

пьезоцилиндров, является их емкостная составляющая. Резонансные свойства пьезоцилиндров достаточно быстро вырождаются по мере роста номера i и их акустической нагруженности, которая последовательно увеличивается благодаря

фазированному возбуждению пьезоцилиндров ПВТ по типу бегущей волны. Полученные результаты их анализа могут быть полезны при разработке генераторных устройств для ПВТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанов Б. Г. Сверхширокополосный гидроакустический преобразователь волноводного типа. Задача синтеза // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 3. С. 87–96.
2. Степанов Б. Г. О возможности дополнительного увеличения рабочего диапазона частот гидроакустического преобразователя волноводного типа и его работы в импульсном режиме. Задача синтеза // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 4. С. 71–80.
3. Пат. № 1723972. Гидроакустический преобразователь / Д. Б. Дианов, Б. Г. Степанов, В. Б. Малахов и др., публ. 1994 г.; приоритет 13.02.1990.
4. Пат. РФ № 2393644. Гидроакустический преобразователь волноводного типа / Б. Г. Степанов; опубл. 27.06.2010; приоритет от 09.06.09; заявка № 2009121682.
5. Пат. РФ № 2393645. Широкополосный гидроакустический преобразователь / Б. Г. Степанов; опубл. 27.06.2010; приоритет от 09.06.09; заявка № 2009121683.
6. Степанов Б. Г., Теплякова А. В. Об излучении водозаполненного пьезоцилиндра через торцевые апертуры в волновод // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. № 9. С. 89–95.

B. G. Stepanov

Saint-Petersburg state electrotechnical university "LETI"

ENTRANCE ELECTRIC IMPEDANCE OF PIEZOELECTRIC CYLINDERS, FORMING THE TRANSDUCER OF WAVEGUIDE TYPE

Frequency characteristics of full entrance conductivity and its components for piezoelectric cylinders, forming the transducer of waveguide type are analyzed. Influence on these characteristics of different variants of excitation of the transducer of waveguide type is estimated.

Electric impedance, piezoelectric cylinders, transducer of waveguide type, frequency characteristic

УДК 534.27

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

Оптимизация тракта акустического сенсора на объемных волнах

Рассматривается влияние конструктивных элементов акустической системы и использование цепей согласования с целью повышения коэффициента передачи твердотельного датчика параметров движения на объемных акустических волнах.

Объемные акустические волны, твердотельный датчик движения, коэффициент передачи

Последнее время наблюдается повышение интереса к точностным и эксплуатационным характеристикам датчиков параметров движения. Исследователи стараются не только усовершен-

ствовать классические схемы построения гироскопов, но и искать принципиально новые идеи, позволяющие решить проблему создания чувствительных элементов датчиков параметров уг-

лового движения. В настоящее время известно более ста различных физических принципов, которые позволяют решать гироскопические задачи. Работы кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ» показали возможность построения твердотельного гироскопа на базе объемных акустических волн, где для получения информативного сигнала используются инерциальные свойства упругих волн, распространяющихся в твердом теле [1], [2].

Достоинством акустических датчиков параметров движения по сравнению с известными микромеханическими является отсутствие в конструкции сосредоточенной массы на упругих подвесах, что позволяет им работать в условиях повышенных нагрузок. Однако подобные устройства характеризуются низким уровнем выходного сигнала, что подтверждается существующими макетами [3], [4]. В связи с этим для таких датчиков актуальной является задача повышения уровня информативного сигнала.

Решение вопроса возможно разными путями. Одним из них является оптимизация конструкции акустической части датчика с целью увеличения коэффициента передачи сигнала в акустическом тракте.

Принцип работы акустических датчиков основан на регистрации таких изменений характеристик волн, которые возникают в результате движения среды их распространения (звукопровода). Так, было показано [2], что распространяющаяся вдоль оси вращения сдвиговая объемная акустическая волна (ОАВ) на пути от точки *a* до точки *b* (рис. 1) изменит направление поляризации на угол $\alpha = \tau \cdot \Omega$, где τ – время распространения волны от точки *a* до точки *b*; Ω – угловая скорость вращения звукопровода. Такой поворот может быть интерпретирован как

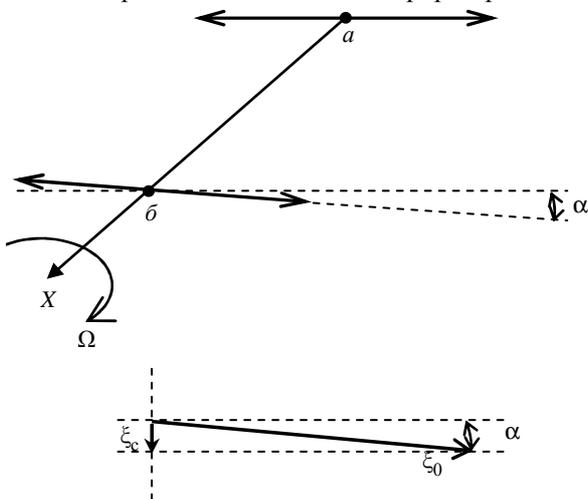


Рис. 1

появление вторичной сдвиговой волны с ортогональной поляризацией и амплитудой $\xi_c = \xi_0 \sin \alpha$, ξ_0 – амплитуда основной волны.

Возможен ряд способов выделения сигнала, пропорционального амплитуде вторичной волны, а следовательно, скорости вращения звукопровода. Один из вариантов конструкции чувствительного элемента может представлять собой звукопровод, на плоскопараллельных торцах которого расположены излучающий И и приемный П преобразователи сдвиговых волн (рис. 2). При этом направления поляризации последних взаимно ортогональны. Для получения напряжения $U_{\text{вых}}$, пропорционального скорости вращения, на излучающий преобразователь от генератора Γ подается высокочастотный радиоимпульс, а принятый приемником сигнал усиливается приемным усилителем.

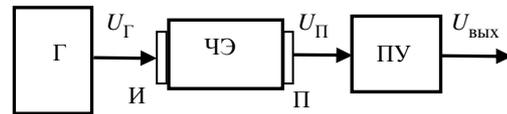


Рис. 2

Таким образом, $U_{\text{вых}} = U_{\Gamma} (K_{\text{ЧЭ}} \cdot \tau \Omega) K_{\text{ПУ}}$, где U_{Γ} – напряжение генератора; $K_{\text{ЧЭ}}$ – коэффициент передачи чувствительного элемента (для случая, когда оси поляризации излучающего и приемного преобразователей параллельны); $K_{\text{ПУ}}$ – коэффициент передачи приемного устройства ($U_{\text{вых}} / U_{\text{П}}$) [5].

Нетрудно подсчитать, что для звукопровода длиной 2.5 см (звукопроводы такой длины использовались в экспериментальных макетах), выполненного из плавленного кварца, при скорости (ОАВ) вращения $\Omega = 10$ об/с, угол поворота направления поляризации составляет меньше 1° , что соответствует множителю $\tau \Omega$ в $2.7 \cdot 10^{-5}$ рад. Это приводит к весьма незначительному уровню выходного сигнала. Увеличение выходного сигнала возможно путем повышения:

- 1) напряжения генератора (U_{Γ});
- 2) коэффициента передачи приемного устройства ($K_{\text{ПУ}}$);
- 3) коэффициента передачи чувствительного элемента ($K_{\text{ЧЭ}}$).

Увеличение U_{Γ} ограничено электрической прочностью излучающей пьезопластины (десятки вольт). Увеличение $K_{\text{ПУ}}$ ограничивается уров-

нем шумов на входе приемного устройства. Таким образом, повышение уровня выходного сигнала может быть достигнуто за счет оптимизации акустического тракта чувствительного элемента датчика.

Необходимо отметить, что коэффициент передачи такого акустического тракта (рис. 2) в значительной степени зависит от требуемой частотной полосы пропускания. Использование акустической системы в качестве чувствительного элемента подразумевает квазинепрерывный режим работы (т. е. длительность подаваемого радиоимпульса много больше периода его несущей частоты). Единственным ограничением, накладываемым на длительность импульса, является условие отсутствия стоячих волн. Это приводит к тому, что к моменту прихода фронта отраженного импульса обратно на излучающий преобразователь, генерация должна закончиться. Следовательно, максимальная длительность импульса должна быть ограничена величиной:

$$\tau_{\max} < \frac{2L}{c},$$

где L – длина звукопровода; c – скорость возбуждаемой упругой волны в материале звукопровода. Для передачи в акустическом тракте такого импульса требуется полоса $\sim 1/\tau_{\max}$. Например, при использовании звукопроводов длиной 2.5 см из плавленого кварца ($c_t = 3.8 \cdot 10^3$ м/с) достаточно полосы пропускания 0.2 МГц (при частотах несущей – десятки мегагерц).

Как правило, в обычных акустических задачах требуется создание трактов с широкой полосой пропускания. Относительно узкая полоса пропус-

кания устройства меняет привычные критерии оптимизации конструкции с целью повышения выходного сигнала преобразователя.

Увеличение уровня сигнала от акустического тракта можно осуществить двумя способами:

- за счет выбора оптимальных параметров конструктивных элементов акустической системы;
- с помощью подключения соответствующих электрических цепей, согласующих тракт как на входе, так и на выходе.

В работе использованы оба этих подхода. Расчет акустического тракта, содержащего пьезоэлектрические преобразователи, контактные слои и звукопровод, проводился с помощью метода волновых уравнений.

Для решения первой задачи по выбору оптимальной конструкции датчика, обеспечивающей наибольший уровень выходного сигнала, нужно проводить подбор материалов элементов конструкции акустической системы.

Разработанная ранее на кафедре электроакустики и ультразвуковой техники программа компьютерного моделирования твердотельного акустического тракта с пластинчатыми преобразователями имеет наглядный графический интерфейс (рис. 3) и позволяет анализировать влияние параметров конструктивных элементов на частотную зависимость коэффициента передачи. Исходными данными для работы с программой являются акустические параметры материалов, составляющих тракт (акустическое сопротивление и скорость ультразвука), их геометрические размеры (толщины), коэффициент электромеханической связи пьезопластин, а также параметры электрической нагрузки на выходе конструкции (частота резонансного контура, добротность, соотношение емкостей контура и пьезоприемника). После обра-

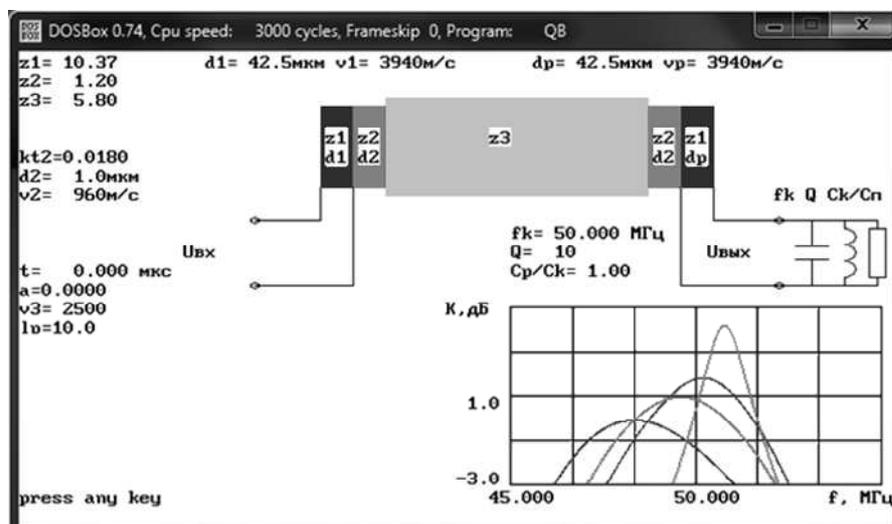


Рис. 3

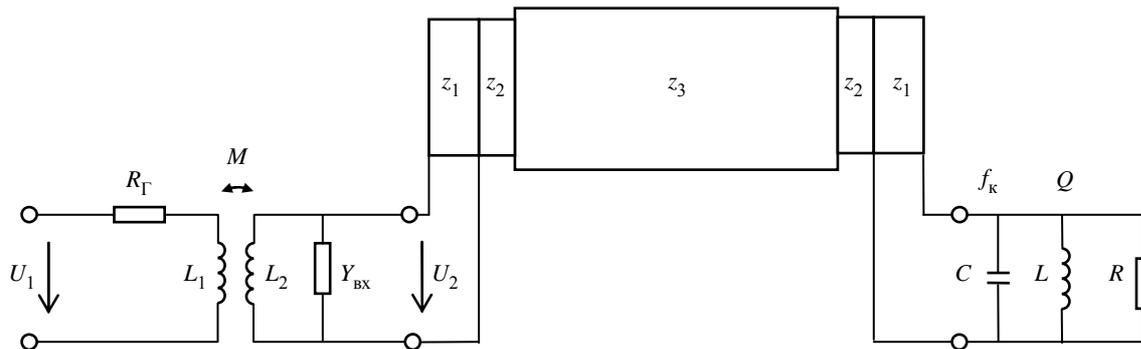


Рис. 4

ботки введенных данных программа представляет частотную зависимость коэффициента передачи акустического тракта в табличной форме и графики амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в заданном частотном диапазоне. Для оценки влияния параметров отдельных элементов тракта на АЧХ (например, толщин контактных слоев) предусмотрена возможность строить семейство характеристик на одном графике (рис. 3).

Однако в данной программе предполагается, что подаваемое на излучающий преобразователь напряжение сигнала не зависит от частоты. Это возможно при условии, когда входное сопротивление пьезоизлучателя много больше выходного сопротивления генератора. Согласование на входе акустического тракта, как это было показано в [6], можно выполнить, применяя связанные катушки индуктивности (рис. 4, где обозначены: 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_{BX} – входная проводимость акустического тракта; z_1, z_2, z_3 – пьезопластины, контактные слои и звукопровод с соответствующими акустическими импедансами). Электрическая нагрузка приёмного преобразователя задаётся в общем случае элементами R, L, C , которые совместно с выходным импедансом пьезоприёмника образуют электрический контур с резонансной частотой f_k и добротностью Q . Коэффициент передачи такой конструкции определяется произведением коэффициентов передачи входных цепей с учетом входной проводимости пьезоизлучателя и акустического тракта с соответствующей электрической нагрузкой.

В некоторых задачах при расчёте электрических цепей следует преобразовать исходную цепь с индуктивной связью в эквивалентную цепь без

индуктивной связи, к которой уже легко применить все известные методы расчета [7]. Для этого нужно пару индуктивно связанных ветвей привести к общей точке. Элемент в этом случае является трехполюсником. Трехполюсный индуктивно связанный элемент можно представить эквивалентной электрической Т-образной схемой замещения без магнитной связи и состоящей из трех индуктивных ветвей (рис. 5).

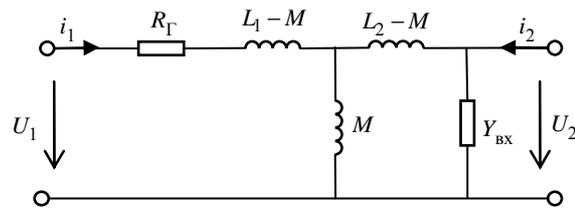


Рис. 5

Коэффициент передачи системы будет равен отношению выходного напряжения U_2 к напряжению на входе цепи U_1 :

$$K = \left[\frac{z_3(z_2 + z_{BX})}{z_3 + z_2 + z_{BX}} \right] \frac{z_{BX}}{(z_2 + z_{BX})},$$

где $z_1 = j\omega(L_1 - M)$; $z_2 = j\omega(L_2 - M)$; $z_{BX} = 1/Y_{BX}$.

Для анализа и нахождения оптимальных параметров элементов датчика, включая акустический тракт и электрические цепи согласования, как на входе, так и на выходе была разработана программа в среде компьютерного моделирования LabVIEW. Рабочая схема и пульта ввода параметров представлены на рис. 6.

Новизна данного способа анализа заключается в том, что для определения влияния параметров отдельных конструктивных элементов устройства на его АЧХ нет необходимости строить семейство кривых. Программа наглядно демонстрирует из-

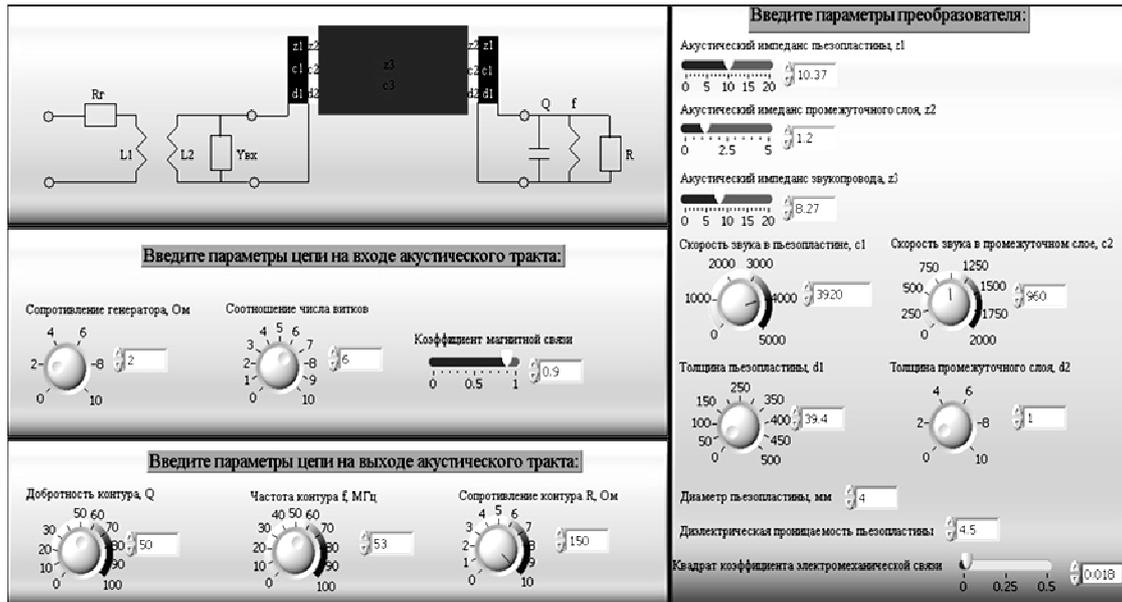


Рис. 6

менение коэффициента передачи акустического тракта с согласующими цепями при перестройке параметров конструкции. Результат расчета программы представляется в виде графиков зависимости от частоты коэффициента передачи цепи на входе, коэффициента передачи акустического тракта с выходной цепью и коэффициента передачи всей системы (рис. 7).

Для цепей согласования на входе тракта значения индуктивностей, как было рекомендовано в [6], были выбраны в соответствии со следующими требованиями:

- индуктивность L_2 образует с емкостью входного преобразователя резонансный контур с частотой, близкой к рабочей частоте датчика;

- индуктивность L_1 имеет меньшее число витков, чем индуктивность L_2 , для повышения напряжения на излучающей пьезопластине.

На основании того, что катушки расположены на одном ферромагнитном сердечнике и намотаны

одна на другую, коэффициент связи индуктивных элементов в цепи согласования выбирается максимально возможным, т. е. близким к единице.

На рис. 7 представлен пример результата расчета АЧХ тракта на рабочих частотах 50 МГц. АЧХ входной цепи представлен на рис. 7, а. Было получено, что максимум коэффициента передачи при использовании цепи согласования смещается на частоту 53 МГц и равен 21.5 дБ (рис. 7, в). При этом вариант без использования цепи со связанными катушками индуктивности дает максимальный коэффициент передачи, равный 5 дБ (рис. 7, б). Таким образом, было показано значительное влияние цепей согласования на коэффициент передачи акустической системы чувствительного элемента гироскопа на ОАВ.

Проведение дальнейших исследований по оптимизации уровня коэффициента передачи сигнала в преобразователе необходимо проводить с учетом коэффициентов затухания и поглощения в материалах конструкции, а также с учетом роста потерь при переходе на более высокие частоты.

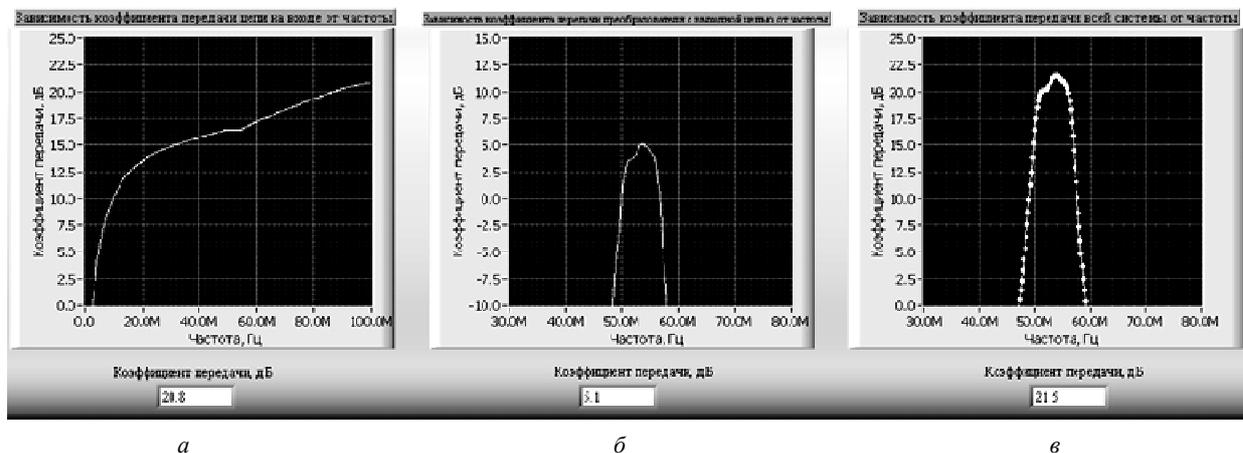


Рис. 7

Таким образом, были рассмотрены различные методы увеличения уровня выходного сигнала как за счет поиска оптимальных параметров акустической системы, так и путем оптимального согласования с электронным трактом. В среде LabVIEW разработана программа, позволяющая находить

частотную зависимость коэффициента передачи при различных параметрах как самого акустического тракта, так и цепей согласования. Разработанная методика может применяться при создании и других типов акустоэлектронных устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грибкова Е. С., Перегудов А. Н., Шевелько М. М. О возможности создания датчиков угловой скорости на базе акустических волн // Тр. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. 2010. Вып. 52. С. 193–202.

2. Грибкова Е. С., Перегудов А. Н., Шевелько М. М. Особенности распространения объемных акустических волн во вращающихся твердых средах // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2009. № 1. С. 53–58.

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

4. Пат. РФ №2397445. Чувствительный элемент гироскопа / Е. С. Грибкова, Д. П. Лукьянов, А. Н. Перегудов, М. М. Шевелько; опубл. 20.08.2010.

5. 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.

6. Дряхлов А. Ю., Перегудов А. Н., Шевелько М. М. Согласование узкополосных ПАВ-фильтров в низкоомных трактах // Вопр. спецрадиоэлектроники. Сер. РЛТ. 1987. Вып. 16. С. 53–56.

7. Теоретические основы электротехники: справ. по теории электрических цепей / под ред. Ю. А. Бычкова, В. М. Золотницкого, Э. П. Чернышева. СПб.: Питер, 2008.

A. R. Kadyrova, A. I. Lutovinov, A. N. Peregudov, M. M. Shevelko
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

OPTIMIZATION OF ACOUSTIC SENSOR TRACT ON BULK WAVES

An influence of acoustic system structural elements and the applying of matching circuits are considered in order to increase the transmission coefficient of the solid-state motion sensor using bulk acoustic waves.

Solid-state sensor, bulk acoustic waves, transmission gain

УДК 535.4

В. Ю. Венедиктов, А. А. Севрюгин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Экспериментальное исследование дифракционной эффективности динамической решетки в матричном фазовом модуляторе

Представлено экспериментальное исследование реальной эффективности дифракции на решетке с треугольным профилем, записываемой в матричном фазовом модуляторе.

Жидкокристаллический модулятор света, голографическая решетка, динамическая голография, дифракционная эффективность

В настоящее время тонкие динамические голограммы (ДГ) находят широкое применение при решении различных задач прикладной оптики,

например для динамической голографической коррекции искажений в оптических и лазерных системах [1], при обработке оптической инфор-