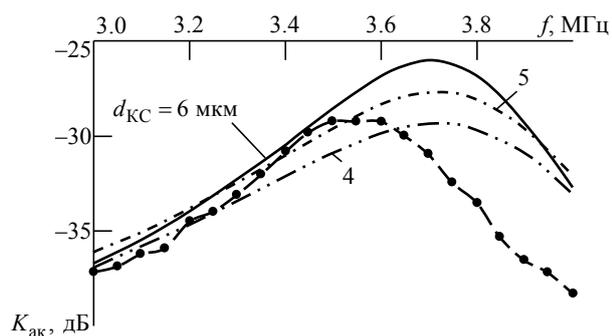


Рис. 4. Коэффициент передачи макета 1.
Режим холостого хода
Fig. 4. Model 1 Transfer Factor. Idle running

Макет 2. В макете использованы пластинчатые преобразователи из пьезокерамики ЦТС-19. Результаты исследований частотной характеристики второго макета в режиме холостого хода представлены на рис. 7 для нескольких значений толщины КС $d_{КС}$. Штриховая кривая получена в ходе проведения экспериментов. Из представленных зависимостей следует, что для этого макета не наблюдается столь существенного изменения коэффициента передачи при изменении толщины КС. Формы экспериментальной и теоретических кривых совпадают. Максимальное значение $K_{ак}$,

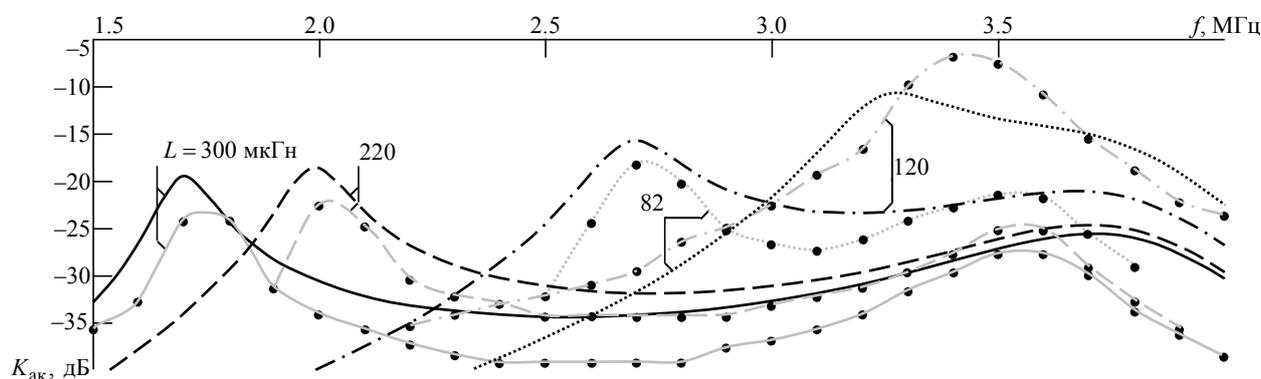


Рис. 5. Коэффициент передачи макета 1 в режиме нагрузки на колебательный контур
Fig. 5. Model 1 Transfer Factor. Electrical Oscillating Circuit Load Operation.

Кривые для $L = 300, 220$ и 120 мкГн имеют два максимума. Первый соответствует резонансной частоте электрического контура, второй – механической системы. При $L = 82$ мкГн наблюдается один резонанс, поскольку собственные частоты контура и ПП находятся близко. Максимальное значение коэффициента передачи составляет -6 дБ, что на 20 дБ выше, чем при отсутствии электрической нагрузки (рис. 4).

Поскольку емкость пьезокварцевой ПП незначительна, необходимо учитывать входную емкость щупа осциллографа $C_{щ} = 16$ пФ. Схема измерения резонансной частоты колебательного контура, образованного емкостью $C_{пр}$ с учетом $C_{щ}$ и катушкой индуктивности известного номинала представлена на рис. 6.

Для оценки параметров измерительного стенда определение общей емкости проводились при $R = 15$ кОм, $L = 82$ мкГн. Резонансная частота контура составила $f_p = 3.3$ МГц, откуда общая емкость имеет значение:

$$C_{общ} = \frac{1}{(2\pi f_p)^2 L} = 29 \text{ пФ.}$$

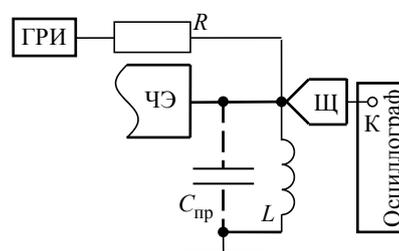


Рис. 6. Структурная схема установки для измерения резонансной частоты контура
Fig. 6. Circuit Resonance Frequency Measuring Set Block Diagram

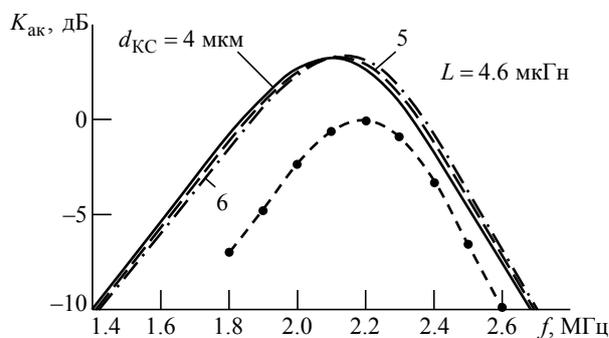


Рис. 7. Коэффициент передачи макета 2.
Режим холостого хода
Fig. 7. Model 2 Transfer Factor. Idle running

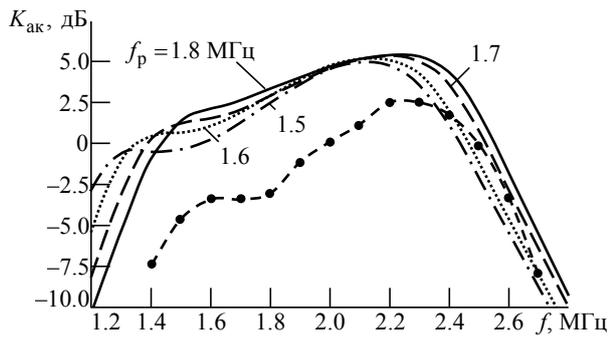


Рис. 8. Коэффициент передачи макета 2 в режиме нагрузки на колебательный контур
 Fig. 8. Model 2 Transfer Factor. Electrical Oscillating Circuit Load Operation

полученное в ходе проведения эксперимента, составило 0 дБ, что на 30 дБ больше, чем соответствующее значение для первого макета с преобразователями из пьезокварца (см. рис. 4).

На рис. 8 представлены результаты исследования влияния колебательного контура на $K_{ак}$. Кривые, представляющие результаты моделирования, построены при толщине КС 5 мкм для нескольких указанных значений резонансной частоты контура. Штриховая кривая построена по результатам эксперимента. Как видно из графиков, максимальное значение коэффициента передачи, полученное в ходе проведения эксперимента, составляет 3 дБ. Таким образом, для пьезокерамического преобразователя влияние электрической нагрузки на $K_{ак}$ не столь существенно. Кроме того, отличительной особенностью тракта с преобразователями из пьезокерамики служит появление провала на резонансной частоте колебательного контура [16].

Макет 3 содержит высокочастотные пластинчатые преобразователи из пьезокерамики ЦТС-19. На рис. 9 представлены полученные в результате теоретического исследования частотные зависимости $K_{ак}$ для толщин КС $h_{КС}$ в интервале 1...9 мкм. Штриховая кривая получена в ходе проведения эксперимента. Заметное отличие формы зависимости в этом случае объясняется возникновением колебательного контура, образованного паразитной индуктивностью электрических цепей и емкостью ПП.

Результаты исследований показывают, что для макета с преобразователями из пьезокварца Y-среза (макет 1) максимальное значение коэффициента передачи в режиме холостого хода составляет -30 дБ. Для макета с преобразователями из пьезокерами-

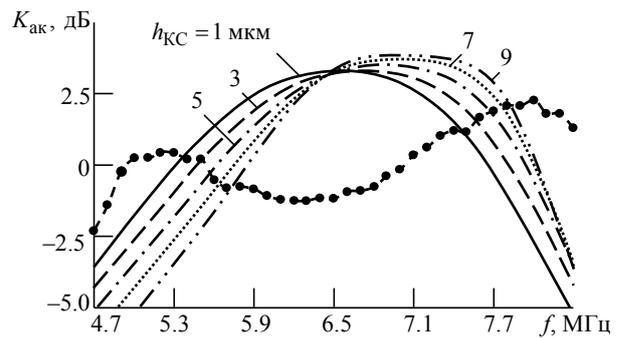


Рис. 9. Коэффициент передачи макета 3. Режим холостого хода
 Fig. 9. Model 3 Transfer Factor. Idle running

ки ЦТС-19 (макет 2) значение, полученное в ходе проведения аналогичного эксперимента, составляет 0 дБ. Указанные результаты экспериментов хорошо согласуются с результатами ранее проведенного моделирования [9]–[15]. Наличие колебательного контура, образованного емкостью ПП и индуктивностью внешней цепи, оказывает различное влияние на максимальное значение $K_{ак}$ для преобразователей из пьезокварца и пьезокерамики. Так, из сравнения экспериментальных зависимостей на рис. 4 и 5 следует, что для макета 1 применение контура с резонансной частотой, близкой к собственной резонансной частоте ПП, приводит к увеличению максимального значения $K_{ак}$ на 25 дБ. Для макета 2 наличие колебательного контура создает заметное уменьшение значения коэффициента передачи на резонансной частоте контура [16].

Для макета 1 также необходимо учитывать емкость электрических цепей, поскольку емкость пьезокварцевой пластины составляет десятки пикофарад при входной емкости осциллографического щупа $C_{щ} = 16$ пФ. В связи с этим при настройке колебательного контура необходимо учитывать общую емкость электрических цепей и ПП.

Для макета 3 с высокочастотными преобразователями из пьезокерамики ЦТС-19 в режиме холостого хода показано образование колебательного контура с резонансной частотой 6.5 МГц. Этот эффект обусловлен тем, что емкость ПП из пьезокерамики имеет значение порядка нескольких нанофарад. Поэтому для образования колебательного контура достаточно паразитной индуктивности внешних электрических цепей порядка десятых долей микрогенри. Этот отрицательный эффект необходимо учитывать при разработке

акустических трактов с высокочастотными преобразователями из пьезокерамики.

Кроме того, исследовано влияние неявно задаваемого параметра – толщины КС – на коэффициент передачи. Изменение $K_{ак}$ при варьировании толщины КС лежит в пределах 6 дБ для макета с пьезокварцевыми преобразователями и может быть учтено посредством построения семейства зависимостей при различных значениях толщины слоя. Для макета с пьезокерамическими преобразователями влиянием толщины КС на частотную зависимость коэффициента передачи можно пренебречь.

Заключение. В результате проведенного анализа показано, что разработанная для одномерного приближения теория может быть применена для расчета коэффициента передачи трактов, имеющих ограниченные поперечные размеры.

Различие экспериментальных и теоретических данных, обусловленное отличием расчетной модели от реальных параметров макета, незначительно с точки зрения характеристик макетов ДУС.

Выполненные исследования по определению конструкции акустического тракта, обеспечивающей максимальный $K_{ак}$, позволят разработать оптимальную конструкцию ЧЭ датчика угловой скорости на объемных акустических волнах. Несмотря на то, что эксперименты выполнялись на образцах ЧЭ конкретных размеров, полученные результаты могут быть перенесены на макеты существенно меньших размеров. При этом необходимо сохранить соотношения между габаритами ИП, З и ПП и длиной ультразвуковой волны, определяемой выбором диапазона рабочих частот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schoenberg M., Censor D. Elastic waves in rotating media // Quarterly of Applied Mathematics. 1973. Vol. 31, № 3. P. 115–125. doi: 10.1090/qam/99708
2. Сарапулов С. А., Улитко И. А. Влияние вращения на объемные волны в упругой среде и их использование в твердотельной гироскопии // Гироскопия и навигация. 2001. № 4. С. 64–72.
3. Destrade M., Saccomandi G. Some results on finite amplitude elastic waves propagating in rotating medium // Acta Mechanica. 2004. № 173. P. 19–31. doi: 10.1007/s00707-004-0185-x
4. Speed of longitude and transverse plane elastic waves in rotating and non-rotating anisotropic mediums / A. Khan, S. Islam, M. Khan, I. Siddiqui // World Applied Sciences J. 2011. Vol. 15, № 12. P. 1761–1769.
5. К вопросу о характеристиках волн, распространяющихся во вращающейся среде / Я. Дурукан, А. И. Лутовинов, А. Н. Перегудов, М. М. Шевелько // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2014. № 8. С. 57–61.
6. О возможности построения датчиков вращательного движения на объемных акустических волнах / Я. Дурукан, А. И. Лутовинов, А. Н. Перегудов, М. М. Шевелько // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2015. № 10. С. 69–73.
7. The characteristics of acoustic wave propagation in rotating solid-state media / Ya. Durukan, A. I. Lutovinov, A. N. Peregudov, E. S. Popkova, M. M. Shevelko // A Materials of the 2018 IEEE Conf. of Rus. Young Researchers in Electrical and Electronic Engin. (ElConRus), Saint Petersburg, Jan. 29 – Febr. 1, 2018. SPb.: SPbGETU "LETI" Publ. P. 461–464. doi: 10.1109/ElConRus.2018.8317131
8. Домаркас В. И., Кажис Р.-И. Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс: Минтис, 1974. 258 с.
9. Иванов В. Е., Меркулов Л. Г., Яблоник Л. М. Исследование пьезопреобразователя ультразвукового дефектоскопа // Заводская лаборатория. 1962. № 12. С. 1459–1464.
10. Меркулов Л. Г., Яблоник Л. М. Работа демпфированного пьезопреобразователя при наличии нескольких промежуточных слоев // Акустический журн. 1963. Т. 9, № 4. С. 449–459.
11. Яковлев Л. А. О возможности построения приближенно согласованного пьезокерамического преобразователя // Изв. ЛЭТИ. 1970. Вып. 89. С. 163–167.
12. Меркулов Л. Г., Федоров В. А., Яковлев Л. А. О полосе пропускания линии задержки с многократными отражениями // Изв. ЛЭТИ. 1971. Вып. 95. С. 17–22.
13. Меркулов Л. Г., Федоров В. А., Яковлев Л. А. Влияние электрической нагрузки на полосу пропускания линии задержки с многократными отражениями // Изв. ЛЭТИ. 1972. Вып. 112. С. 43–47.
14. Яблоник Л. М. К вопросу о влиянии электрической нагрузки на работу многослойного преобразователя // Акустический журн. 1964. Т. 10, № 2. С. 234–238.
15. Меркулов Л. Г., Федоров В. А., Яковлев Л. А. Работа пьезопреобразователя, нагруженного на твердую упруго-анизотропную среду // Акустический журн. 1973. Т. 19, № 1. С. 53–59.
16. Голубев А. С. Преобразователи ультразвуковых дефектоскопов / ЛЭТИ. Л., 1986. 80 с.

Статья поступила в редакцию 6 ноября 2018 г.

Статья принята к публикации 11 февраля 2019 г.

Дурукан Ясемин – магистр по направлению "Приборы и методы контроля качества и диагностики" (2017), ассистент и аспирантка кафедры электроакустики и ультразвуковой техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 10 научных работ. Сфера научных интересов – кристаллоакустика.
E-mail: durukanleti@gmail.com

Перегудов Александр Николаевич – кандидат технических наук (1986), доцент (2003) кафедры электроакустики и ультразвуковой техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – акустика твердого тела, ультразвуковые измерения, пластинчатые пьезопреобразователи.
E-mail: a_peregudov@mail.ru

Шевелько Михаил Михайлович – кандидат технических наук (1978), доцент (2003) кафедры электроакустики и ультразвуковой техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – акустика твердого тела, методы и аппаратура ультразвукового контроля состояния и состава сред, электроника.
E-mail: MMShevelko@mail.eltech.ru

REFERENCES

1. Schoenberg M., Censor D. Elastic Waves in Rotating Media. Quarterly of Applied Mathematics. 1973, vol. 31, no. 3, pp. 115–125. doi: 10.1090/qam/99708
2. Sarapulov S. A., Ulitko I. A. Rotation Influence on Body Waves in Elastic Medium and Their Use in Solid-State Gyroscopy. *Girokopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and Navigation]. 2001, no. 4, pp. 64–72. (In Russian)
3. Destrade M., Saccomandi G. Some Results on Finite Amplitude Elastic Waves Propagating in Rotating Medium. Acta Mechanica. 2004, no. 173, pp. 19–31. doi: 10.1007/s00707-004-0185-x
4. Khan A., Islam S., Khan M., Siddiqui I. Speed of Longitude and Transverse Plane Elastic Waves in Rotating and Non-Rotating Anisotropic Mediums. World Applied Sciences J. 2011, vol. 15, no. 12, pp. 1761–1769.
5. Durukan Ya., Lutovinov A. I., Peregudov A. N., Shevel'ko M. M. On Characteristics of Waves Propagating in Rotating Medium. *Izvestiya SPbGETU "LETI"* [Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University]. 2014, no. 8, pp. 57–61. (In Russian)
6. Durukan Ya., Lutovinov A. I., Peregudov A. N., Shevel'ko M. M. On Designability of Rotational Motion Sensors on Bulk Acoustic Waves. *Izvestiya SPbGETU "LETI"* [Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University]. 2015, no. 10, pp. 69–73. (In Russian)
7. Durukan Ya., Lutovinov A. I., Peregudov A. N., Popkova E. S., Shevelko M. M. The Characteristics of Acoustic Wave Propagation in Rotating Solid-State Media. A Materials of the 2018 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), Saint Petersburg, Jan. 29 – Febr. 1, 2018. SPb., SPbGETU "LETI" Publ., pp. 461–464. doi: 10.1109/ElConRus.2018.8317131
8. Domarkas V. I., Kazhis R.-I. Yu. *Kontrol'no-izmeritel'nye p'ezoelektricheskie preobrazovateli* [Piezoelectric Transducers]. Vilnius, Minthis, 1974, 258 p. (In Russian)
9. Ivanov V. E., Merkulov L. G., Yablonik L. M. Study of Ultrasonic Flaw Detector Piezo Transducer. *Zavodskaya laboratoriya* [Factory Laboratory]. 1962, no. 12, pp. 1459–1464. (In Russian)
10. Merkulov L. G., Yablonik L. M. Damped Piezoelectric Transducer Operation in the Presence of Several Intermediate Layers. *Akusticheskii zhurnal* [Acoustic magazine]. 1963, vol. 9, no. 4, pp. 449–459. (In Russian)
11. Yakovlev L. A. On Designability of Approximately Matched Piezoceramic Transducer. *Izvestiya LETI* [Proceedings of Leningrad Electrotechnical Institute]. 1970, no. 89, pp. 163–167. (In Russian)
12. Merkulov L. G., Fedorov V. A., Yakovlev L. A. On Delay Line Bandwidth with Multiple Reflections. *Izvestiya LETI* [Proceedings of Leningrad Electrotechnical Institute]. 1971, no. 95, pp. 17–22. (In Russian)
13. Merkulov L. G., Fedorov V. A., Yakovlev L. A. Electrical Load Influence on Delay Line Bandwidth with Multiple Reflections. *Izvestiya LETI* [Proceedings of Leningrad Electrotechnical Institute]. 1972, no. 112, pp. 43–47. (In Russian)
14. Yablonik L. M. On Electrical Load Influence on Multi-layer Converter Operation. *Akusticheskii zhurnal* [Acoustic magazine]. 1964, vol. 10, no. 2, pp. 234–238. (In Russian)
15. Merkulov L. G., Fedorov V. A., Yakovlev L. A. Operation of Solid Elastic-Anisotropic Medium Loaded Piezoelectric Transducer. *Akusticheskii zhurnal* [Acoustic magazine]. 1973, vol. 19, no. 1, pp. 53–59. (In Russian)
16. Golubev A. S. *Preobrazovateli ul'trazvukovykh defektoskopov* [Ultrasonic Flaw Detector Transducers] / LETI, Leningrad, 1986, 80 p. (In Russian)

Received November 06, 2018

Accepted February, 11, 2019

Yasemin Durukan – Master's Degree in Devices and Methods of Quality Control and Diagnostics (2017), Postgraduate student and Assistant of Department of Electroacoustics and Ultrasound Engineering of Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of 10 scientific publications. Area of expertise: crystal acoustics.
E-mail: durukanleti@gmail.com

Alexander N. Peregudov – Cand. of Sci. (Engineering) (1986), Associate Professor (2003) of the Department of Electroacoustics and Ultrasonic Engineering of Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: solid state acoustics; ultrasonic measurements; lamellar piezo transducers.
E-mail: a_peregudov@mail.ru

Michael M. Shevelko – Cand. of Sci. (Engineering) (1978), Associate Professor (2003) of the Department of Electroacoustics and Ultrasonic Engineering of Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: solid state acoustics; methods and equipment for ultrasound monitoring of medium state and composition; electronics.
E-mail: mmshevelko@etu.ru
