

2. Измерители шума – Center 320/321/322/325. Руководство по эксплуатации. URL: <http://optimum.perm.ru/files/price/77.pdf>.

3. ГОСТ 23337–2014. Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий. М.: Изд-во стандартов, 2014.

4. Федорова В. Н., Фаустов Е. В. Медицинская и биологическая физика: курс лекций с задачами. URL:

http://vmede.org/sait/?page=5&id=Medbiofizika_fedorov_2008&menu=Medbiofizika_fedorov_2008.

5. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых и общественных зданий и на территории жилой застройки. М.: Минздрав России, 1997.

6. Тупов В. Б. Снижение шумового воздействия от оборудования в энергетике. М.: Изд-во МЭИ(ТУ), 2004.

M. S. Stepanova, I. S. Zakharov

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

NOISE POLLUTION RESEARCH FROM CHP PLANTS IN SUMMER TIME

Noise measurement research of CHP Plants with different capacity. Experimental study of noise CHP and analyze their parameters, establishment of the intensity of the noise power in the summer, a theoretical calculation of the noise and comparison with the experimental results.

CHP Plant, noise, noise pollution

УДК 534.27

Я. Дурукан, А. И. Лутовинов, А. Н. Перегудов, М. М. Шевелько
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Оценка чувствительности твердотельного ультразвукового датчика угловой скорости

Рассмотрены основные факторы, определяющие чувствительность датчиков параметров движения, построенных на базе объемных акустических волн, распространяющихся ортогонально оси вращения звукопровода. Определены параметры элементов, входящих в акустический тракт и электронные цепи согласования, при которых чувствительность достигает наибольшего значения. Проведена оценка уровня выходного сигнала датчика, построенного на указанном принципе. Получена зависимость выходного напряжения от скорости вращения среды.

Акустические волны, датчик параметров движения, гироскоп, чувствительность, влияние вращения, скорость волны, поляризация акустической волны

В последние годы повышенный интерес, уделяемый изучению особенностей распространения акустических волн во вращающемся твердотельном звукопроводе, связан с попытками применить их для построения датчиков параметров движения, обладающих высокой вибро- и ударопрочностью и широким динамическим диапазоном измеряемой величины. В [1]–[3] показаны возможности построения датчиков, работа которых базируется на изменениях характеристик акустических волн. Одна из концепций основана на изменении поляризации сдвиговой волны, рас-

пространяющейся вдоль оси вращения среды [2], другая – на изменении скорости волн круговой поляризации [3]. В последних работах авторами была продемонстрирована возможность построения датчиков, в основе функционирования которых лежат изменения характеристик волн, распространяющихся перпендикулярно оси вращения звукопровода [4], [5]. Было показано, что в этом случае в среде могут распространяться волны эллиптических поляризаций. Это означает, что при излучении сдвиговых волн возникают продольные компоненты вектора смещения и наоборот. Причем

величина возникающих в этом случае ортогональных составляющих пропорциональна скорости вращения среды Ω и является информативным параметром для такого типа датчиков.

Конструкция датчика, построенного на принципе определения изменения характеристик волн, распространяющихся ортогонально оси вращения среды. Предложенная конструкция чувствительного элемента представляет собой твердотельный звукопровод, на противоположных концах которого расположены излучатель и приемник акустических колебаний. При этом излучатель возбуждает чисто сдвиговые колебания, а приемник выявляет только продольные компоненты смещения излученной ультразвуковой волны [5]. На рис. 1 представлена структурная схема предлагаемого твердотельного ультразвукового датчика угловой скорости.

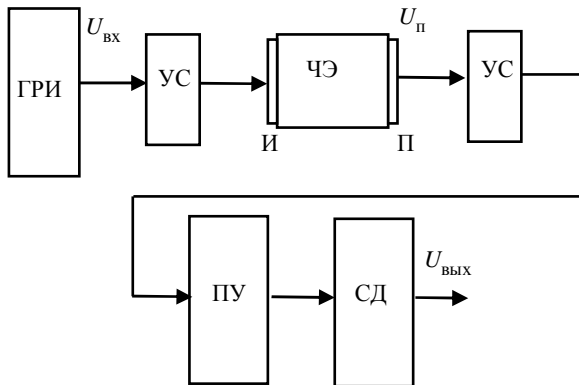


Рис. 1

Для создания ультразвуковых колебаний на излучающий преобразователь (И) периодически подается высокочастотный импульсный сигнал, вырабатываемый генератором радиоимпульса (ГРИ). На входе и выходе чувствительного элемента (ЧЭ) расположены электронные устройства согласования (УС). Полученный приемником (П)

сигнал U_{Π} подается на приемный усилитель (ПУ), а затем на синхронный детектор (СД). Последний служит для выделения огибающей принятого сигнала. Амплитуда $U_{\text{вых}}$ будет пропорциональна скорости вращения, а полярность характеризует направление вращения звукопровода.

На рис. 2 приведена конструкция акустического тракта с согласующими элементами, построенного на принципах ортогонального вращения. На входе УС представляют собой трансформатор, а на выходе – катушку индуктивности L , которая с электрической емкостью пьезопластины C_{Π} образует параллельный электрический колебательный контур. Здесь R_{Γ} – выходное сопротивление генератора; L_1 и L_2 – связанные между собой магнитным полем катушки индуктивности; $M = k\sqrt{L_1L_2}$ – взаимная индуктивность (k – коэффициент связи, характеризующий магнитную связь между катушками); $Y_{\text{вх}}$ – входная проводимость акустического тракта; $zd1, zd2$ – акустические импедансы демпферов, $zt1, zt2$ – акустические импедансы тыльных слоев, zi, zpr – акустические импедансы излучателя и приемника, $z3$ – акустический импеданс звукопровода, $zc1, zc2$ – акустическими импедансы согласующих слоев.

В качестве излучателя и приемника в предлагаемой модели используются пластинчатые преобразователи, выполненные из пьезокварца Y- и X-срезов соответственно.

Анализ коэффициента передачи акустического тракта датчика. Коэффициент передачи рассматриваемой системы ($K_{\text{АК}}$) является многопараметрической функцией, поскольку зависит от ряда характеристик системы: толщин согласующих слоев, резонансных частот пластин излучателя и приемника, добротности электрического контура

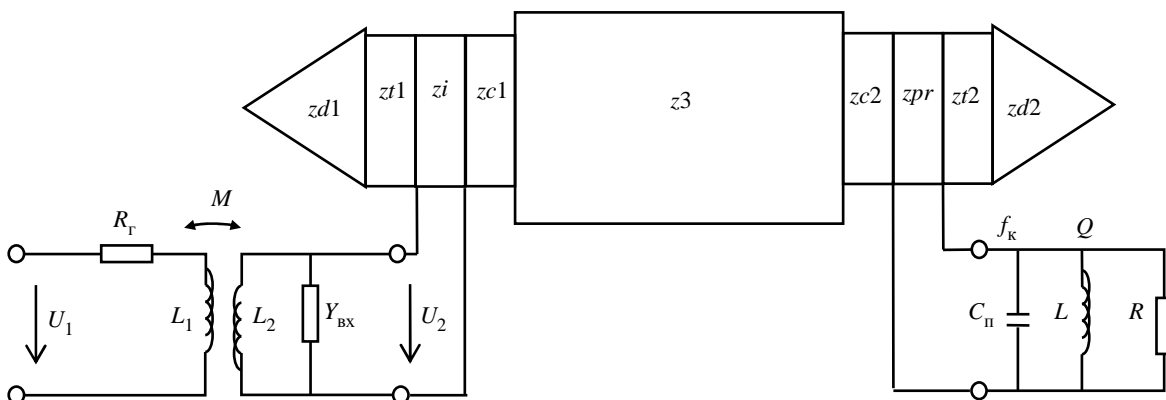


Рис. 2

Таблица 1

Акустическая система	Демпфер	Тыльный слой	Излучатель сдвиговой волны	Согласующий слой	Звукопровод	Согласующий слой	Приемник продольной волны	Тыльный слой	Демпфер
Материал	–	Клей	Кварц Y-среза	Отвержденная эпоксидная смола	Плавленый кварц, относительно сдвиговой волны	Отвержденная эпоксидная смола	Кварц X-среза	Клей	–
Импеданс, $10^6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$zd1$ 0	$zt1$ 1.2	zi 10.37	$zc1$ 1.2	$z3$ 8.27	$zc2$ 2.78	zpr 15.27	$zt2$ 1.2	$zd2$ 0
Скорость, м/с	$cd1$ –	$ct1$ 960	ci 3940	$cc1$ 900	Не задается	$cc2$ 2085	cpr 5750	$ct2$ 960	$cd2$ –
Толщина, мкм	$dt1$ –	$dc1$ 0	ti 39.4	$dc1$ 1–9		$dc2$ 1–9	tpr 57.5	$dc2$ 0	$dt2$ –

на выходе, акустических импедансов входящих в систему материалов, наличия тыльных нагрузок [6]. Он может быть определен по формуле

$$K_{AK}(\omega) = \frac{2e_{11}^2 S_{пр}}{(Y_{вх} + j\omega C_{п})h_{пр}h_{из}z^3} \times F_1(\omega)F_2(\omega), \quad (1)$$

где ω – частота ультразвуковых колебаний; e_{11} – пьезопостоянная кварца; $S_{пр}$ – площадь пьезопластины приемника; $h_{пр}$, $h_{из}$ – толщины приемной и излучающей пьезопластин соответственно; $F_1(\omega)$, $F_2(\omega)$ – частотно-зависимая часть коэффициента передачи излучения и приема соответственно, зависящая от вышеперечисленных параметров.

Оптимизация акустической системы является важной задачей. Одна из проблем заключается в том, что необходимо обеспечить требуемую полосу пропускания при как можно большем коэффициенте передачи. Как правило, увеличение коэффициента передачи ведет к сужению полосы пропускания. В свою очередь, полосы пропускания должны быть не менее обратной длительности импульса информативного сигнала. Последняя составляет несколько периодов частоты заполнения. Таким образом, при повышении рабочей частоты длительность импульса уменьшается и возрастает требуемая ширина полосы пропускания.

Для анализа коэффициента передачи такого акустического тракта была разработана программа в среде *LabVIEW*. Эта программа позволяет варьировать различными параметрами системы, наблюдая влияние последних на частотную зависимость коэффициента передачи. При этом основными выходными данными являлись коэффи-

циент K_{AK} и полоса пропускания системы Δf . В табл. 1 приведены исходные данные для анализируемой конструкции акустического тракта, представленной на рис. 2, с учетом того что пьезопластины не демпфированы.

Согласующие слои, в качестве которых используется клей на основе эпоксидной смолы, обладают различными импедансами, поскольку излучающая и приемная пластины имеют разную поляризацию и предназначены для работы с поперечными и продольными колебаниями соответственно.

Дальнейший анализ коэффициента передачи акустического тракта выполнялся для частот, лежащих в диапазоне 5...50 МГц. Как было показано в [5], минимальные размеры звукопровода в предлагаемой конструкции датчика непосредственно связаны с длительностью импульса, которая определяет необходимую полосу пропускания тракта. В табл. 2 представлены результаты расчета требуемой полосы пропускания акустического тракта и размера звукопровода, при реализации датчика на различных рабочих частотах. Длительность импульса задавалась равной 10 периодам несущей частоты.

Было показано, что наибольшие значения коэффициента передачи достигаются в нижней части рассматриваемого частотного диапазона (5 и 10 МГц). Необходимо отметить, что на коэффициент передачи также существенное влияние оказывает добротность электрического контура. В табл. 3 представлены зависимости коэффициента K_{AK} и полосы пропускания Δf от толщины согласующих слоев d_c при двух значениях добротности Q для случая, когда рабочая частота составляет 5 МГц.

Таблица 2

Величина	Частота заполнения (f), МГц	Период частоты заполнения (T), мкс	Длительность импульса ($\tau_{и}$), мкс	Минимальная длина звукопровода (l_{\min}), мм	Необходимая полоса пропускания акустического тракта (Δf), МГц
Значение	5	0.2	2	20	0.5
	10	0.1	1	10	1
	15	0.07	0.7	6.791	1.5
	20	0.05	0.5	5.09	2
	25	0.03	0.3	4.07	2.5
	30	0.033	0.33	3.39	3
	35	0.029	0.29	2.91	3.5
	40	0.025	0.25	2.55	4
	45	0.022	0.22	2.26	4.5
	50	0.02	0.2	2.04	5

Таблица 3

d_c , мкм	$Q = 1$		$Q = 10$	
	K_{AK} , дБ	Δf , МГц	K_{AK} , дБ	Δf , МГц
1	-24.9	1.4	-7.67	0.69
2	-24.4	1.37	-7.53	0.72
3	-23.5	1.2	-7.31	0.77
4	-22.2	0.98	-7.0	0.77
5	-20.9	0.78	-6.5	0.82
6	-19.7	0.61	-5.66	0.76
7	-18.6	0.49	-4.52	0.64
8	-17.4	0.42	-3.34	0.52
9	-16.5	0.35	-2.29	0.42

Как видно из табл. 3, требуемая полоса пропускания не менее 0.5 МГц может быть достигнута при разных толщинах согласующих слоев. Однако максимальный коэффициент передачи акустического тракта достигается при добротности электрического контура $Q = 10$. Добротность колебательного контура, состоящего из емкости приемной пьезопластины (C_p) и подключенной индуктивности (L), определяется по формуле

$$Q = \omega_0 C_p R,$$

где ω_0 – резонансная частота колебательного контура; R – входное сопротивление ПУ.

Проведенные исследования показали, что при использовании в качестве приемника пьезокварцевых пластин, обладающих незначительной диэлектрической проницаемостью, для получения такой добротности контура необходимо использовать приемные усилители с высоким входным сопротивлением (несколько десятков килоом).

При увеличении толщины согласующих слоев значение K_{AK} также становится больше, но полоса пропускания уменьшается. С учетом того, что требуемое ее значение равно 0.5 МГц, согласующие слои от 1 до 8 мкм удовлетворяют этому

условию ($Q = 10$). При этом коэффициент передачи максимален при толщине 8 мкм.

В работе также оценивалась возможность снижения потерь в акустическом тракте и расширения полосы пропускания путем смещения резонансных частот излучающей и приемной пластин $f_{пл}$ и резонансной частоты колебательного контура f_k на выходе системы. Однако, как видно из табл. 4 и 5, добиться существенного улучшения интересных параметров не удастся.

Оценка чувствительности датчика, базирующегося на принципах ортогонального вращения. Уровень выходного сигнала датчика, построенного по схеме, изображенной на рис. 1, будет определяться рядом параметров: напряжением $U_{вх}$ от ГРИ, коэффициентом передачи электроакустического тракта K_0 и коэффициентом усиления $K_{ПУ}$ приемного усилителя:

$$U_{\text{вых}}(\Omega) = U_{\text{вх}} K_0(\Omega) K_{\text{ПУ}}. \quad (2)$$

В свою очередь, K_0 формируется из трех составляющих. Во-первых, это отношение, которое определяется выражением

$$K_{\Gamma}(\Omega) = \frac{\xi_l(\Omega)}{\xi_t}$$

и показывает, какую часть сигнал $\xi_l(\Omega)$, возникающий на приемнике, составляет относительно амплитуды излученной волны ξ_t (K_{Γ} – коэффициент передачи гироскопической составляющей) [4]. Нетрудно видеть, что на уровень сигнала на выходе датчика, определяемого (2), влияет скорость вращения среды Ω . Это обусловлено зависимостью коэффициента передачи акустического тракта от Ω за счет K_{Γ} . Как было отмечено ранее [4], его значение зависит от частоты акустическо-

Таблица 4

$f_{\text{пл}}, \text{МГц}$	4.5		4.5		5.5		5.5	
$f_{\text{к}}, \text{МГц}$	5		4.5		5.5		5.0	
$d_c, \text{мкм}$	$K_{\text{АК}}, \text{дБ}$	$\Delta f, \text{МГц}$	$K_{\text{АК}}, \text{дБ}$	$\Delta f, \text{МГц}$	$K_{\text{АК}}, \text{дБ}$	$\Delta f, \text{МГц}$	$K_{\text{АК}}, \text{дБ}$	$\Delta f, \text{МГц}$
1	-8.97	0.64	-7.68	0.62	-7.66	0.76	-8.55	0.79
2	-7.97	0.6	-7.56	0.64	-7.49	0.8	-9.16	0.9
3	-6.9	0.57	-7.39	0.67	-7.24	0.86	-9.7	1.12
4	-5.8	0.52	-7.15	0.72	-6.84	0.9	-10.24	1.4
5	-4.67	0.47	-6.8	0.74	-6.15	0.88	-10.26	1.5
6	-3.65	0.43	-6.24	0.73	-4.99	0.76	-9.29	1.3
7	-2.76	0.39	-5.34	0.66	-3.69	0.61	-7.95	0.65
8	-1.99	0.36	-4.29	0.57	-2.45	0.48	-6.69	0.47

Таблица 5

$f_{\text{пл}}, \text{МГц}$	9		9		11		11	
$f_{\text{к}}, \text{МГц}$	10		9		11		10	
$d_c, \text{мкм}$	$K_{\text{АК}}, \text{дБ}$	$\Delta f, \text{МГц}$	$K_{\text{АК}}, \text{дБ}$	$\Delta f, \text{МГц}$	$K_{\text{АК}}, \text{дБ}$	$\Delta f, \text{МГц}$	$K_{\text{АК}}, \text{дБ}$	$\Delta f, \text{МГц}$
1	-7.97	1.2	-7.56	1.3	-7.49	1.6	-9.16	2.9
2	-5.77	1.05	-7.14	1.44	-6.85	1.82	-10.24	2.82
3	-3.65	0.87	-6.23	1.45	-4.99	1.5	-9.29	2.65
4	-1.99	0.72	-4.29	1.11	-2.44	0.95	-6.69	0.94
5	-0.79	0.59	-2.22	0.75	-0.26	0.63	-4.5	0.62
6	0.18	0.48	-0.44	0.53	1.48	0.47	-2.74	0.47
7	1.01	0.39	1.04	0.42	2.89	0.37	-1.3	0.37
8	1.74	0.33	2.28	0.33	4.02	0.3	-0.13	0.3

го сигнала и в случае рабочей частоты датчика 5 МГц и скорости вращения 1 об/с равно $K_{\Gamma} = 6.6 \cdot 10^{-7}$.

Вторая составляющая – коэффициент передачи системы «излучатель–звукпровод–приемник» $K_{\text{АК}}$, определяемый (1), анализ которого представлен ранее. В-третьих, это коэффициент передачи трансформатора ($K_{\text{Тр}}$) на входе акустической части чувствительного элемента. Тогда формула для вычисления $K_0(\Omega)$ будет иметь вид

$$K_0(\Omega) = K_{\Gamma}(\Omega) K_{\text{АК}} K_{\text{Тр}}$$

В качестве примера определим значение выходного напряжения датчика, работающего на частоте 5 МГц. Под $U_{\text{ВХ}}$ понимается величина напряжения на выходе акустического тракта $U_{\text{П}}$ без учета дальнейшего усиления. Зададимся уровнем напряжения, подаваемым на излучающую пьезопластину, в 100 В. Такое значение может быть получено при соответствующих уровнях напряжения ГРИ и с учетом наличия дальнейшего повышения на трансформаторе. Эта величина на несколько порядков меньше значения электрического пробоя пьезопластины. Следует отметить, что схемотехнические решения выходных каскадов современных дефектоскопов позволяют создавать напряжение на пьезопластинах не менее 100 В.

Для скорости вращения звукпровода $\Omega = 1$ об/с напряжение на выходе будет равно:

$$U_{\text{ВЫХ}}(\Omega) = U_{\text{ВХ}} K_{\Gamma}(\Omega) K_{\text{АК}},$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = 100 \cdot 6.6 \cdot 10^{-7} \cdot 0.7 = 92 \text{ мкВ}.$$

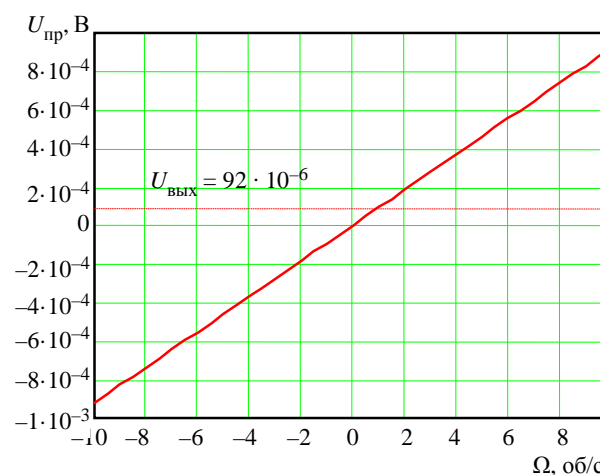


Рис. 3

Зависимость напряжения на выходе акустического тракта от частоты вращения представлена на рис. 3 и носит линейный характер, поскольку, как было показано в [4], K_{Γ} имеет прямую пропорциональную зависимость от Ω . Скорость вращения среды меняется от -10 до 10 об/с, а знак характеризует направление вращения тела.

Для оценки предельной чувствительности такого датчика угловой скорости необходимо срав-

нить уровень выходного сигнала с уровнем шумов, создаваемых на входе ПУ. Как было показано в [7], источниками шума в таких устройствах являются тепловые шумы звукопровода и пьезопластины, а также входные шумы ПУ. Суммарный уровень шума зависит от частоты и на 5 МГц составляет порядка 40 нВ. Сравнив уровень выходного сигнала с шумами, можно определить предельную чувствительность датчика, которая составит 0.001 об/с (0.4 °/с).

Несмотря на такой уровень чувствительности, датчик угловой скорости, построенный на указанном принципе, отличается высокой вибро- и ударостойкостью и имеет широкий динамический диапазон измеряемой величины.

Таким образом, в рамках проведенных исследований было выполнено следующее:

1. Предложена конструкция твердотельного акустического датчика угловой скорости, постро-

енного на принципах выявления изменения поляризации объемных акустических волн, распространяющихся ортогонально оси вращения среды. Представлена функциональная схема предлагаемого решения.

2. Выявлены основные факторы, влияющие на чувствительность такого датчика. Показано, что одним из способов повышения чувствительности является оптимизация конструктивных элементов акустического тракта и цепей согласования. Рассчитаны их оптимальные параметры.

3. Произведена численная оценка предельной чувствительности датчика параметров движения, составляющая 0.4 °/с.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках реализации соглашения №14-19-00693 от 23.06.2014 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lao Binney Y. Gyroscopic effect in surface acoustic waves // Proc. of IEEE Intern. Ultrasonics Symposium, New York, NY, USA, 5–7 Nov. 1980. P. 687–691.

2. Пат. РФ № 2397445, МПК G01C 19/58. Чувствительный элемент гироскопа / Е. С. Грибкова, Д. П. Лукьянов, А. Н. Перегудов, М. М. Шевелько; 2009118663/28; заявл. 18.05.2009 г.; опубл. 20.08.2010 г.

3. Пат. РФ № 2392625. Способ измерения угловой скорости / Е. С. Грибкова, Д. П. Лукьянов, А. Н. Перегудов, М. М. Шевелько; заявл. 18.05.2009 г., опубл. 20.06.2010 г. Бюл. № 17.

4. 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.

5. 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.

6. Меркулов Л. Г., Яблоник Л. М. Работа демпфированного пьезопреобразователя при наличии нескольких промежуточных слоев // Акустический журн. 1963. Т. 9, № 4. С. 449–459.

7. Оценка предельной чувствительности твердотельных датчиков гироскопов на объемных акустических волнах / Е. С. Грибкова, В. А. Марусиченко, А. Н. Перегудов, М. М. Шевелько // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. № 7. С. 84–90.

Ya. Durukan, A. I. Lutovinov, A. N. Peregudov, M. M. Shevelko
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

ESTIMATION OF SENSITIVITY OF SOLID ULTRA – SOUND ANGULAR VELOCITY SENSOR

The main factors that determine the sensitivity of the sensor motion parameters, built on the basis of bulk acoustic waves propagating orthogonally to the rotation axis of the turbo are presented. The parameters of the elements included in the acoustic path and matching electronic circuits, with which sensitivity reaches its maximum value are determined. The evaluation of the output signal level of the sensor is configured at that principle is made. The dependence of output voltage from the medium speed is shown.

Acoustic waves, motion sensor settings, gyro sensitivity, the effect of rotation, wave velocity, polarization of the acoustic waves