

УДК 531.768

О. М. Бондаренко, О. В. Казнадій**ПАСИВНІ АКУСТОЕЛЕКТРОННІ ДАТЧИКИ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ****Вступ**

Пристрої на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) широко використовуються для вимірювання фізичних величин [1, 2]. На базі них можлива побудова безпроводних вимірювальних систем з пасивними датчиками. Такі датчики є перспективними для дистанційного контролю параметрів рухомих об'єктів. Вони забезпечують надійне збирання даних в складних експлуатаційних умовах [3], зокрема на колесах автомобілів і поїздів, в керованих снарядах [4]. Актуальність зазначеної тематики визнають провідні компанії світу Honeywell (США), Siemens (Германія), активно розвиваючи технології безпроводного вимірювання механічних величин.

В сучасній науково-технічній літературі представлено варіанти побудови та результати експериментальних досліджень безпроводних акустоелектронних датчиків температури, тиску, крутного моменту та прискорення [6, 8]. Однак практично відсутні матеріали, присвячені розробці математичної моделі, методам отримання інформації та оцінці можливостей побудови датчиків кутової швидкості (ДКШ) пасивного типу.

Постановка задачі

На основі представлених в науково-технічній літературі схем акустоелектронних вимірювачів кутової швидкості та відомих принципів модуляції радіочастотного сигналу необхідно запропонувати перспективні базові функціональні схеми та принципи побудови безпроводних датчиків кутової швидкості, оцінити їх можливу чутливість до вимірюваної величини.

Вихідні положення

1. Робоча частота пасивного датчику на ПАХ становить $f_{WL} = 433,07...434,77$ МГц і відноситься до радіочастотного діапазону. Таку

частоту можна використовувати без попереднього ліцензування згідно європейських нормативних документів.

2. Швидкість поширення поверхневої хвилі $V_\varphi=3158$ м/с (ST -зріз кварцу) на п'ять порядків менша швидкості радіохвилі в повітрі $C_{sv}=3\cdot 10^8$ м/с. Тому часом проходження радіочастотного сигналу у повітрі нехтуємо у порівнянні із часом проходження хвилі по поверхні підкладки.

3. Гіроскопічний ефект в поверхневій акустичній хвилі викликає зміну її швидкості [5] або амплітуди [6]. Оцінку граничної чутливості вимірювання кутової швидкості в обох випадках виконаємо по роздільній здатності методів модуляції радіочастотного сигналу.

4. Для збудження поверхневої акустичної хвилі використаємо лінію затримки та резонатор [7].

Гіроскопічний ефект в поверхневій акустичній хвилі

Визначимо залежність швидкості ПАХ від кутової швидкості Ω обертання звукопроводу. Розташуємо ось Ox_1 (рис. 1) вздовж напрямку фазової швидкості ПАХ. Рух частинок поверхні підкладки поляризовано. Вони рухаються по еліптичній траєкторії із обертанням проти годинникової стрілки. На більшій глибині від поверхні (у половину довжини хвилі) поляризація відбувається у зворотному напрямку. Кориолісова сила $F_C = 2m_{eq}\Omega \times V$ (рис. 1, б) радіально розтягує площину поляризації поблизу поверхні та радіально стискає її в глибині підкладки.

Більша частина поверхні підкладки обертається проти годинникової стрілки (рис. 2, а), тому середня траєкторія руху частинок збільшується, а фазова швидкість хвилі зменшується. Зміна напрямку обертання звукопроводу змінює вплив на фазову швидкість на протилежний. Основна енергія ПАХ фокусується поблизу поверхні підкладки на глибині, близькій до однієї довжини хвилі (рис. 2, б).

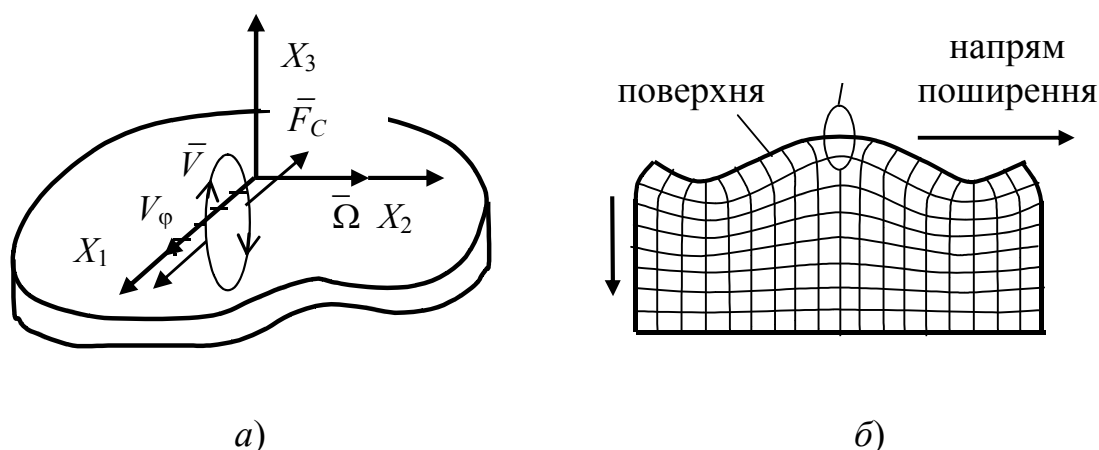


Рис. 1. Поляризація руху частинок поверхні в акустичній хвилі

- а) система координат на поверхні підкладки;
 б) сітка зміщень в поверхневій акустичній хвилі

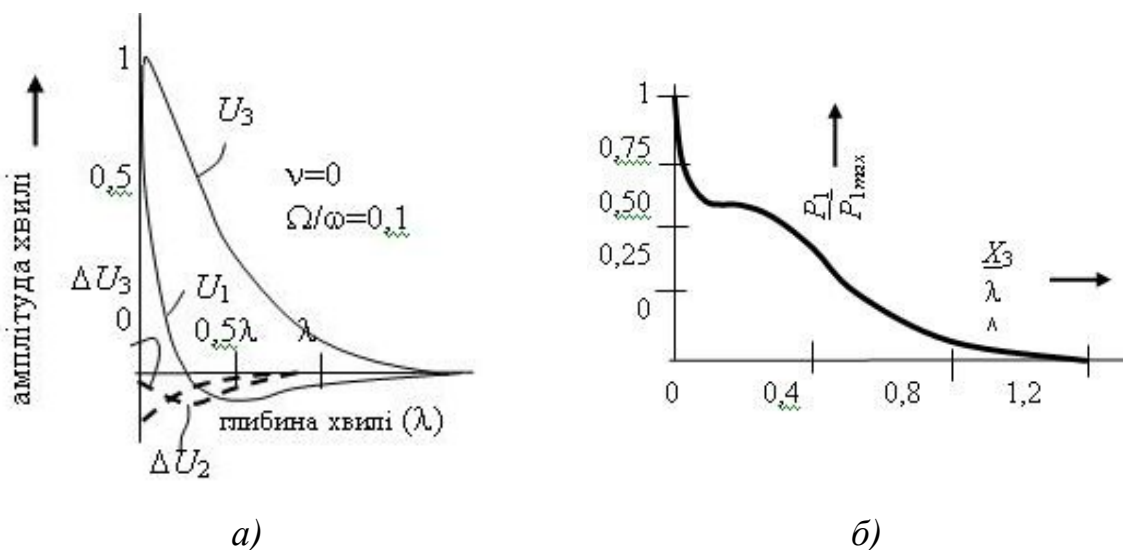


Рис. 2. Вплив глибини на рух частинок ПАХ

- а) залежність швидкості обертання частинок поверхні від глибини;
 б) залежність інтенсивності P ПАХ-Релея від глибини

Відома залежність частоти ПАХ-автогенератора від кутової швидкості Ω обертання звукопроводу

$$f = f_0 - k_\Omega \cdot \Omega, \quad \Delta f = -k_\Omega \cdot \Omega, \quad (1)$$

де $k_\Omega = 0,6 / (2\pi) \approx 0,2$ для кристалу α -SiO₂ ST-зрізу.

Частота ПАХ-автогенератора визначається часом затримки в лінії затримки

$$\tau = L / V_\varphi \approx 1 / f, \quad (2)$$

де L – довжина лінії затримки (в мм), V_φ – фазова швидкість руху ПАХ.

Останнє рівняння показує, що зміна частоти автогенератора під дією кутової швидкості відбувається саме через зміну фазової швидкості, оскільки фізично довжина лінії затримки не змінюється. Девіація частоти автогенератора під дією кутової швидкості буде дуже невеликою, тому підставивши вираз (1) у вираз (2) і використавши формули наближеного визначення степеню суми з малим доданком, одержимо залежність часу затримки від кутової швидкості:

$$\tau_0 + \Delta\tau = 1 / f_0 (1 - k_\Omega \Omega / f_0) \approx \tau_0 (1 + \tau_0 k_\Omega \Omega),$$

де $\tau_0 = 1 / f_0$ – початковий час затримки в лінії затримки, коли зовнішня кутова швидкість відсутня. Часові параметри відбитого сигналу залежать від зміни кутової швидкості не так суттєво, як від інших факторів – температури і механічних напружень [1], тому таку залежність з достатнім ступенем точності можна вважати лінійною:

$$\Delta\tau = \tau_0 S_\tau \Omega, \quad (3)$$

де $S_\tau = \tau_0 k_\Omega$ – коефіцієнт при кутовій швидкості.

Приріст іншого часового параметру лінії затримки – фази $\Delta\varphi$, – пов'язаний зі зміною часу $\Delta\tau$ круговою частотою $\omega_{WL} = 2\pi f_{WL}$ поверхневої акустичної хвилі:

$$\Delta\varphi = 2\pi f_{WL} \cdot \Delta\tau_0 = S_\varphi \cdot \Omega, \quad (4)$$

де $S_\varphi = 2\pi f_{WL} \cdot \tau_0^2 k_\Omega$ – чутливість до вимірюваної величини Ω .

Вирази (1), (3) та (4) показують залежність зміни часових параметрів сигналу в лінії затримки від кутової швидкості.

В стоячій хвилі частинки поверхні рухаються вздовж однієї лінії без будь-якої поляризації, причому частинки в пучностях коливань рухаються виключно вздовж вертикалі (перпендикулярно до поверхні), а вузлові точки лише по горизонталі (в площі підкладки). Тому зміни частотно-часових параметрів резонатору від кутової швидкості обертання підкладки не відбувається. Однак в стоячій хвилі має місце амплітудний гіроскопічний ефект. Визначимо величину цього ефекту.

Розглянемо дію Коріолісової сили F_C на точки, напilenі в пучностях (рис. 3, а) або вузлах (рис. 3, б) стоячої поверхневої акустичної хвилі.

При переносному кутовому обертанні підкладки на інерційні маси діє Коріолісова сила F_C , а оскільки відносна швидкість V руху частинок змінна (періодична) та розподілена по поверхні згідно форми коливань, то і змінна та розподілена по поверхні підкладки Коріолісова сила. Ця сила створює відповідні механічні напруження на поверхні підкладки.

Під дією Коріолісової сили для схем рис. 3 виникають в основному тангенціальні деформації ε_{32} (зсув поверхневого слою відносно більш глибокого).

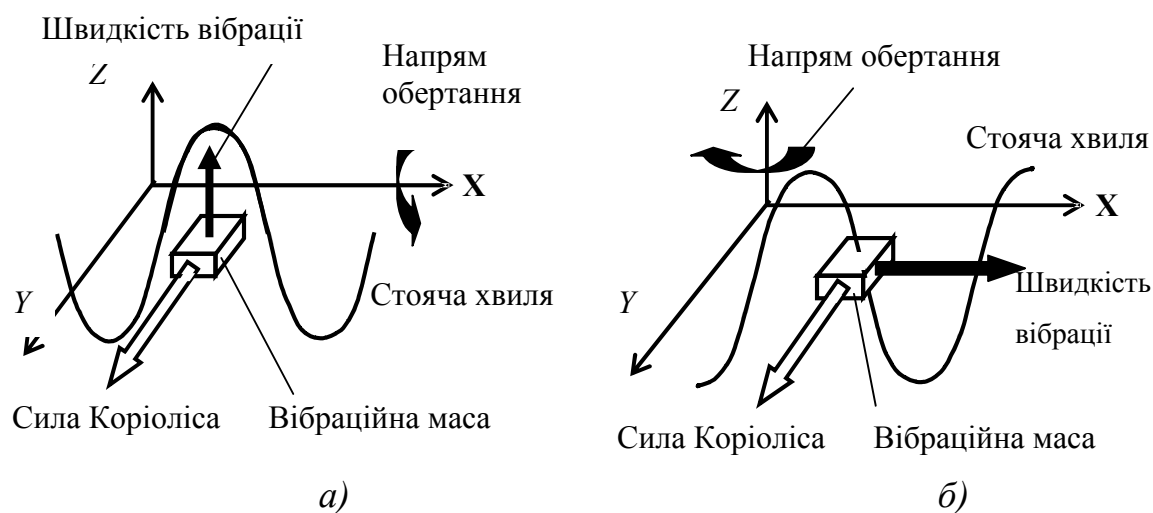


Рис. 3. Схема вимірювання коріолісових сил:

- а) збурюючі маси в пучностях первинної ПАХ;
 б) збурюючі маси у вузлах первинної ПАХ

Точки розподілені по поверхні так, щоб ряди найближчих точок в первинній хвилі довжиною λ_I коливались протифазно в часі та викликали вторинну хвилю довжиною λ_{II} , перпендикулярну первинній (рис. 4).

Механічні напруження у вторинній хвилі внаслідок прямого п'єзоефекту [3] перетворюються в електричний заряд на штирях реєстрації зустрічно-штирьового перетворювача (ЗШП) (див. рис. 4). Електроди ЗШП реєстрації розташовують в пучностях вторинної стоячої хвилі.

Амплітуда вторинної хвилі пропорційна кутовій швидкості обертання підкладки Ω , а знак фази φ_C визначається напрямком обертання ($sign[\Omega]$). Викликані дією коріолісових сил механічні напруження в матеріалі підкладки максимальні, коли швидкість руху частинок у перпендикулярному до кутової швидкості напрямку максимальна.

Ділянка поверхні підкладки в первинній ПАХ зазнає максимальних нормальних деформацій ε_{33} в пучностях і тангенціальних ε_{31} – у вузлах. В інших точках деформації є комбінацією попередніх двох.

Максимальне переміщення частинок на поверхні підкладки під дією коріолісових сил згідно закону Гука буде

$$w_c^m = \frac{F_c}{c_{eq}} = \frac{2m_{eq}}{c_{eq}} \Omega^{UP} V_m \quad (5)$$

де c_{eq} – еквівалентна жорсткість коливальної ділянки, V_m – максимальна коливальна швидкість частинок на поверхні. Коливальну швидкість V_m ви значає амплітуда коливань w_m

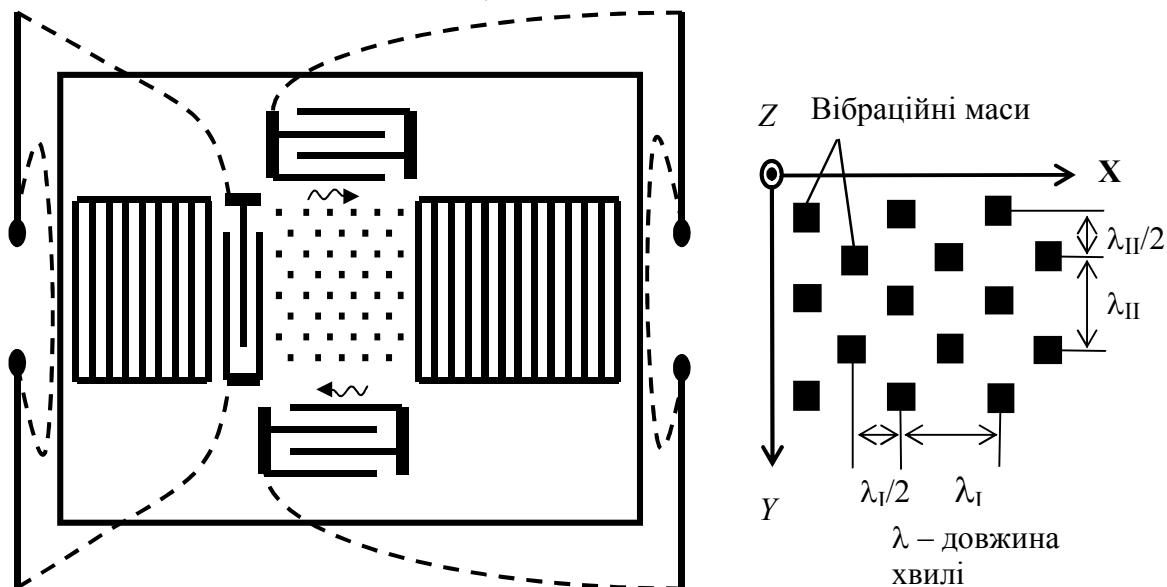


Рис. 4. Схема датчика кутової швидкості із резонатором

$$V_m \approx w_m \omega_n \quad (6)$$

Якщо знехтувати різницею швидкостей звуку в матеріалі підкладки від напрямку (не більше 15%), то можна записати

$$\frac{m_{eq}}{c_{eq}} \approx \omega_n^2 \quad (7)$$

Підставляючи (6) та (7) в (5), отримуємо приблизне значення для оцінки амплітуди переміщень поверхні під дією сил Кориоліса

$$w_c^m \approx 2w_m \frac{\Omega^{UP}}{\omega_n}$$

де Ω^{UP} – верхня межа вимірювань кутової швидкості.

Для верхньої межі вимірювань $\Omega^{UP}=9000^\circ/\text{сек} \approx 150$ рад/сек та прийнята кругова частота генератора $\omega_n=10^8$ рад/сек, відношення між амплітудами буде

$$\frac{w_c^m}{w_m} \approx 3 \times 10^{-6}.$$

Зрости амплітуді вторинної хвилі дозволить високочастотний ПАХ-резонатор в напрямку розповсюдження вторинної хвилі.

Чутливість приймача до параметрів радіохвилі

Для частоти $f_{WL}=434$ МГц довжина періоду складає приблизно $T=1/f_{WL}=2.3$ нс. Якщо вимірювати фазу з роздільною здатністю до $\delta\varphi = \pi/6$ (30, 60, 90 град. і т.д.), то одержимо чутливість вимірювання вихідної величини по часу: $\delta\tau = (T/2\pi)\delta\varphi = 0,19$ нс.

Частота радіосигналів може бути обчислена з роздільною здатністю до одиниць частоти при вимірюванні протягом секунди і до десятої частини герца при вимірюванні протягом 10 секунд. Однак при заповненні вимірюваного сигналу більш високочастотним несним сигналом, зокрема, з частотою $f_z = 2,5$ ГГц – реально досяжною для сучасних технологій – можна за одну секунду виміряти частоту із роздільною здатністю $\delta f = 1$ Гц $f_{WL} / f_z = 0,17$ Гц.

Точність вимірювання амплітуди радіочастотного сигналу визначається пороговою чутливістю сучасного високоточного вольтметра і складає $\delta U = 0,01$ мкВ. Однак на амплітуду радіочастотного сигналу мають суттєвий вплив перешкоди та відстані. Використовуватимемо квазидиференціальну схему побудови радіочастотного тракту із вимірюванням різниці корисного сигналу та базового, що забезпечить необхідну чутливість вимірювання амплітудного сигналу.

Чутливість акустoeлектронних датчиків кутової швидкості

В структурі ДКШ на ПАХ-резонаторі при максимально допустимій напрузі на ЗШП в 1В матимемо приріст амплітуди від вимірюваної кутової швидкості $U_c = 2U_m k_\Omega \Omega^{up} = 0,6 мВ$, де Ω^{up} – верхня границя вимірювань, k_Ω – коефіцієнт гіроскопічної чутливості, U_m – максимальна невимірювана напруга. В такому випадку чутливість за кутовою швидкістю складатиме $(0,1 мкВ/600 мкВ)100\% \approx 0,017\%$ від верхньої границі вимірювань.

В структурі з лінією затримки (рис. 5), фізична вимірювана величина впливає на швидкість розповсюдження ПАХ або на довжину шляху поширення. Обидва в результаті змінюють час затримки τ у вихідному сигналі.

Функція перетворення та вихідна частота пасивного датчика кутової швидкості на ПАХ: $f_\Sigma = 2K_\Omega \Omega + f_{\Sigma 0}$, де $k_\Sigma = -0,6 / (2\pi) \approx 0,1$ для кристалла $\alpha\text{-SiO}_2$ ST-зрізу.

При похибці вимірювання частоти до $\delta f = 0,1$ Гц відповідно до рівняння (1) маємо роздільну здатність по фазі в $n = 2K_\Omega \Omega / \delta f = 600$ вимірюваних одиниць, відносна чутливість по частоті та часу $((1/600)100\% = 0,16\%$ від верхньої границі вимірювання).

Вимірювання за диференційною схемою, представленою на рис. 5, дозволить дещо підвищити чутливість до вимірюваної величини та досягти 0,1 % від верхньої границі вимірювань.

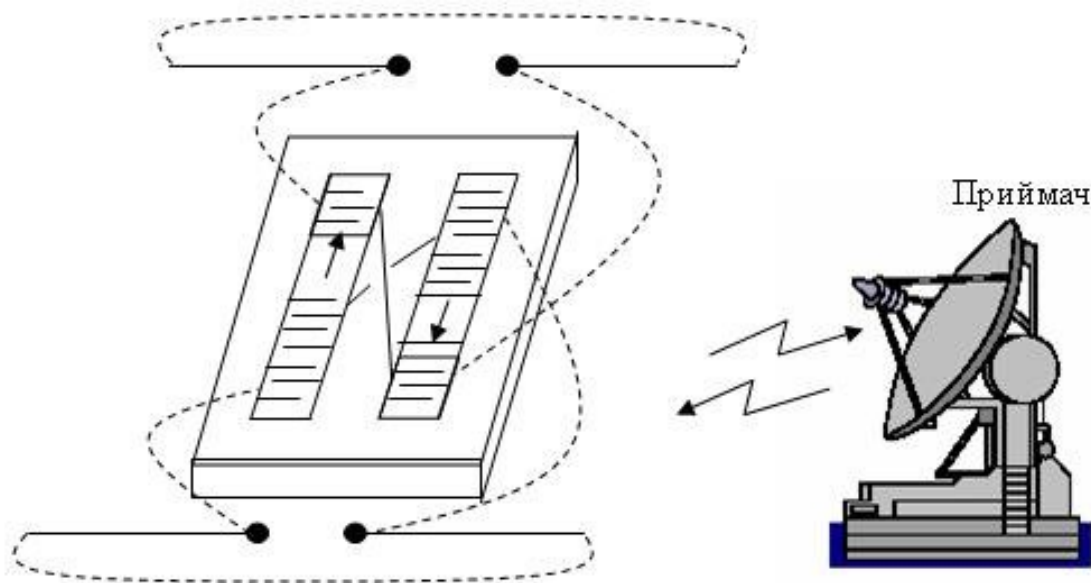


Рис. 5. Схема пасивного акустoeлектронного датчика кутової

Висновки

Таким чином, ДКШ з резонатором або з ЛЗ є перспективним і їх схеми можна обрати в якості базових для побудови безпроводних акустоелектронних датчиків кутової швидкості.

Вимірювання кутової швидкості при фазовій модуляції вихідного сигналу з лінії затримки дозволяє отримати чутливість до 0,1%, що, в свою чергу, задовольняє сучасним вимогам до вимірювачів кутової швидкості малих маневрених об'єктів. Безпроводний амплітудний резонаторний вимірювач кутової швидкості в перспективі може мати вищу чутливість - до 0,02%- за умови побудови його за квазідиференційною вимірювальною схемою .

Список використаної літератури

1. *Павловский М. А.* Деформационные, температурные и гироскопические эффекты в автогенераторах на поверхностных акустических волнах / М. А. Павловский, В. К. Лопушенко, Н. Г. Черняк // Механика гироскопических систем. – 1990. – Вып.9. – С.50-56.
2. *Пятышев Е. Н.* Микротехнологии: от микроэлектроники к микросистемной технике// Е. Н. Пятышев, М. С. Лурье, Ю. Д. Акулин, А. И. Скалон //Датчики и системы – 2001 – №6 – С.58-65.
3. *Pohl A.* Measurement of mechanical parameters utilizing passive sensors// A. Pohl, R. Steindl Proc. Mechatronics. – Sweden. – 1998.– pp.571-576.
4. *Wireless Passive Radio Sensors – L.Reindl, R.Steindl, Ch. Hausleitner, A. Pohl, G. Scholl. – Sensors 2001 Proceeding I – В. 8.5 – pp. 331-336.*
5. *U.S.Patent 4,384,409, Int.Cl.: G01P3/44. Surface acoustic wave gyroscope / Binneg Y.Lao, Rancho Palos Verdes (USA), Calif. – No.: 195027; Filed: Oct.18, 1980; Publ.: May 24, 1983; U.S.Cl: 33/318; 73/505 – 24p.*
6. *PCT WO 00/79217 A2, Int.Cl. G0C. Micro-Electro-Mechanical Gyroscope/ Varadan, Vijay, K. (USA) and other. – 28 December 2000. – 40p.*
7. *Кочемасов В. Н.* Генерация и синтез частот с применением приборов на поверхностных акустических волнах // Зарубежная радиоэлектроника. М.: Советское радио. – 1979. – №1 – С.96-129.
8. *Baylor L. R.* Digital electrostatic electron-beam array lithography. // L. R. Baylor, D. H. Lowndes, M. L. Journal Vac. Sci. Techol., В 20(6), pp. 2646-2650 (2002).

