

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет _____ електроніки _____
(повна назва)

Кафедра _____ мікроелектроніки _____
(повна назва)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ О. В. Борисов _____
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 2019 р.

**Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра**

з напрямку підготовки _____ 6.050801 «Мікро- та наноелектроніка» _____
(код і назва)

на тему _____ Сенсор на поверхневих акустичних хвилях _____

Виконав: студент _____ 4 курсу, групи _____ ДП-51
_____ Шафаренко Юрій Сергійович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник роботи _____ проф. Вербицький Володимир Григорович _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Консультанти:

з нормоконтролю _____ доц., к.т.н. Орлов А. Т. _____
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали) (підпис)

з інформаційних технологій _____ ст. викл., к.т.н. Діденко Ю. В. _____
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____ _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає запозичень
з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет (інститут) електроніки
(повна назва)

Кафедра мікроелектроніки
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки 6.050801. Мікро- та наноелектроніка
(код, назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

О. В. Борисов
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ___ ” _____ 2019 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

групи ДП-51 Шафаренку Юрію Сергійовичу

(група, прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Сенсор на поверхневих акустичних хвилях

Керівник роботи Вербицький Володимир Григорович,
проф.
(прізвище, ім'я, по батькові, посада, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджено наказом по університету від “ ___ ” _____ 2019 р. № _____

2. Термін здачі студентом закінченого проекту (роботи) “ 04 ” червня 2019 р.

3. Вихідні дані роботи Сенсор на поверхневих акустичних хвилях

4. Перелік питань, які мають бути розроблені

1. Огляд літератури.

2. Побудова оптоелектронних сенсорів.

3. Принцип дії та основні характеристики.

4. Способи контролю фізичних величин сенсорів на ПАХ.

5.

Висновки

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу 1. Схеми значень відносної зміни швидкості поширення ПАХ. 2. Способи контролю фізичних величин у сенсорах на ПАХ. 3. Варіанти конструктивного виконання ЧЕ сенсорів

6. Консультанти розділів роботи:

з технологічних питань _____

(назва розділу)

(підпис, вчене звання, посада, ПІБ)

7. Дата видачі завдання “22” лютого 2019 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН
виконання дипломної роботи**

№ з/п	Назва етапів виконання роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання
1	Огляд літератури та постановка задач по дипломній роботі.	18.04.2019	
2	Опрацювання матеріалів, виконання практичних завдань.	28.04.2019	
3	Висновки по переддипломній практиці .	01.05.2019	
4	Написання звіту по практиці.	06.05.2019	
5	Підготовка матеріалів для дипломного проекту.	15.05.2019	
6			
7			

Завдання прийняв до виконання _____

(підпис)

Ю.С. Шафаренко _____

(ініціали, прізвище)

Керівник дипломної роботи _____

(підпис)

В.Г. Вербицький _____

(ініціали, прізвище)

АНОТАЦІЯ

до бакалаврської дипломної роботи Шафаренка Юрія Сергійовича

на тему: «Сенсор на поверхневих акустичних хвилях»

В даній роботі викладено 49 сторінок тексту. Містить 6 розділів, 9 ілюстрацій та 6 таблиць.

В роботі проведений аналіз сенсорів на ПАХ. Принцип побудови чутливого елемента та його конструктивне виконання.

В першому розділі розглянуто фізичні основи сенсорів на ПАХ.

В другому – способи їх контролю.

В третьому – сенсори сили на ПАХ.

В четвертому – сенсори тиску на ПАХ.

В п'ятому - сенсори прискорення на ПАХ.

В шостому – сенсори електричної напруги на ПАХ.

Також виявлені недоліки вже існуючих методів побудови та використання і запропоновані шляхи їх вирішення.

ANNOTATION

to the bachelor thesis of Shafarenko Yuriy Sergeevich
on the theme: "Sensor on surface acoustic waves"

In this paper 49 pages of text are presented. Contains 6 sections, 9 illustrations and 6 tables.

The analysis of sensors on SAW is carried out. The principle of constructing a sensitive element and its constructive execution.

In the first section the physical bases of sensors on SAW are considered.

In the second - the ways of their control.

In the third - the sensors of force on SAW.

In the fourth - pressure sensors on SAW.

In the fifth - sensors of acceleration on SAW.

In the sixth - sensors of electric voltage on SAW.

Also found deficiencies of already existing methods of construction and use and proposed ways to solve them.

ЗМІСТ

1. ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
Вступ.....	12
1 Фізичні основи сенсорів на ПАХ.....	15
2 Способи контролю фізичних величин.....	25
3 Сенсори сили на ПАХ.....	28
4 Сенсори тиску на ПАХ.....	34
5 Сенсори прискорення на ПАХ.....	40
6 Сенсори електричної напруги на ПАХ.....	43
Висновки.....	45
Перелік посилань.....	46

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ПАХ	– поверхневі акустичні хвилі
ЧЗ	– чистий згин звукопроводу парою сил;
ЗК	– згин звукопроводу у вигляді навантаження вільного кінця консолі
ЧЕ	– чутливий елемент
Ап	– ступінь перекриття (аподизації електродів)
Сн	– концентрація водню
D	– електрична індукція

d_{ijk}	– п'єзоелектрична стала вздовж j -го напрямку в i -тій площині
E	– напруженість електричного поля
E_k	– напруженість електричного поля в k -ому напрямку
$E_{ю}$	– модуль пружності (модуль Юнга)
e_{ijk}	– п'єзоелектричний коефіцієнт
F	– сила
f	– частота акустичних коливань
f_0	– резонансна частота перетворювача
f_p	– частота власних коливань пластини
G	– прискорення
J	– момент інерції
$K_{п}$	– коефіцієнт підсилення
k	– коефіцієнт електромеханічного зв'язку
M	– згинальний момент
НТУУ «КПІ»	– Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

m	– маса
N	– частотний коефіцієнт
N_e	– кількість електродів
N_{en}	– кількість пар електродів
n	– номер гармоніки
p	– тиск
Q_a	– акустична добротність
Q_{el}	– електрична добротність

q	– хвильовий вектор
S	– деформація
S_F	– чутливість сенсора до сили
S_G	– чутливість сенсора до прискорення
S_{ij}	– тензор пружної деформації
S_P	– чутливість сенсора до тиску
T	– температура
T_0	– температура

- t – час
- U – вектор зміщення частинок у твердому тілі
- U_e – зовнішня напруга
- U_ϕ – напруга на виході фазового детектора
- $U_{m\phi}$ – максимальна напруга на виході фазового детектора
- u – механічне зміщення
- v – швидкість поширення акустичної хвилі

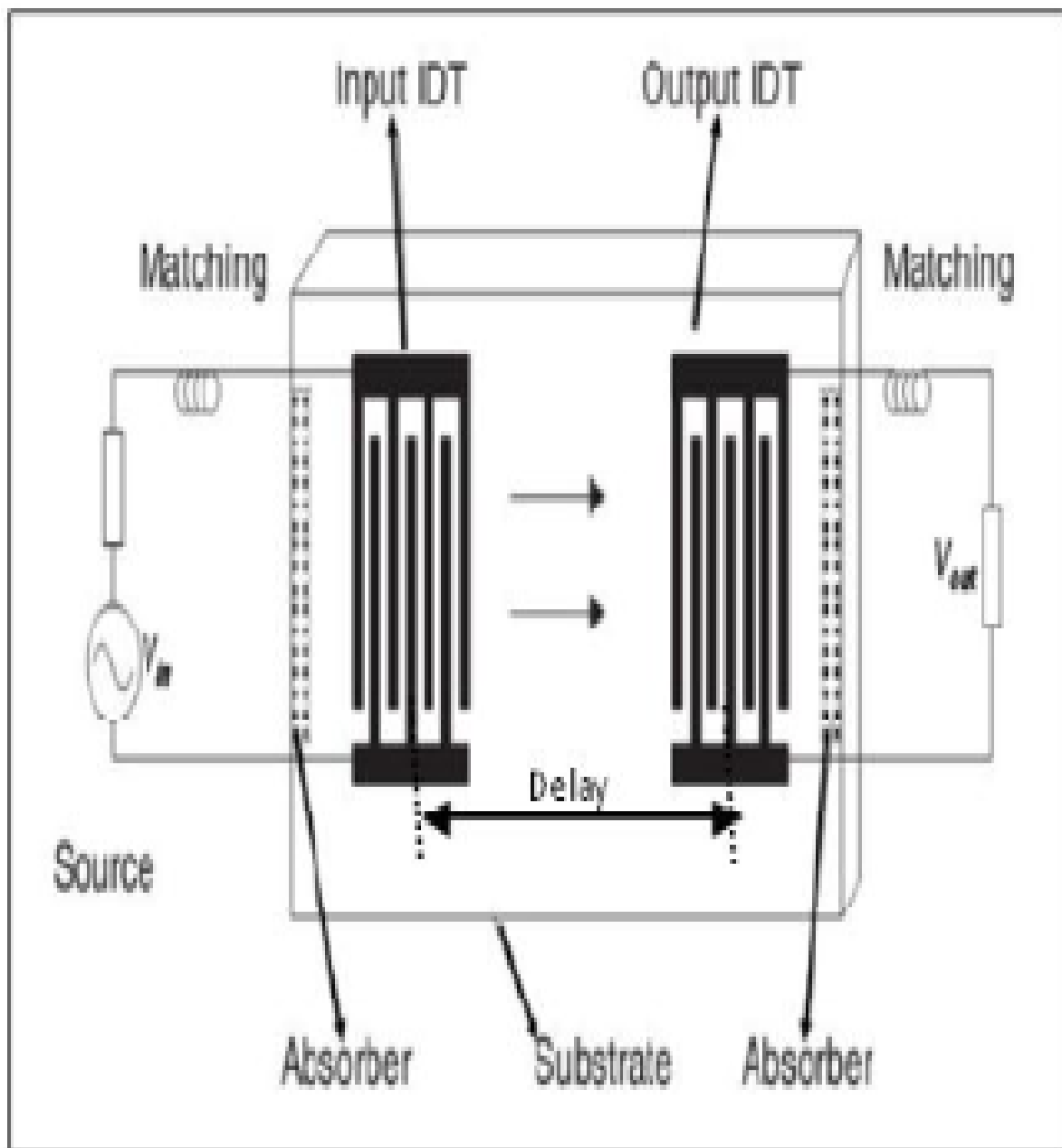
v_{ϕ}

– фазова швидкість

ВСТУП

Поверхневі акустичні хвилі (ПАХ) пристроїв на основі п'єзоелектричних матеріалів були в комерційному використанні протягом понад 60 років. Вони використовуються в широко-різноманітному застосуванні, як лінії затримки, осцилятори, резонатори, датчики, приводи, акустична мікроскопія, так і в мобільних телефонах. Ця галузь щорічно споживає близько трьох мільярдів акустичних фільтрів для керування частотою. Фільтри, як правило, базуються на резонансній технології і насипної акустичної хвилі. Зазвичай використовуються п'єзоелектричні матеріали в пристроях ПАХ - монокристалічні субстрати ST-XQuartz (SiO_2), танталат літію (LiTaO_3) і літійніобат (LiNbO_3). Поверхня п'єзоелектричної підкладки виробляють затримку часу між двома міжробочими перетворювачами. У 1965 році Whiteand Voltmer висунув концепцію InterdigitalTransducer (IDT) як джерело або приймач поверхневих хвиль. IDTs розміщуються на поверхні п'єзоелектричних субстратів для генерування і прийому ПАХ. Тривалість проходження між приймачем і передавачем IDT називається Часом затримки. Зміна довжини подорожі ПАХ між IDT може бути оброблена, щоб отримати затримки з різною величиною, як правило, в діапазоні

1-50 мкс. Площа між генератором і приймачем ІДТ дуже чутлива до поверхні збурення, подібного масовому навантаженню, і ця область, як правило, покрита хімічно селективним шаром для адсорбції видів в датчиках ПАХ. Датчики ПАХ широко використовувалися для виявлення газоподібних, хімічних і біологічних видів. З появою нанотехнологій і іншої техніки моделювання для того ж, були зроблені зусилля для підвищення чутливості датчиків ПАВ шляхом інтеграції наноструктур на активну поверхню датчиків.



1 Фізичні основи сенсорів на ПАХ

Принцип дії інформативних перетворювачів (сенсорів), а саме сенсорів на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ), базується на термодинамічному зв'язку термічних, електричних, магнітних і пружних параметрів середовища розповсюдження, а крім того можливості регулювати електрофізичними характеристиками середовища, а саме властивостями поширення ПАХ, за підтримки зовнішніх впливів різної фізичної природи: термічних, електро, магнітних, корпускулярних або полів мехічних сил.

Чутливість структури на ПАХ до різного типу впливів визначається параметрами середовища розповсюдження ПАХ, властивостями довкілля, напрямком поширення хвилі та особливостями конструкції.

Незалежно від матеріалу чутливого елемента (ЧЕ) величина набігу фази Ψ визначається як

$$\Psi = \omega\tau = 2\pi f \frac{l}{v}$$

де v – фазова швидкість;

f – частота;

l – відстань між двома точками звукопроводу;

$\tau = l/v$ – часова затримка ПАХ.

В сенсорах механічних величин для отримання основних інформативних параметрів використовується тензопружні взаємодії. Загальний вираз для

відносної зміни швидкості ПАХ, отриманий при аналізі тензопружної взаємодії та справедливий і для зовнішніх дій різної фізичної природи, тобто може застосуватися для аналізу сенсорів різних фізичних величин.

Деформація підкладки в результаті дії механічних сил приводить до зміни швидкості поширення ПАХ Δv внаслідок тензопружної взаємодії. Сумарна відносна зміна набігу фази визначається виразом:

$$\frac{\Delta \Psi}{\Psi} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta v}{v} = S - \frac{\Delta v}{v},$$

де S – деформація в напрямку поширення ПАХ.

Для розрахунку величини тензопружних взаємодій зміна швидкості при поширенні ПАХ в деформованому середовищі пов'язується зі зміною модулів пружності під дією деформації та густини деформованої речовини, поширенням ПАХ в середовищі зі механічними напругами, а також зумовлюється зміною товщини плівки під дією деформації для перетворювачів на основі шаруватих структур.

Вплив початкових механічних напруг середовища σ_{ik} враховується в рівняння руху:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} = \left(\sigma_{ik} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial z_{ij}}{\partial x_i} = \rho \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2}, \quad j=1,2,3,$$

де Z – механічна напруга; ρ – густина; u – механічне зміщення; x – координата, t – час.

Взаємозв'язок між відповідними змінними описується за допомогою ряду лінійних рівнянь:

$$S_{ke} = \frac{1}{2} (u_{k,e} + u_{e,k}),$$

$$D_{i,i} = 0,$$

$$E_i = -\varphi, i,$$

$$Z_{ij} = c_{ijkl} S_{ke} - e_{nij} E_n,$$

$$D_m = e_{mek} S_{ke} + \varepsilon_{mn} E_n,$$

де D , E та φ – відповідно електрична індукція, напруженість електричного поля та потенціал;

c_{ijkl} – модулі пружності;

e_{ijk} – п'єзоелектричні коефіцієнти;

ε_{ij} – діелектричні проникності;

Підстановка цих відношень в перше та друге рівняння дає :

$$\sigma_{il} u_{j,ki} + c_{ijk\epsilon} u_{k,\epsilon i} + e_{kij} \varphi_{ki} = \rho u_j, j = 1,2,3,$$

$$e_{ike} u_{k,\epsilon i} - \varepsilon_{ik} \varphi_{ki} = 0.$$

Вважаючи, що розв'язком рівняння є хвиля зі швидкістю v , циклічною кутовою частотою ω та сталою затухання α , отримаємо:

$$u_i = \beta_i \exp(-\alpha\omega x_3) \exp[j\omega(t - \frac{x_1}{v})], j=1,2,3,$$

$$\varphi = \beta_4 \exp(-\alpha\omega x_3) \exp[j\omega(t - \frac{x_1}{v})].$$

Після підстановки можна отримати систему рівнянь для змінних $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$.

На основі змінених значень сталих пружності та густини розраховується відносна зміна швидкості при одиничній деформації в напрямку поширення ПАХ.

На рис. 1 наведені результати розрахунків для різних матеріалів при

деформації звукопроводу шляхом навантаження вільного кінця консольно закріпленої пластини.

Для всіх розглянутих матеріалів при додатній деформації (розтягуванні) звукопроводу зміна густини приводить до зростання швидкості поширення ПАХ. В LiNbO_3 та кварці зрізів YZ і YX ефекти, зумовлені початковими напруженнями та зміною модулів пружності, взаємно компенсуються, тому повна відносна зміна швидкості незначна, тобто для вказаних матеріалів вплив відносної зміни швидкості на величину набігу фази ПАХ малий у порівнянні з впливом зміни геометричної довжини траєкторії поширення ПАХ у деформованому середовищі. Для інших матеріалів (плавлений кравц, плівка ZnO) внески різних механізмів у зміну швидкості мають однаковий знак, що приводить до значної зміни швидкості при деформації.

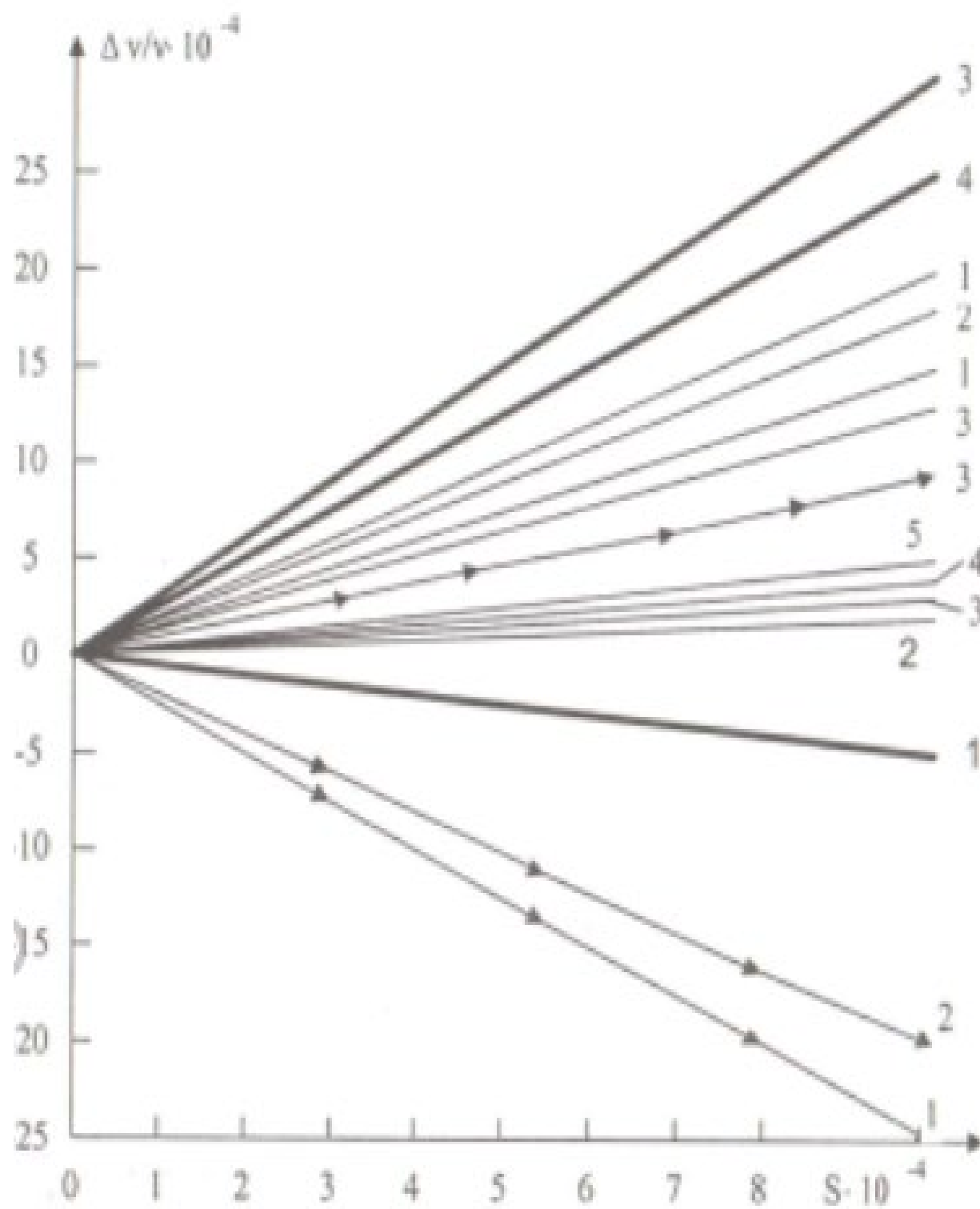


Рис. 1. Розраховані значення відносної зміни швидкості поширення ПАХ, зумовлені наявністю: початкових напруг, зміною модулів пружності, зміною густини та сумісним ефектом:

1 – YX – кварц;

2 – YZ-LiNbO₃;

3 – плавлений кварц;

4 – плівка ZnO на плавленому кварці

Відомі також інші підходи до визначення зміни швидкості поширення ПАХ у деформованому середовищі. Одна з моделей на основі однорідних кінчених деформації описує пружні нелінійності за допомогою диференціальних рівнянь без граничних умов, інша враховує граничні умови. В узагальнені моделі для розрахунку параметрів поширення хвилі використовуються лінеаризовані рівняння що враховують нелінійний зв'язок між статичною деформацією і високочастотної хвилею, сталі пружності 2-го та 3-го порядків, градієнти статичних напруг та деформації.

Установлено, що практично для всіх матеріалів (за винятком п'єзо кераміки) в 1-му наближенні $\Delta v/v$ та $\Delta\Psi/\Psi$ лінійно залежить від повздовжньої та поперечної деформації, що дозволяє визначити швидкість поширення ПАХ та величину набігу фази деформованому у середовищі як:

$$v = v_0(1 + \gamma_n S_n),$$

$$\Psi = \Psi_0(1 + \xi_n S_n),$$

де γ_n та ξ_n – коефіцієнти деформаційної чутливості швидкості та фази ПАХ відповідно; S_0 - деформація; індекс 0 означає недеформований стан, індекс 1 – напрямок деформації відносно напрямку поширення ПАХ (для n=1 і n=2

деформації відповідно паралельні і перпендикулярні до напрямку поширення ПАХ, $n=3$ означає нормальні поверхні поширення ПАХ).

В табл. 1 наведені теоретичні та експериментальні значення коефіцієнтів деформаційної чутливості швидкості γ_n фази ξ_n ПАХ. Величина та характеру відносно зміни швидкості ПАХ, а також внесок зміни швидкості в сумарну зміну фази ПАХ залежить від матеріалу і зрізу звукопроводу та орієнтації вектора групової швидкості відносно кристалографічних осей і напрямків головних напруг. Слід відзначити досить значний розходжень теоретичних та експериментальних даних, що можна пояснити точністю використаних видалити різниці в моделях пружності, зокрема 3-го порядку.

При поширенні ПАХ у деформованому звукопроводі з п'єзокераміки на основі PbTiO_3 залежність швидкості від деформації має сильно нелінійний (практично квадратичний) характер. Аномально великий деформаційний коефіцієнт швидкості ПАХ ($\gamma \approx 10$) пояснюється зміною залишкової поляризації за рахунок руху границь доменів і робить даний матеріал зручним для створення сенсорів механічних величин.

За принципом дії перетворювачі на ПАХ можна поділити на три основні групи, а саме:

- на основі біжучої ПАХ;
- на основі стоячої ПАХ;
- на основі додавання кількох ПАХ.

Основним елементом перетворювачів з біжучої ПАХ є акустичний тракт на основі лінії затримки. Вплив зовнішніх дій різної фізичної природи приводить до зміни характеристик біжучої ПАХ, що викликає зміну набігу фази та часову затримку ПАХ при її розповсюдженні від вхідного перетворювача до вихідного.

Перетворювач зі стоячою ПАХ оснований на використанні акустичного резонатора. Зовнішні дії викликають зміну швидкості ПАХ та геометричних розмірів резонатора (при деформації звукопроводу), що приводить до зміни резонансної частоти.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів деформаційної чутливості швидкості γ_n та фазового набігу ξ_n ПАХ

Матеріал	Зріз, напрям поширення ПАХ	Спосіб завантаження звукопроводу	Тип	Теоретична величина γ_n	Експериментальна величина γ_n	Тип	Теоретична величина ξ_n	Експериментальна величина ξ_n
Кварц	Y, X	ЧЗ	γ_1	-	0,439	ξ_1	-	+0,561
			γ_1	-0,23	-	-	-	-
			γ_2	-0,58	-	-	-	-
			γ_2	-	1,319	ξ_2	-	-1,28
			γ_2	1,69	-	-	-	-
	ST, X	ЗК ЧЗ	γ_2	1,19	-	-	-	-
			γ_2	-0,45	-	ξ_1	1,33	0,9
			γ_2	-	-0,002	ξ_1	-	1,002
			γ_2	-0,624	-	-	-	-
			γ_1	-1,38	-	-	-	-

			γ_1	-	-0,164	ξ_2	-	0,16
			γ_1	0,425	-	-	-	-
			γ_1	-0,25	-	-	-	-
			γ_2					
			γ_2					
			γ_2					
LiNbO ₃	Y, Z	ЗК	γ_1	0,25	-	ξ_1	0,43	1,24
		ЧЗ	γ_1	-	-0,28	ξ_1	-	1,28
			γ_1	0,4	-	-	-	
			γ_1	-1,76	-	-	-	
			γ_2	-0,34	-	-	-	
Плівка SiO ₂ на LiNbO ₃	X, Y	ЧЗ	-	-	-	ξ_1	-	0,2
			-	-	-	ξ_2	-	0,1
Кремній	(111), <211>	ЗК	γ_1	-	2,07	ξ_1	-	-1,07
Плавле ний кварц	-	ЗК	γ_1	3,01	-	ξ_1	-2,01	-
		ЧЗ	γ_1	3,21	-	-		
Плівка ZnO ТОВЩИН	-	ЗК	γ_1	2,6	2,6	ξ_1	-1,6	-1,6

ою б мкм на плавлен ному кварці								
П'єзоке раміка на основі РbTiO3	-	ЧЗ	γ_1	-	10	ξ_1	-	-9

Принцип дії перетворювача з додаванням ПАХ оснований на інтерференції кількох (зазвичай двох) ПАХ на поверхні звукопроводу. Вихідний сигнал таких перетворювачів є наслідком фази та (або) амплітуди однієї з взфемодіючих біжучих ПАХ під впливом зовнішніх дій, наприклад, деформації звукопроводу.

2 Способи контролю фізичних величин у сенсорах на ПАХ

Для контролю величини зовнішніх дій у перетворювачах на ПАХ використовуються часовий, фазовий, частотний та диференційно-частотний методи (рис.2).

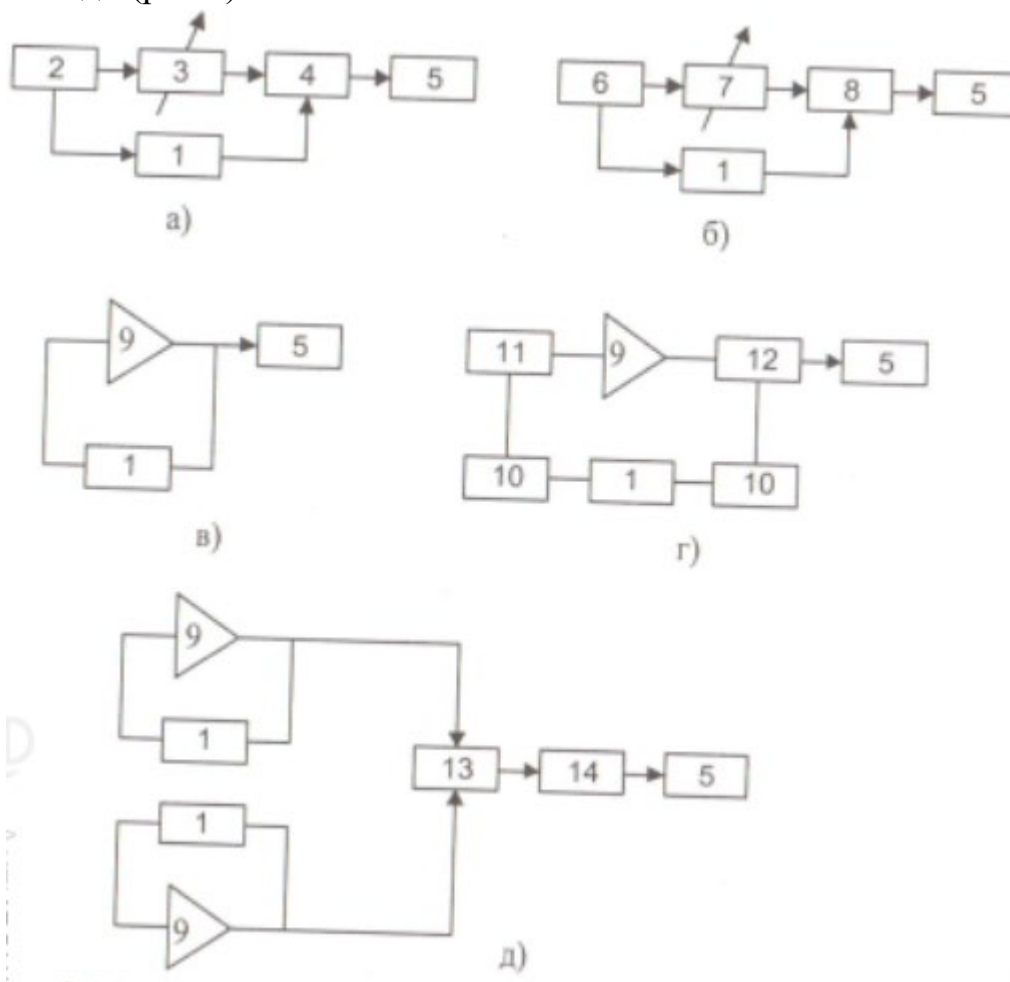


Рис. 2. Часовий (а), фазовий (б), частотний (в,г) та диференційно-частотний (д) методи контролю величини зовнішніх дій у перетворювачах на ПАХ: 1- ПАХ-структура; 2- генератор коротких імпульсів; 3- схема регулювання затримки; 4- блок вимірювання часових інтервалів; 5- пристрій реєстрації; 6-генератор неперервних сигналів; 7- регульований фазообертач; 8- фазовий детектор; 9- підсилювач; 10- узгоджувальний пристрій; 11- атенюатор; 12- пристрій розв'язування; 13- змішувач; 14- фільтр нижніх частот

В часовому методі контролю (рис.2, а) вимірюється зміна величини затримки $\Delta\tau$ поширення імпульсу між вхідним та вихідним перетворювачами при зовнішніх діях на підкладку:

$$\Delta\tau = \tau_0 \left(\frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta v}{v} \right),$$

де τ_0 , v , L – відповідно час затримки, швидкість поширення ПАХ та геометричні розміри в недеформованому середовищі; Δv , ΔL - величина зміни швидкості поширення ПАХ та геометричних розмірів у деформованому середовищі.

Тривалість радіоімпульсу τ_i , що подається від генератора імпульсів 2 на вхідний перетворювач лінії затримки 1 повинна бути меншою від часу його поширення в лінії затримки $\tau_i < \frac{L}{v}$. Схема регулювання затримки 3 призначена для підстроювання нульової точки пристрою реєстрації 5.

У фазовому методі (рис.2,б) вимірюється зміна величини набігу фази $\Delta\Psi$ при поширенні ПАХ від вхідного до вихідного перетворювача при зовнішніх діях на підкладку:

$$\Delta\Psi = \Psi_0 \left(\frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta v}{v} \right).$$

Фазообертач 7 виконує підстроювання вихідного сигналу фазового детектора 8, що порівнює фази сигналів на вході та виході лінії затримки на ПАХ 1.

Частотний метод (рис.2,в) базується на вимірюванні зміни набігу фази, що перетворюється в частотний вихідний сигнал шляхом ввімкнення лінії затримки 1 в коло зворотного зв'язку підсилювача 9, тобто створення ПАХ-генератора. Умови самозбудження ПАХ-генератора:

$$\beta_r K_n \geq 1$$

$$\Psi_\Sigma = \Psi + \Psi_E = 2\pi m$$

де β_r - повні втрати, що вносяться в петлі генератора; K_n - підсилення підсилювача; Ψ_Σ - повний фазовий зсув в петлі генератора; Ψ_E - сумарний фазовий зсув в колах підсилювача, вхідному і вихідному перетворювачах та в узгоджувальних колах; $m=1,2,3\dots$ - ціле число, що визначає моду коливання.

З рівнянь можна визначити частоту генерації:

$$f = \frac{m - \Psi_E/2\pi}{\tau}.$$

Зміна Ψ та τ примушує систему змінювати частоту генерації так, щоб

компенсувати їй шляхом підстроювання Ψ_{Σ} до величини, кратної 2π .

Отже перетворювач на ПАХ-генераторі має частотний вихідний сигнал, який, наприклад, в сенсорах механічних величин залежить від величини деформації.

Стабільність ПАХ-генератора визначається фазовою стабільністю компонентів у його петлі. Реальна схема перетворювача на ПАХ-генераторі (рис.2, г) містить узгоджувальні пристрої 10 для узгодження вхідного та вихідного імпедансів структури на ПАХ 1 з навантаженням, атенюатор 11 для отримання потрібного рівня потужності в петлі генератора та пристрій розв'язування 12 для усунення впливу пристрою реєстрації 5.

Диференційно-частотний метод (рис.2,д) дозволяє підвищити чутливість перетворювача та знизити його температурну нестабільність шляхом порівняння (віднімання) вихідних сигналів двох ПАХ-генераторів у змішувачі 13 і виділення сигналу різницевої частоти на фільтрі нижніх частот 14.

Перетворювачі на основі стоячих хвиль з ПАХ-резонаторами мають ряд переваг у порівнянні з перетворювачами біжучих хвиль з лініями затримки:

- забезпечується значно більша ефективна добротність та значно менші втрати, що зумовлено накопиченням енергії в порожнині резонатора;
- збільшується чутливість перетворювача;
- зменшується потужність споживання та чутливість до технологічних дефектів.

Крім швидкості, під впливом зовнішніх дій можуть змінюватися інші характеристики поширення ПАХ, наприклад, величина затухання. Але вимірювання цих величин рідко застосовується в сенсорах, оскільки приводить до зниження точності і чутливості та звуження динамічного діапазону в порівнянні з розглянутими методами, основаними на зміні швидкості (набігу фази) ПАХ.

На сьогодні найбільшого поширення на практиці набув частотний метод контролю величини зовнішніх дій на основі генераторної схеми. Цей метод досить універсальний, має високі чутливість та точність, характеризується високою завадостійкістю, відносно простий у реалізації, зручний для подальшого оброблення сигналу за допомогою цифрових схем.

3 Сенсори сили на ПАХ

Як чутливі елементи сенсорів сили та тиску на ПАХ використовуються пружні елементи з однією або кількома структурами на ПАХ у вигляді лінії затримки або резонаторів. Класифікація способів побудови ЧЕ сенсорів сили на ПАХ наведена в табл.2, варіанти конструктивного виконання – на рис.3 .

Однією з основних характеристик сенсорів сили є силова чутливість або коефіцієнт перетворення вхідної величини (сили F) у вихідну (частоту f):

$$S_F = \frac{\partial f}{\partial F}$$

Найбільш поширеним ЧЕ є консольно закріплена пластина, що працює на згин (рис.3,а). Максимальна абсолютна зміна довжини для такої пластини

$$\Delta l_{max} = -\frac{F a^2 l}{4E_{ю}J}$$

де l - початкова довжина пластини; h – товщина пластини; $E_{ю}$ - модуль Юнга;

$J = \frac{bh^3}{12}$ - момент інерції прямокутної пластини; b – ширина пластини.

Таблиця 2

Класифікація принципів побудови ЧЕ сенсорів сили на ПАХ

Принцип побудови ЧЕ	Особливості функціонування ЧЕ	Тип ПАХ	Конструктивне виконання ЧЕ
Консоль, що працює на згин	Деформація вздовж напрямку поширення ПАХ, одногенераторна схема; ПАХ-структура на різних поверхнях, диференційна схема; ПАХ-структура на одній поверхні,	Біжуча	Рис.3,а,б,в
		Біжуча (стояча)	Рис.3,г
		Біжуча	Рис.3,д

	диференційна схема; ЧЕ з рівномірною напругою та однаковим опором згину		Рис.3,е,є
Консоль	ЧЕ з рівномірною напругою, навантажений чистим моментом згину		Рис.3,ж
Пластина, що працює на розтяг (стиснення)	Повздовжня поверхнева інформація	Біжуча (стояча)	Рис.3,з
Пластина, закріплена на краях	Навантаження зосереджене в центрі пластини	Біжуча	Рис.3,и
Пластина на шарнірах	Навантаження зосереджене в центрі пвстини; ЧЕ навантажений чистим моментом згину	Біжуча (стояча)	Рис.3,і Рис.3,ї

Недоліком розглянутої конструкції ЧЕ є розташування одного з перетворювачів ПАХ на вільному кінці пластини, що погіршує метрологічні характеристики сенсора. Для усунення цього недоліку обидва перетворювачі розташовуються поблизу місця закріплення пластини, а на її вільному кінці виконується відбивач. Відбивачем ПАХ може бути звичайний зустрічно-штировий перетворювач, до виводів якого приєднана індуктивність, настроєна в резонанс з ефективною ємністю електродної структури перетворювача (рис.3,б). Недолік цієї конструкції, що полягає в попаданні частини відбитої хвилі на вхідний перетворювач, можна усунути, виготовивши перетворювач у вигляді 90° - призми (рис.3,в).

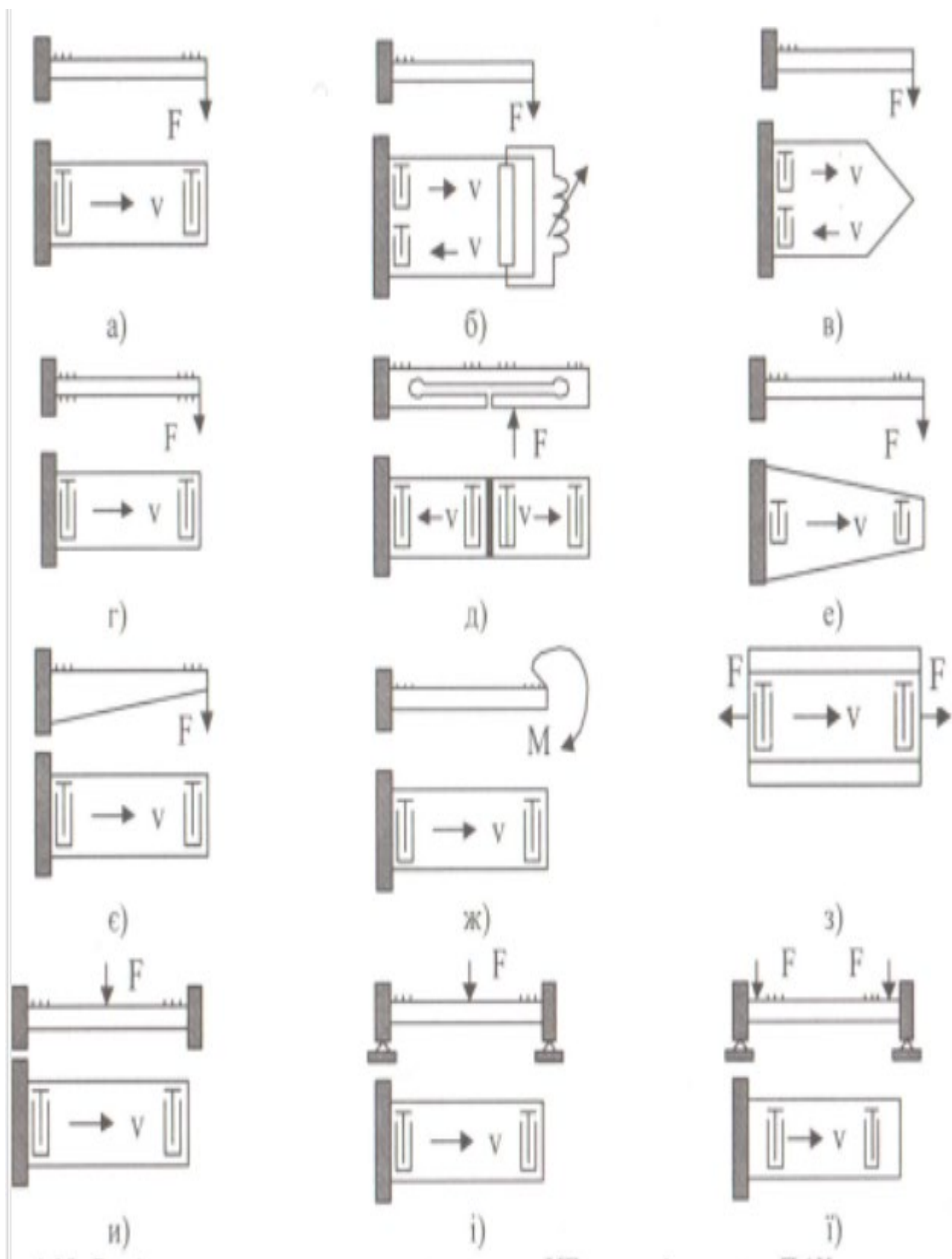


Рис. 3. Варіанти конструктивного виконання ЧЕ сенсорів сили на ПАХ: консоль, що працює на згин (а,б,в,г,д,е,є); консоль з моментом згину (ж); пластина, що працює на розтягування (з); поастина, закріплена на краях (и); пластина на шарнірах (і,ї)

Диференційна схема дозволяє підвищити силову чутливість сенсорів приблизно в 2 рази та забезпечити високу температурну стабільність. В цьому випадку обидва зустрічно-штирові перетворювачі ПАХ розташовуються на протилежних поверхнях пластини (рис.3, г) або на 1 поверхні консолі спеціальної форми (рис.3,д), де на ділянках, що мають деформацію протилежних знаків.

Інші методи підвищення силової чутливості консольних ЧЕ, які працюють на згин, полягає у використанні пружних елементів з рівномірною механічною напругою, що досягається забезпеченням постійного радіуса кривизни поверхні при згині. Для цього пружний елемент виконується в формі балки однакового опору згину шляхом зміни її ширини (рис.3, е) чи товщини (рис.3, є), або навантажується часто моментом згину (рис.3, ж).

ЧЕ у вигляді пластини, що працює на розтяг (стиснення) мають в 5...10 разменше силову чутливість форми (рис.3, з).

Величина абсолютного збільшення довжини пластини, що закріплена на краях форми (рис.3, и) на ділянці від $\frac{1}{4}$ до $3\frac{1}{4}$ (де 1 –початкова довжина пластини) становить:

$$\Delta l_{max} = -\frac{F a^2 l}{64 E_{ю} J}$$

де а – довжина підкладки на ділянках від 0 до $\frac{1}{4}$ та від $3\frac{1}{4}$ до 1

$$\Delta l_{max} = -\frac{F a^2 l}{128 E_{ю} J}$$

Та ж величина для пластини, закріпленої на шарнірах (рис.3, і), у 4 рази менша, ніж для консольної:

$$\Delta l_{max} = -\frac{F a^2 l}{16 E_{ю} J}$$

Для пластини, закріпленої на шарнірах, можна забезпечити розташування ПАХ- структури на ділянці рівномірної деформації згину шляхом навантаження пружного елемента чисто моментом згину за допомогою пари сил(рис.3, ї).

Аналіз розглянутих ЧЕ дозволяє зробити такі висновки:

- високу силову чутливість має консольний ЧЕ, що працює на згин при повздовжній деформації, низьку – консольна пластина при деформації зсуву.
- ЧЕ на основі пластини, що закріплена на кінцях, та пластини на шарнірах рекомендується реалізувати у вигляді диференційної схеми шляхом розміщення

перетворювачів ПАХ на ділянках з протилежними знаками деформації, що дозволяє підвищити силову чутливість і вихідну частоту та забезпечити температурну стабільність;

- силова чутливість ЧЕ з резонаторними структурами на основі стоячої хвилі в загальному випадку вища, ніж на основі біжучої хвилі.

Одна з типових конструкцій сеснора сили на ПАХ показана на рис.4. Лінії затримки 2 та 3 розташовані на паралельних гранях пластини 1, жорстко закріпленої одним кінцем. Акустичний поглинач 4 виключає поширення хвилі за межі резонуючої порожнини генераторів.

При згині звукопроводу в напрямку вприкладення сили F у результаті механічної деформації частота нижнього генератора f_2 - зростає, а верхнього f_1 - падає. Різницева частота Δf , виділена після змішувача 5, пропорційна до прикладеної сили; крутизна характеристики (або чутливість) становить 18 Гц/г.

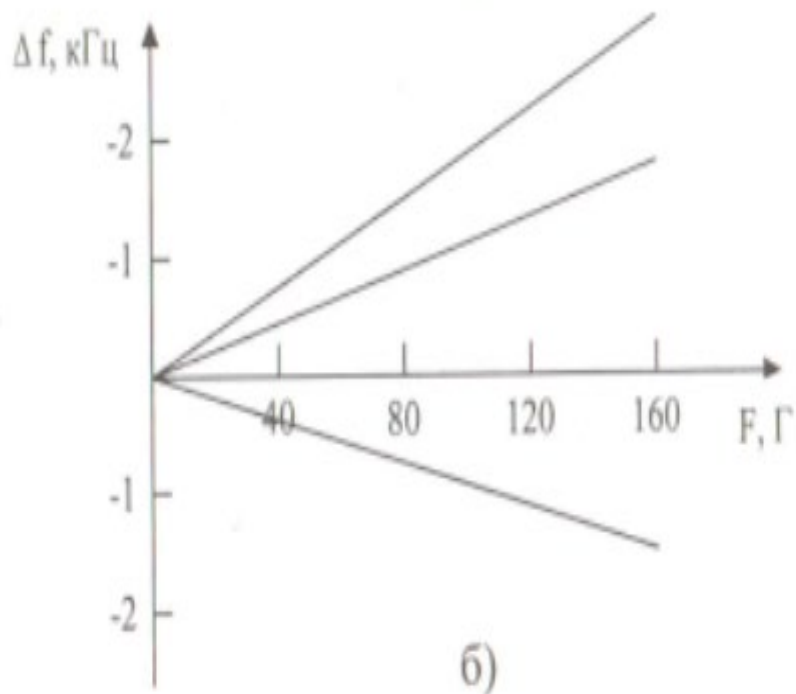
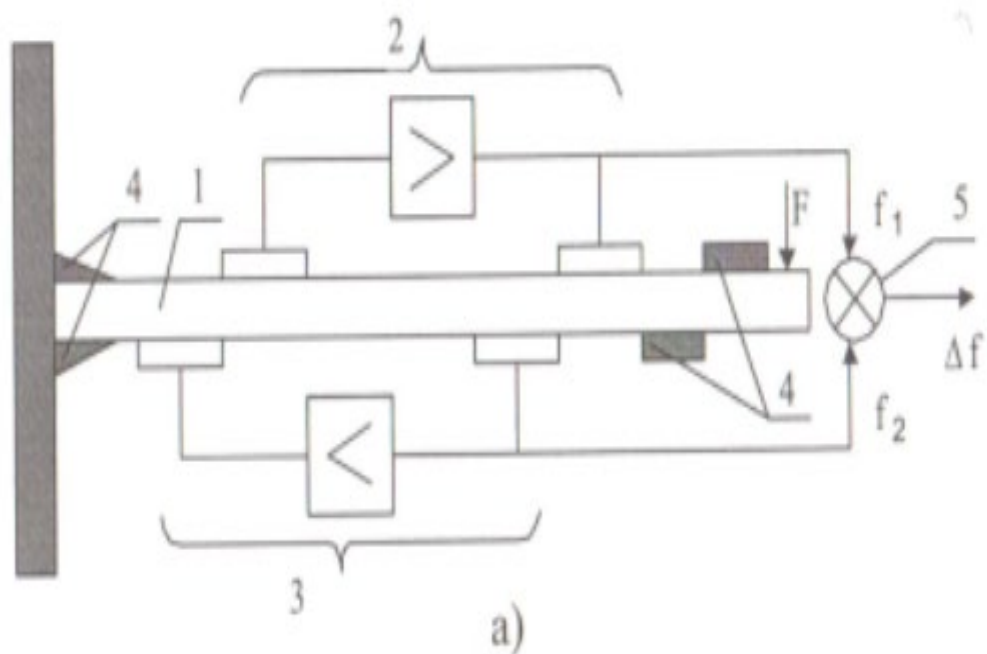


Рис 4. Сенсор сили на ПАХ: а) структурна схема; б) характеристики: 1 – пластина (звукопровід); 2,3 – лінії затримки; 4 – акустичний поглинач; 5 – змішувач.

4 Сенсори тиску на ПАХ

Класифікація способів побудови ЧЕ сенсорів тиску на ПАХ наведена в табл.3, варіанти конструктивного виконання – на рис.5.

Таблиця 5

Класифікація способів побудови ЧЕ сенсорів тиску на ПАХ

Принцип побудови ЧЕ	Тип ПАХ	Конструктивне виконання ЧЕ
Пластина, що працює на стиснення	Біжуча	Рис.5,а
ЧЕ з однією мембраною, одногенераторна схема	Біжуча (стояча)	Рис.5,б,в,г
ЧЕ з двома мембранами, диференційна схема	Біжуча	Рис.5,д,е,є
ЧЕ з однією мембраною, диференційна схема	Біжуча (стояча)	Рис.5,ж,з

Чутливість до тиску, або коефіцієнт перетворення тиску p а частотну частоту f для сенсора з афтогенераторною схемою можна визначити як:

$$S_p = \frac{\partial f}{\partial p}$$

Найпростіший ЧЕ сенсора гідростатичного тиску являє собою пластину жорстко закріплену поверхнею, протилежною до поверхні поширення ПАХ, в якій переважає деформація, нормальна до поверхні поширення ПАХ (рис.5,а). Проте такі ЧЕ мають чутливість порядку одиниць герц при тиску 1 кПа, що недостатньо для більшості практичних випадків.

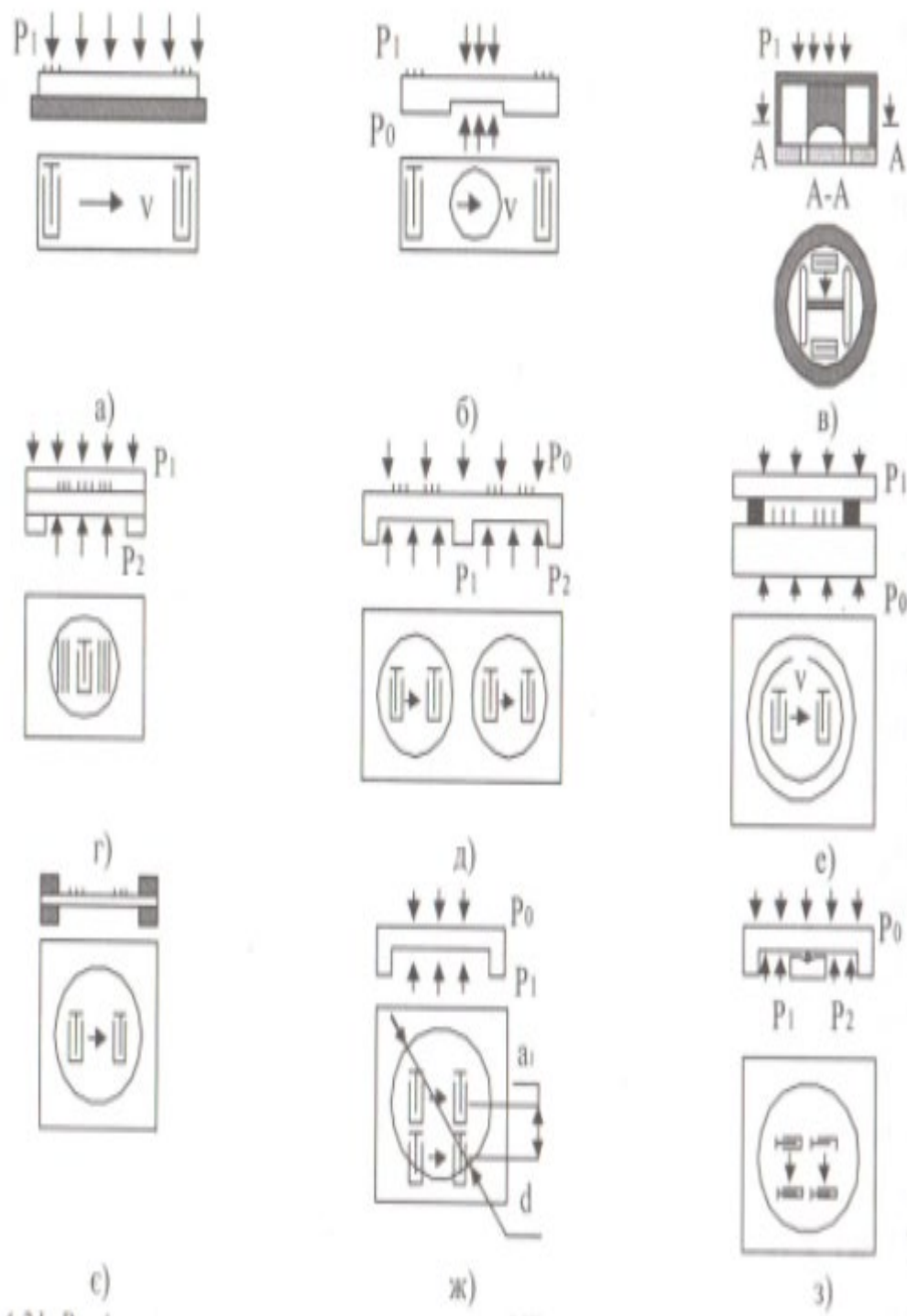


Рис.5. Варіанти конструктивного виконання ЧЕ сенсорів тиску на ПАХ: пластина, що працює стиснення (а); ЧЕ з однією мембраною за одногенераторною схемою (б, в, г); ЧЕ з двома мембранами за диференційною схемою (д, е, є); ЧЕ з однією мембраною за диференційною схемою (ж, з)

Для підвищення чутливості в сенсорах тиску використовуються ЧЕ у вигляді мембрани, в яких на пружному елементі (одній або кількох мембранах) розташовані одна або кілька структур на ПАХ. Траєкторія поширення ПАХ може перетинати всю поверхню мембрани (рис.5,б). Але якщо мембрана піддається тиску, рівномірно розподіленому по її поверхні, реальні напруги в її центральній та периферійній частинах мають протилежний характер. Тому для підвищення чутливості сенсорів структуру на ПАХ розташовують на тих ділянках мембрани, де вона зазнає деформації одного знаку, наприклад, в її центральній частині. Додаткового підвищення чутливості ЧЕ з однією мембраною можна досягти в конструкції, в якій механізм дії тиску на мембрану аналогічний дії сили на консоль. Для цього в мембрані вздовж траєкторії поширення ПАХ виконуються наскрізні щілини. (рис.5,в).

Деякі переваги перед розглянутими мая конструкція ЧЕ з однією мембраною, в якій вся акустична система ізольована між двома з'єднаними підкладками, що утворюють мембрану (рис.5,г).

ЧЕ з однією мембраною можуть працювати як у сенсорах абсолютного тиску при $p_0 = \text{const}$, так і в сенсорах диференційного тиску $p_1 - p_0$. В останньому випадку поверхня поширення ПАХ взаємодіє з середовищем, яке контролюється, що приводить до погіршення метрологічних характеристик сенсора, зокрема, стабільності та точності. Для усунення вказаного недоліку ЧЕ будується з двома мембранами за диференційною схемою (рис.5,д), причому тиск p_0 в такій конструкції підтримується постійним. Різновидністю таког ЧЕ є більш технологічна конструкція (рис.5,е), в якій проміжок між мембранами забезпечується лише за рахунок матеріалу, що їх зв'язує. В цьому випадку чутливою до тиску є тонка мембрана товщиною h_1 , а нечутлива мембрана товщиною $h_2 > h_1$ використовується для побудови перетворювача за диференційною схемою.

ЧЕ з двома мембранами мають певні недоліки: складність конструкції, відносно низька надійність, погіршення метрологічних характеристик внаслідок неідентичних умов поширення ПАХ у рознесених мембранах, труднощі доступу до конструкції. В зв'язку з цим розроблені ЧЕ з однією мембраною, побудовані за диференційною схемою. Для розташування структур на ПАХ у такій конструкції можуть використовуватися обидві поверхні мембрани (рис.5,є), які повинні бути захищені від впливу середовища, що контролюється.

Більш простота технологічною є конструкція ЧЕ з однією мембраною (рис.5,ж), в якому обидві структури розташовані на одній поверхні мембрани на ділянках з протилежним характером деформації під час дії тиску p_1 , що вимірюється.

Складніша конструкція (рис.5,з) дозволяє вимірювати диференційний тиск $p_2 - p_1$. У цьому випадку мембрана опирається на проміжну опору, що забезпечує можливість її обертання. Симетричне розташування обох структур на ПАХ у такому ЧЕ забезпечує ефективніше придушення дестабілізуючих дій навколишнього середовища.

Аналіз розглянутих конструкцій ЧЕ показує, що аналогічно сенсорам сили чутливість до тиску в загальному випадку вища в ЧЕ, що використовують стоячу хвилю. Найкращі результати з точки зору чутливості та технологічності досягнуті в конструкції, показаних на рис.5,д,е,ж.

На рис.6 наведений приклад типової конструкції сенсора на ПАХ генераторного типу, призначеного для вимірювання тиску в газі або рідині.

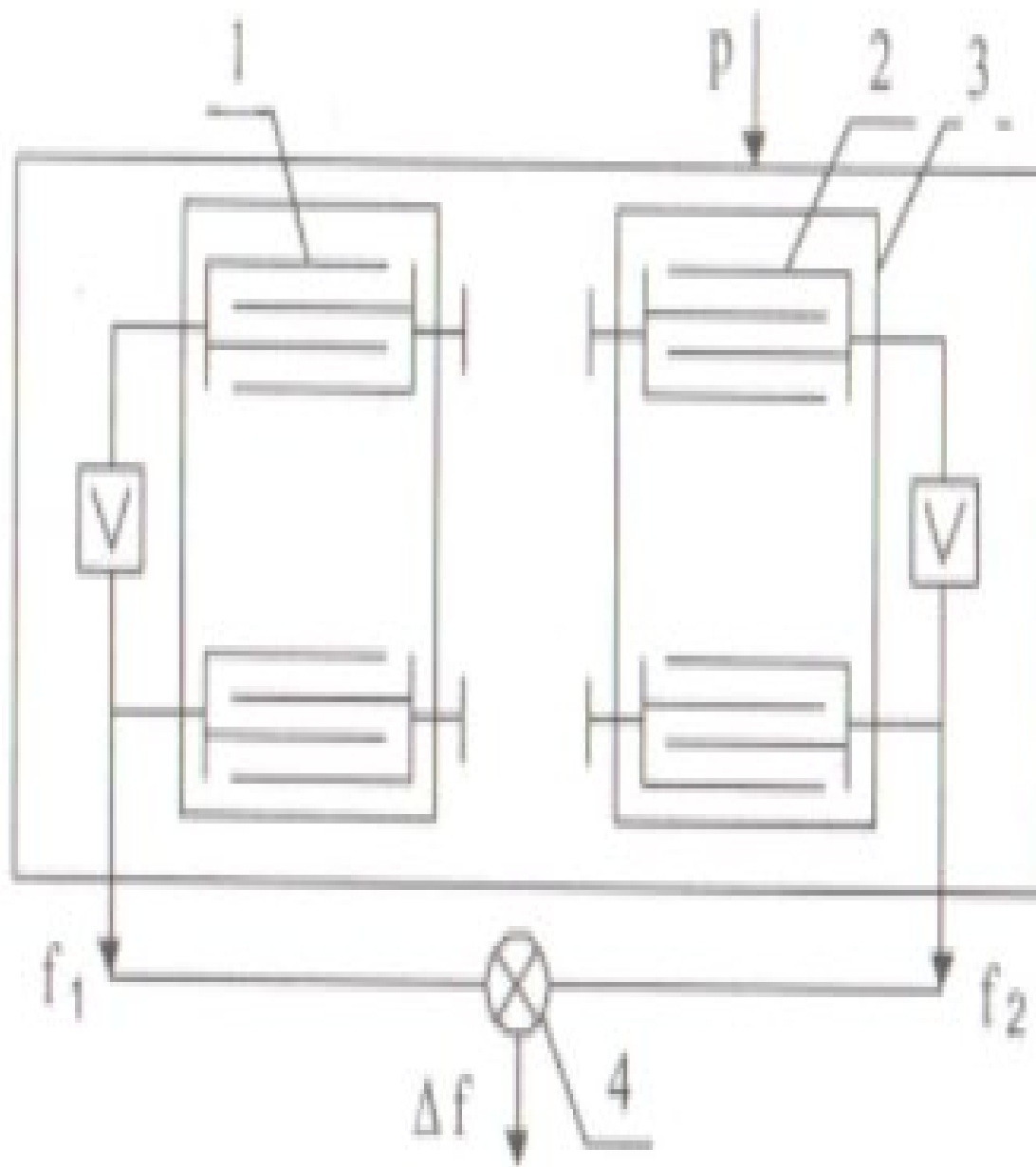


Рис.6. Сенсор тиску генераторного типу на ПАХ: 1 – лінія затримки на неробочій діафрагмі; 2 – лінія затримки на робочій діафрагмі; 3- робоча діафрагма; 4 – змішувач

На загальній підкладці (звукопроводі) розташовані лінії затримки 1 і 2. Тиск прикладається тільки на ділянці звукопроводу (робочій діафрагмі) 3, на якій розташована одна з ліній затримки. Інша лінія затримки тиску не відчуває. На основі цих ліній затримки виконані два генератори на ПАХ. При однаковому тиску на обидві діафрагми частоти генераторів f_1 та f_2 дорівнюють одна одній і різницева частота Δf , виділена після змішувача, дорівнює нулю. При зміні тиску на робочу діафрагму частота відповідного генератора (f_2 на рис.6) змінюється.

Різницева частота Δf пропорційна до зміни тиску:

$$|\Delta f| = f_0 S_p \Delta p,$$

де: Δp - зміна тиску; $f_0 = f_1 = f_2$ - частота за відсутності тиску; S_p - коефіцієнт чутливості сенсору до тиску.

Зміна температури середовища не приводить до зміни Δf в результаті одночасної зміни f_1 та f_2 .

5 Сенсори прискорення на ПАХ

Якщо розташувати швидкопровід зі структурою на ПАХ у прискорювальному полі, на нього діє сила інерції, що викликає деформацію, зміну швидкості та фазового набігу ПАХ, а відповідно і частоти перетворювача, побудованого за генераторною схемою.

Чутливість до прискорення, або коефіцієнт перетворення прискорення G в частоту f можна визначити як:

$$S_G = \frac{\partial f}{\partial G}$$

Величина S_G залежить як від матеріалу, орієнтації та конфігурації звукопроводу, так і від конфігурації опори ЧЕ.

В табл. 6 наведено способи побудови ЧЕ сенсорів прискорення на ПАХ, на рис.7 – варіанти їх конструктивного виконання.

Таблиця 6

Класифікація способів побудови ЧЕ сенсорів прискорення на ПАХ

Принцип побудови ЧЕ	Тип ПАХ	Конструктивне виконання ЧЕ
Пластина, закріплена на жорсткій поверхні	Біжуча	Рис.7,а
Консоль, що працює на згин	Біжуча Стояча	Рис.7,б Рис.7,в
Пластина, закріплена з протилежних країв на гнучких опорах	Біжуча Стояча	Рис.7,г Рис.7,д
Пластина, закріплена на жорстких опорах	Біжуча	Рис.7,е
Рамковий ЧЕ		Рис.7,є Рис.7,ж
Мембрана з зосередженим навантаженням в центрі	Біжуча	Рис.7,з

На рис.7, а показана конструкція у вигляді пластини, за допомогою епоксидного клею жорстко закріпленої на поверхні, паралельній до поверхні поширення ПАХ. Такий ЧЕ має відносну високу чутливість до прискорення.

Найчастіше використовуються ЧЕ у вигляді консолі, що працює на згин (рис.7,б,в). Закріплена з протилежних кінців пластина на відміну від консолі дозволяє отримати симетричний відносно її центру розподіл деформації (рис.7,г,д).

Для підвищення чутливості ЧЕ поряд з використанням власних інерційних властивостей звукопроводу (рис.7,б,д,е) вводять додаткову інерційну масу m (рис. 7, в,з). У жорсткій рамковій конструкції ЧЕ (рис.7,є) прискорення викликає його складну деформацію, в результаті чого навіть різні ділянки однієї поверхні можуть мати деформацію протилежних знаків. Щоб уникнути цього використовується відкрита рамкова конструкція, в якій маса m може переміщатися поверхнею обох консолей (рис.7,ж). Величина нелінійності, наприклад, для ЧЕ, виконаного з двох мембран, між якими на пружних підвісках закріплена маса m (рис.7,з), становить 3,6% у діапазоні прикорень $0 \dots 20$ г, частота механічного резонанса – 1,2кГц.

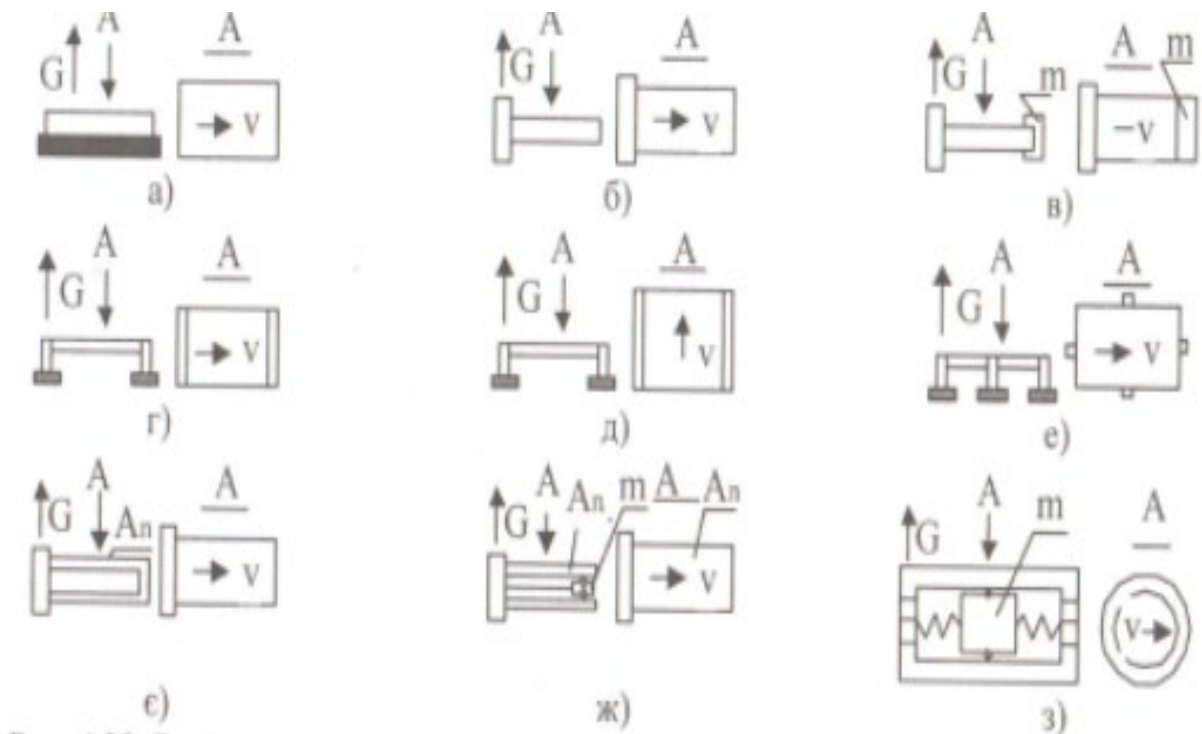


Рис.7. Варіанти конструктивного виконання ЧЕ сенсорів прискорення на ПАХ: пластина, закріплена на жорсткій поверхні (а); консоль, що працює на згин (б,в); пластина, закріплена протилежними кінцями на гнучких опорах (г,д); пластина, закріплена на жорстких опорах (е); рамковий ЧЕ (є,ж); мембрана з зосередженим навантаженням у центрі (з)

Для підвищення чутливості та зниження впливу дестабілізуючих впливів застосовується ряд рішень, аналогічних тим, що використовуються в сенсорах сили, наприклад, консоль, що працює на згин та має зону однакового опору згину (рис.7,є) або диференційна схема. Зменшення часу заспокоєння досягається заповненням герметичного корпусу, в якому міститься ЧЕ, рідиною – депфером.

6. Сенсори електричної напруги на ПАХ

Функціонування сенсорів електричної напруги на ПАХ ґрунтується на залежності електрофізичних характеристик середовища поширення ПАХ від величини електричного поля, прикладеного до цієї структури.

Дія електричного поля п'єзоелектричний матеріал супроводжується його пружною деформацією, яку можна представити в тензорній формі:

$$S_{ij} = d_{ijk} * E_k, \quad i, j = x, y, z,$$

де d_{ijk} - п'єзоелектрична стала вздовж j -го напрямку в i – тій площині; E_k - електричне поле, прикладене в k – му напрямку.

В результаті пружної деформації змінюється відстань між зустрічно-штировими претворювачами ПАХ, тобто часова затримка (фазовий набіг). Відповідну зміну частоти на виході сенсора можна записати як:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{L_2 S_{xx}}{L_1 + L_2},$$

де L_2 - частина загальної відстані між зустрічно-штировими претворювачами ПАХ $L_1 + L_2$, до якої прикладене електричне поле; S_{xx} - вплив деформації.

Зв'язок деформації S з електричним полем E для п'єзоелектричних сталей кераміки має вигляд:

$$\begin{aligned} S_{xx} &= d_{z1} E_z, \\ S_{yy} &= d_{z1} E_z, \end{aligned}$$

для LiNbO₃:

$$\begin{aligned} S_{xx} &= -d_{y2} E_y \\ S_{yy} &= -d_{z1} E_y \end{aligned}$$

для кварцу:

$$S_{yy} = -d_{x1} E_y.$$

На рис.8 наведені конструкції ЧЕ сенсорів електричної напруги . Типовий ЧЕ (рис.8,а) виконаний у вигляді звукопроводу 1, на поверхні якого розташовані

вхідний та вихідний зустрічно-штирові перетворювачі 3, що утворюють лінію затримки.

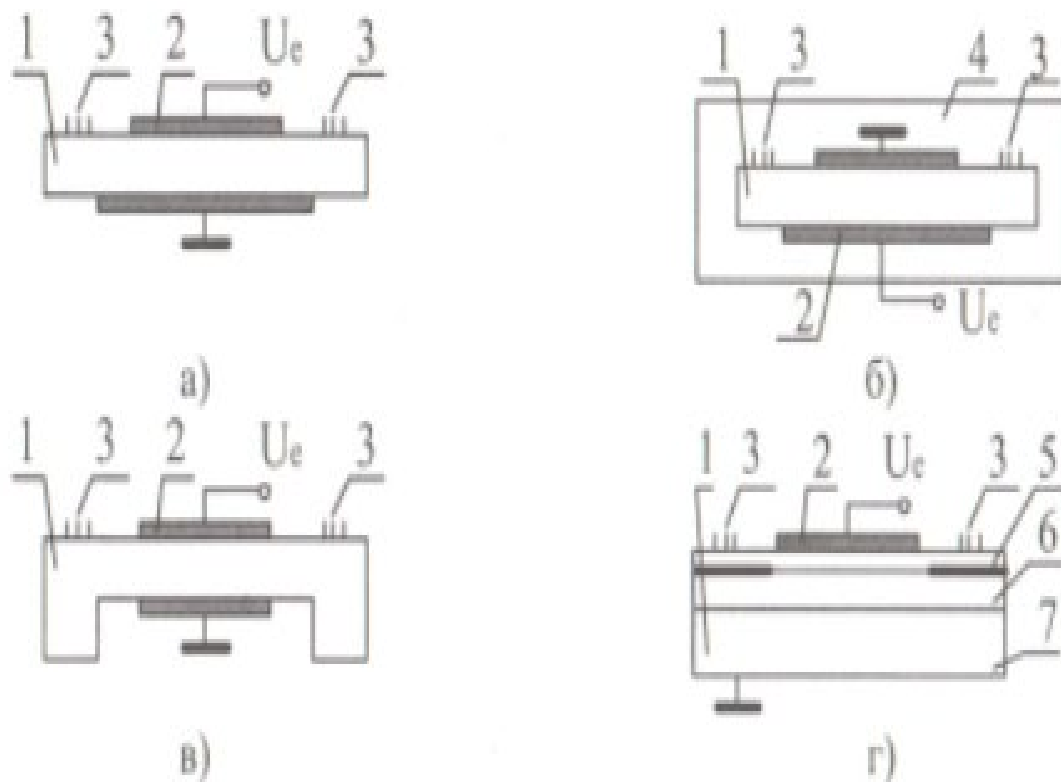


Рис.8. Сенсори для вимірювання електричної напруги: а) типовий; б) для високих напруг; в) з підвищеною чутливістю; г) на МДН-ефекті:

1 – звукопровід ; 2 – електрод для напруги зміщення; 3 – зустрічно-штировий перетворювач; 4 - $\text{SF}_6 + \text{N}_2$; 5 – ZnO; 6 – SiO_2 ; 7 – Si

Висновки

В ході проведення дипломної роботи були розкриті основні питання, щодо сенсорів на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ), а саме:

1. Фізичні основи сенсорів на ПАХ;
2. Способи контролю їх фізичних величин;
3. Сенсори сили на ПАХ;
4. Сенсори тиску на ПАХ;
5. Сенсори електричної напруги на ПАХ.

Також, до кожного пункту були розв'язані задачі такі як:

- Принцип побудови ЧЕ;
- Тип ПАХ;
- Конструктивне виконання.

Перелік посилань

1. Бондарь Б.Г., Письменецкий В.А., Хорунжий В.А, Микроэлектроника – К. : Вища школа, 1981. -256с.
2. Колешко В.М., Мешков Ю.В. Микроэлектронные преобразователи информации на поверхностных акустических волнах // Зарубежная электронная техника. – М.: ЦНИИ «Электроника», 1985 N 9 (292). – 116с.
3. Хорунжий В.А., Долбня Е.Н., Богатов В.П. Акустоэлектроника. – К .: Техніка, 1984. – 152с.
4. Proc of the 30th Annual Symp. , USA, 1975, pp 475-478.
5. 1976 Ultrason. Symp. Proc., USA, 1976
6. IEEE Trans. , 1981 , v . SU-28, N 5, pp. 342-348
7. 1975 Ultrason. Symp. Proc. , USA, 1975 , pp. 519-522
8. J.Appl. Phys. , 1981 , v. 52, N10 , pp. 6174-6150
9. Appl.Phys. Left., 1984, v. 44,N 2,pp. 182-183
10. Electr.Left ., 1982,v.18.N24 , pp.1030-1031
11. Патент США N3. 863..497
12. Патент США N 4.107.626
13. Патент США N 4.096.470
14. Патент США N4.332.342
15. Патент США N 4.265..124