

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Радіотехнічний факультет

Кафедра радіоконструювання та виробництва радіоапаратури

«На правах рукопису»
УДК 621.3.082.4

До захисту допущено:

зав. кафедри

 Є. А. НЕЛІН

«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки»

за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

на тему: «П'єзоелектричний сенсор визначення в'язкості рідини»

Виконав :

студент 2 курсу, групи РІ-91мп

Пономаренко Владислав Сергійович



Керівник: Ст. викладач Головня Вікторія Мілентіївна



Рецензент:

Доцент, к.т.н. каф. РОС Мовчанюк Андрій Валерійович

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент



Київ – 2020 року

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

Кафедра радіоконструювання та виробництва радіоапаратури

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

С. А. Нелін С. А. НЕЛІН

«02» вересня 2020 р.



ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студента
Пономаренка Владислава Сергійовича

1. Тема дисертації «П'єзоелектричний сенсор визначення в'язкості рідини»
науковий керівник дисертації Головня Вікторія Мілентіївна, старший викладач за-
твержені наказом по університету від «5» листопада 2020 р. №3223-с
 2. Термін подання студентом дисертації 14 грудня 2020 року
 3. Об'єкт дослідження п'єзоелектричний сенсор для визначення в'язкості рідини
 4. Вихідні дані вимірювання в'язкості ультразвуковим методом за допомогою п'єзоелектричного сенсора
 5. Перелік завдань, які потрібно розробити. Проаналізувати інформацію про в'язкість рідин. Огляд прототипів давачів для вимірювання в'язкості. Розробити п'єзоелектричний давач.
 6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу електронна форма презентації обсягом не менше 14 слайдів
 7. Орієнтовний перелік публікацій _____
-

8. Дата видачі завдання 02 вересня 2020 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Аналіз інформації про в'язкість рідин	02.09.2019-30.10.2019	Виконано 
2.	Огляд та аналіз прототипів давачів для вимірювання в'язкості рідин	1.11.2019-30.06.2020	Виконано 
3.	Розробка п'єзоелектричного давача	01.07.2020-30.09.2020	Виконано
	вимірювання в'язкості рідин		
4.	Представлення та захист результатів магістерської дисертації	грудень 2020	

Студент


Владислав ПОНОМАРЕНКО

Науковий керівник


Вікторія ГОЛОВНЯ

АНОТАЦІЯ

Обсяг пояснювальної записки магістерської дисертації (МД) становить 85 сторінок, які включають в себе 4 розділи, 46 ілюстрацій, 19 таблиць, 1 додаток і 38 бібліографічних найменувань.

Ключові слова: ультразвуковий віскозиметр, п'єзоелектрична віброюча пластина, давач в'язкості, контактний зонд, магнітне ярмо, детектор середньоквадратичної потужності.

Актуальність теми дослідження. В'язкість є обов'язковим показником якості дизельного палива, що визначає їх хіміко-технологічні властивості, тому тема цієї роботи є актуальною.

Мета та завдання. Дослідження можливості вимірювання в'язкості дизельного палива ультразвуковим методом.

Об'єкт та предмет роботи. Об'єктом роботи є п'єзоелектричний сенсор для визначення в'язкості рідини.

Предметом є параметри та характеристики п'єзоелектричного сенсора визначення в'язкості рідини.

Практичне значення одержаних результатів. Виражається в спрощенні процедури вимірювання за допомогою п'єзоелектричних перетворювачів.

ANNOTATION

The volume of the explanatory note of the master's dissertation (MD) is 85 pages, which include 4 sections, 46 illustrations, 19 tables, 1 appendix and 38 bibliographic titles.

Key words: ultrasonic viscometer, piezoelectric vibrating plate, viscosity sensor, contact probe, magnetic yoke, RMS detector.

Relevance of the topic. Viscosity is a mandatory indicator of the quality of diesel fuel, which determines their chemical-technological properties, so the topic of this work is relevant.

The purpose of research. Investigation of the possibility of measuring the viscosity of diesel fuel by ultrasonic method.

Object and subject of research. The object of the work is a piezoelectric sensor for determining the viscosity of a liquid.

The subject is the parameters and characteristics of the piezoelectric sensor for determining the viscosity of the liquid.

The practical value of the results obtained. It is expressed in the simplification of the measurement procedure using piezoelectric transducers.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до магістерської дисертації

на тему: “П’єзоелектричний сенсор визначення в’язкості рідини”

Київ — 2020 року

ЗМІСТ

Перелік скорочень	3
Вступ	4
1 Збір та аналіз інформації про в'язкість рідин	5
1.1 Огляд методів вимірювання в'язкості	7
1.2 Огляд існуючих пристроїв вимірювання в'язкості	13
Висновки за розділом	17
2 Огляд та аналіз прототипів давачів для вимірювання в'язкості рідин	18
2.1 Вібраційний давач в'язкості на основі МЕМС з використанням структури у формі подвійної спіралі	18
2.2 Огляд акустичного давача вимірювання в'язкості	23
2.3 Вібраційні консольні конструкції	27
2.4 Ультразвукові перетворювачі	34
2.5 Конструкції на базі МЕМС капілярного типу	36
Висновки за розділом	37
3 Розробка п'єзоелектричного давача	38
3.1 Основи виникнення п'єзоефекту	38
3.2 П'єзоелемент та розрахунок його резонансної характеристики	43
3.2.1 Електромеханічні характеристики п'єзоелемента	43
3.2.2 Електрична модель п'єзоелемента	45
3.2.3 Розрахунок резонансних характеристик п'єзоелемента	47
3.3 П'єзоелектричні сенсорні диски	53
3.4 П'єзоелектричні трансформатори	54
3.4.1 Моделювання п'єзотрансформатора для дослідження рідин	57
Висновки за розділом	67
4 Розроблення стартап-проекту	68
4.1 Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології)	68
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту	69
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	69
4.4 Розробка ринкової стратегії стартап-проекту	72

	2
4.5 Розроблення маркетингової програми	73
Висновки за розділом.....	75
Висновки.....	76
Перелік джерел посилань.....	77
Додаток А Розрахунки в системі Mathcad	82

Пономаренко В.С. РІ-91МП, 2020

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ЕАП – електроакустичний перетворювач;

ЕРС – електрорушійна сила;

MEMS – мікроелектромеханічні системи;

ПАХ – поверхневі акустичні хвилі;

CMUT – ємнісний мікрообробний ультразвуковий перетворювач;

FPGA – програмована логічна інтегральна схема;

FWHM – повна ширина на половині максимуму;

HSS – датчик високих значень в'язкості в прямокутному корпусі;

LSB – датчик низьких значень в'язкості у вигляді болта;

LSS – датчик низьких значень в'язкості в прямокутному корпусі;

RMS – детектор середньоквадратичної потужності;

Пономаренко В.С. РІ-91МП, 2020

ВСТУП

В сучасних умовах розвитку промисловості актуальним є підвищення надійності й ефективності функціонування технологічного обладнання, що безпосередньо пов'язано з необхідністю раціонального підбору і використання різних спеціальних рідин для багатьох галузей промисловості.

В'язкість є одним з основних фізико-хімічних параметрів, що визначають властивості та характеризують склад і структуру нафтопродуктів, більшість з яких є ньютонівськими рідинами [1].

У зв'язку з цим, в'язкість і густина займають важливе значення в системі нормованих показників пального та мазуту для реактивних, газотурбінних і дизельних двигунів, а для всіх видів олів та мастил — в'язкість є обов'язковим показником якості, що визначає їх хіміко-технологічні властивості [2].

З давніх часів були розроблені різні типи віскозиметрів. Навіть зараз вони використовуються належним чином за своїми характеристиками. Іншими словами, не існує віскозиметра, який можна було б універсально застосувати до всіх об'єктів. Крім того, ціна віскозиметра становить приблизно 58 тисяч грн [3] та більше навіть для простого, і понад 229 тисяч грн для повномасштабного віскозиметра [4].

В роботі буде розглянуто концепцію п'єзоелектричного давача в'язкості. Використовуючи п'єзо ефект, можна значно зменшити розмір пристрою при зниженні витрат та покращити його універсальність. Крім того, через його невеликий розмір можна застосувати як вбудований пристрій у випадках, які не можна розглядати із стаціонарними віскозиметрами.

В роботі розглянемо сенсор для вимірювання в'язкості в діапазоні 0,1 – 10000 сПз). Рідинами для дослідження виберемо паливно-мастильні матеріали.

1 ЗБІР ТА АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЇ ПРО В'ЯЗКІСТЬ РІДИН

При русі реальної рідини по трубах чи крові по кровоносних судинах, різні шари їх мають неоднакову швидкість: центральні шари рідини чи крові рухаються з більшою швидкістю, ніж периферичні. Це пояснюється тим, що швидкість шару, що дотикається до стінки труби, внаслідок змочування, дорівнює нулю, а в міру віддалення від неї швидкість шарів рідини збільшується (рис. 1.1) [5]. Інакше кажучи, у таких потоках рідини існує рух одного шару рідини відносно іншого. Між двома шарами рідини з різними швидкостями виникає сила внутрішнього тертя. Вона є результатом сил молекулярного зчеплення на межі двох шарів і переходу молекул з одного шару в інший внаслідок хаотичного руху. Властивість рідини чинити опір рухові її шарів один відносно іншого називається в'язкістю рідини.

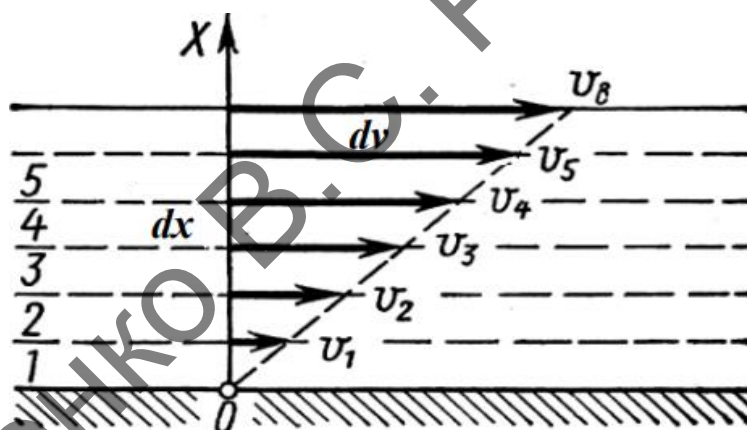


Рисунок 1.1 — Ілюстрація до визначення в'язкості

Рідини називаються ньютонівськими, коли їх в'язкість залежить лише від природи рідини та температури (з підвищенням температури в'язкість зменшується і навпаки). До ньютонівських рідин відносяться: вода, низькомолекулярні органічні сполуки, розчини солей, кислот, лугів та розплавлені метали [6]. Високомолекулярні сполуки (розчини полімерів), дисперсні системи (суспензії, емульсії), в'язкість яких залежить не лише від їх природи та температури, але й від тиску та швидкості течії (при збільшенні швидкості течії в'язкість зменшується і навпаки), називаються структурно-в'язкими або неньютонівськими рідинами.

Ньютон експериментально встановив та довів, що сила внутрішнього тертя (в'язкості) пропорційна градієнту швидкості $\left(\frac{dv}{dx}\right)$ і площі шарів S , між якими визначається тертя [7]:

$$F = \eta \left(\frac{dv}{dx} \right) S,$$

де η — коефіцієнт внутрішнього тертя або в'язкості; він залежить від роду рідини, температури та наявних домішок.

Одиниці вимірювання коефіцієнта в'язкості:

$$[\eta] = [\text{Па} \cdot \text{с}] = \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} \right].$$

В'язкість — це математичне відношення дотичної сили тертя на одиницю площі до градієнта швидкості, перпендикулярної до напрямку потоку рідини. По суті, в'язкість описує стійкість рідини до деформації або "товщину" рідини.

Такі рідини, як мед, патока та сироп, мають високу в'язкість. Вони густі і протікають досить повільно. Є також деякі рідини з в'язкістю настільки високою, що вони нагадують тверді речовини.

Вода, ацетон та метанол — приклади рідин із низькою в'язкістю. Вони "тонкі" і протікають дуже швидко.

В'язкість — це міра стійкості рідини, яка деформується або напругою зсуву, або напругою при розтягуванні. У повсякденному виразі (і лише для рідин) в'язкість — це "товщина" або "внутрішнє тертя". Таким чином, вода "тонка", має меншу в'язкість, тоді як мед "густий", має більш високу в'язкість. Простіше кажучи, чим менш в'язка рідина, тим більша її легкість в русі (плинність).

В'язкість описує внутрішній опір рідини проти течії і може розглядатися як міра тертя рідини [8].

Чим більша в'язкість матеріалу, тим менша його деформація за одиницю часу при рівній прикладеній силі.

1.1 Огляд методів вимірювання в'язкості

Основний принцип усіх віскозиметрів полягає в тому, щоб забезпечити якомога простішу кінематику потоку, переважно одновимірний (ізометричний) потік, щоб точно, легко та незалежно від типу рідини визначити швидкість зсуву деформації. Вимірюється опір такому потоку, і тим самим визначається напруження зсуву. Потім в'язкість легко визначається як співвідношення між напруженням зсуву та відповідною швидкістю зсуву [9].

Найбільш поширені три методи вимірювання в'язкості газів і рідин: капілярний, падаючої кулі і співвісних циліндрів (ротаційний). В основі їх лежать відповідно: закон Пуазейля, закон Стокса і закон течії рідини між співвісними циліндрами. В'язкість визначають також по загасанню періодичних коливань пластини, поміщеної в досліджуване середовище [10].

В'язкість вимірюється віскозиметром, або реометром. Реометр необхідний для вимірювання неньютонових рідин. Ці рідини змінюють свою в'язкість залежно від напруги або сили, що прикладається до них. Кетчуп — приклад неньютонової рідини: його в'язкість знижується після того, якщо добре розхитати пляшку.

Методи вимірювання в'язкості підрозділяються на дві групи:

— при протіканні середовища через канали:

- а) метод капілярного витікання;
- б) вібраційні;
- в) ротаційні методи.

— при русі твердого тіла в середовищі:

- а) метод падаючої кульки;
- б) пенетрація.

Метод капілярного витікання

Метод капілярного витікання базується на використанні формули Пуазейля [7], що дає залежність між об'ємом рідини V , що витікає із капіляру (трубки малого поперечного перетину) радіусом R та довжиною l (рис. 1.2):

$$V = \frac{\pi R^4 (P_1 - P_2)}{8\eta l},$$

де P_1 та P_2 — тиск на торцях трубки, Па; R — радіус трубки, м; l — довжина трубки, м; t — час витікання, с; η — в'язкість, Па · с.

Закон Пуазейля описує закономірності руху рідини в капілярі. Вимірявши об'єм, різницю тисків та знаючи геометричні розміри трубки, можна визначити коефіцієнт в'язкості:

$$\eta = \frac{\pi R^4 (P_1 - P_2)}{8lV}.$$

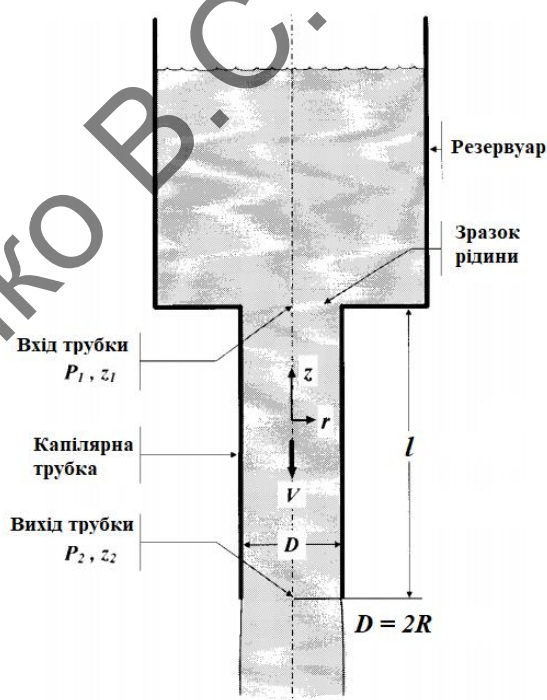


Рисунок 1.2 — Геометрія капілярного віскозиметра

До приборів які визначають в'язкість за капілярним методам відносять віскозиметри Оствальда, чашкові віскозиметри та інші конструкції. У віскозиметрах з постійною витратою вимірюється перепад тисків між кінцями капіляру, в пристрої з постійним тиском — витрата рідини. При застосуванні

капілярних віскозиметрів слід ретельно промивати та просушувати його, оскільки навіть незначне забруднення капіляра буде суттєво позначатись на результатах вимірів.

Ротаційний метод віскозиметрії

Ротаційний метод віскозиметрії полягає в тому, що досліджувана рідина поміщається в малий зазор між двома тілами, необхідний для зсуву досліджуваного середовища. Одне з тіл протягом усього досліду залишається нерухомим, інше, зване ротором ротаційного віскозиметра, здійснює обертання з постійною швидкістю. Обертальний рух ротора віскозиметра передається до іншої поверхні за допомогою руху в'язкого середовища (передбачається відсутність проковзування у поверхні тіла). Звідси випливає теза: момент обертання ротора ротаційного віскозиметра є мірою в'язкості.

Тобто, ротаційний метод побудований на вимірюванні обертального моменту M , який виникає на осі ротора (циліндра, диска і т. п.), зануреного у вимірювальне середовище, при взаємному їх переміщенні [11].

В одному з основних варіантів метода шар досліджуваної рідини висотою H перебуває між двома коаксіальними циліндрами з внутрішніми радіусами R_i та R_o ($R_i < R_o$), які обертаються один щодо іншого (рис. 1.3).

В'язкість обчислюється за формулою Маргулеса:

$$\eta = \frac{M(\varepsilon^2 - 1)}{4\pi H \varepsilon^2 \omega},$$

де $\varepsilon = \frac{R_o}{R_i}$; ω — кутова швидкість обертання ротора.

Якщо зовнішній циліндр відсутній ($R_o \rightarrow \infty$), в'язкість обчислюють за формулою:

$$\eta = \frac{M}{4\pi H R_i^2 \omega}.$$

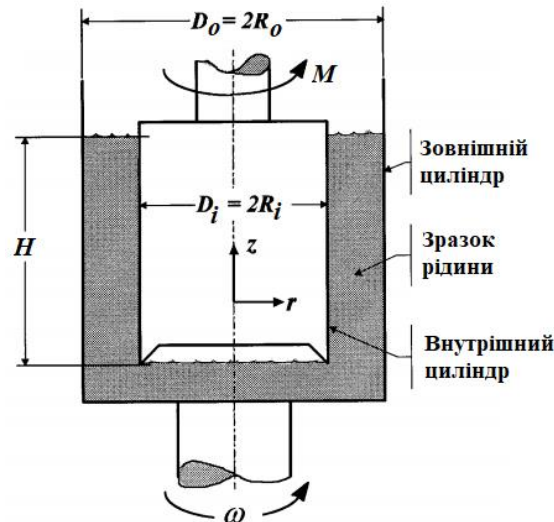


Рисунок 1.3 — Ілюстрація ротаційного метода

Сутність методу при визначенні в'язкості полягає в вимірюванні крутного моменту при заданій кутовій швидкості або по кутовій швидкості при заданому крутному моменті. Для цих цілей ротаційний віскозиметр обладнаний динамометричним пристроєм. Пристрої, що застосовуються в віскозиметрах для вимірювання моментів та кутових швидкостей поділяють на механічні та електричні. Подальші розрахунки ведуться на базі теорії методу ротаційної віскозиметрії.

Ультразвуковий метод віскозиметрії

Вібраційні віскозиметри дозволяють оцінювати в'язкість по зміні амплітуди коливань пластини. Ця зміна амплітуди фіксується і по її величині судять про зміну в'язкості. Найчастіше використовуються коливання ультразвукової частоти 23-28 кГц (ультразвукові віскозиметри).

Значного поширення набули віскозиметри, засновані на вимірі інтенсивності (швидкості) загасання ультразвукових коливань в пластині з магнітострикційного матеріалу. Така пластина змінює розміри в залежності від напруженості магнітного поля (магнітострикційний ефект) [12].

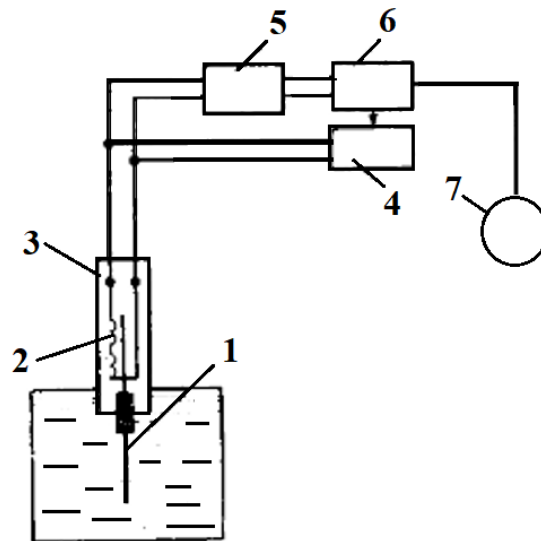


Рисунок 1.4 — Блок-схема ультразвукового віскозиметра, що вимірює інтенсивність затухання ультразвукових коливань: 1 — пластина, 2 — збуджуюча котушка, 3 — гільза, 4 — генератор імпульсів, 5 — підсилювач, 6 — детектор з тригером на виході, 7 — вимірювальний пристрій

На рис. 1.4 показано блок-схему ультразвукового віскозиметра, що вимірює інтенсивність загасання ультразвукових коливань. Пластина 1 з магнітострикційного матеріалу закріплена в торці гільзи 3. Нижня половина пластини поміщена в рідину, в'язкість якої вимірюється. У гільзі є збуджуюча котушка 2, що живиться від генератора імпульсів 4. На котушку подається імпульс струму тривалістю близько 20 мкс, в результаті чого в пластині виникають по-здовжні коливання (магнітопружна деформація), потім збудження припиняється і пластина здійснює затухаючі коливання. Частота коливань визначається геометрією пластини, а амплітуда загасання — в'язкістю рідини. У момент подачі імпульсу, збуджуючого котушку, одночасно здійснюється його посилення і детектування. В результаті тригер замикає генератор. При коливанні пластини завдяки зворотному магнітострикційному ефекту в котушці наводиться деяка ЕРС (електрорушійна сила), що має частоту коливань пластини. Ця ЕРС забезпечує замикання генератора імпульсів до моменту закінчення загасання коливань пластини (зменшення амплітуди до 0,002 початкової величини), після чого генератор імпульсів знову збуджується. У такий спосіб мірою інтенсивності загасання є величина інтервалів часу між послідовним

збудженням генератора імпульсів. Чим більше в'язкість рідини, тим менше інтервали між імпульсами. Вимірювальний прилад, градуйований в одиницях в'язкості, вимірює середню величину інтервалу імпульсів. Похибка приладу порядку $\pm 1\%$. Ультразвукові віскозиметри можуть бути використані для безперервного контролю різних рідин в технологічних потоках. Діапазон вимірювання цих віскозиметрів від 0,0001 до 100 Н·с/м².

Ультразвукові коливання пластини можуть збуджуватися п'єзоелектричним вібратором [12].

Метод падаючої кульки

Метод падаючої кульки (метод Стокса) заснований на дослідженні падіння кульки радіусу R в рідині, поміщеній в циліндричну скляну посудину (рис.1.5). Згідно формули Стокса швидкість падіння кульки в густому середовищі [9]:

$$v = \frac{2gR^2(\rho - \rho')}{9\eta},$$

де v — швидкість падіння кулі в рідині, м/с; R — радіус кулі, м; ρ — щільність матеріалу кулі, кг/м³; ρ' — щільність рідини, кг/м³; g — прискорення вільного падіння, м/с²; η — в'язкість, Па·с.

Звідки в'язкість:

$$\eta = \frac{2gR^2(\rho - \rho')}{9v}.$$

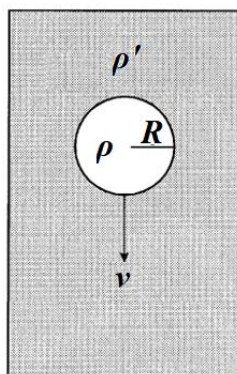


Рисунок 1.5 — Ілюстрація метода падаючої кульки

Віскозиметри з падаючою кулькою застосовуються в фармацевтичній, харчовій, нафтохімічній галузях промисловості для точного оцінювання внутрішнього тертя прозорих рідин та газів низької в'язкості. Похибка вимірювань складає близько 5%. Головний напрямок модернізації даних приборів — застосування більш досконалих способів фіксації часу падіння кульки.

В'язкість визначається часом проходження кулькою певної відстані, частіше всього під дією власної ваги. Для вимірювань за методом Стокса потрібно порівняно велика кількість рідини. Крім того, метод незручний через значні затрати часу на встановлення потрібної температури [7].

1.2 Огляд існуючих пристроїв вимірювання в'язкості

Розглянемо засоби вимірювання в'язкості, що включають в себе методи наведені в підрозділі 1.1.

В основі віскозиметра Visco QC100 (рис. 1.6) лежить ротаційний метод вимірювання в'язкості [13].



Рисунок 1.6 — Ротаційний віскозиметр Visco QC100

Принцип роботи приладу заснований на зануренні шпинделя в досліджуваний зразок для вимірювання його опору при заданій швидкості обертання.

Області застосування:

- харчові продукти та напої;
- полімерні матеріали;
- косметична і фармацевтична продукція;
- хімічні і нафтохімічні зразки.

Ціна пристрою 3675\$.

В основі віскозиметра BS/U-Tube Capillary Viscometer Size A [14] лежить використання формули Гагена–Пуазейля (метода капілярного витікання), згідно з якою об'єм рідини V , що протікає за час t через капіляр (трубку малого поперечного перетину) довжиною l та радіусом R при наявності перепаду тиску ΔP на кінцях капіляра, дорівнює:

$$V = \frac{\pi R^4 \cdot \Delta P \cdot t}{8\eta l}.$$



Рисунок 1.7 — Капілярний віскозиметр Fungilab BS/U
Tube Capillary Viscometer Size A

Використовуються для вимірювання кінематичної в'язкості прозорих ньютонівських рідин в межах $0,9 \div 10000$ cSt. Включає сертифікат калібрування з постійними значеннями при $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Віскозиметри відповідають стандартам ASTM D445, D446, ISO 3104, ISO 3105 та UNE 400313. Ціна віскозиметра 130\$.

В основі віскозиметра A&D Weighing Tuning Fork Vibration Viscometer 43751 [15] лежить вібраційний метод заснований на визначенні змін параметрів вимушених коливань тіла при зануренні його у в'язке середовище.



Рисунок 1.8 — Вібраційний віскозиметр A&D Weighing Tuning Fork Vibration Viscometer 43751

Даний віскозиметр буде відмінним рішенням для складних вимірювань, таких як піноутворення та для рідин з низькою в'язкістю.

Цей віскозиметр добре підходить для чорнила, фарби, харчових продуктів, фармацевтичної, хімічної обробки, каучуку, олії, паперу або будь-якого застосування віскометрії, що вимагає високої точності та швидкого часу відгуку. Метод вібрації камертона забезпечує високу точність та повторюваність із широким діапазоном безперервного вимірювання в реальному часі. Тонкий невеликий розмір сенсорної пластини дозволяє відслідковувати рівномірні зміни в'язкості та температури в режимі реального часу. Крім того, конструкція сенсорних пластин дозволяє мінімально деформувати текстуру зразка і, таким чином, дозволяє вимірювати неньютонівські рідини. Ціна віскозиметра 4,510\$.

В основі віскозиметра Brookfield KF40 [16] лежить дослідження падіння кульки радіусу R в рідині, поміщеній в циліндричну скляну посудину.



Рисунок 1.9 — Віскозиметр Brookfield KF40 заснований на методі падаючої кульки

Віскозиметр відповідає німецькому промислового стандарту DIN 53015. Принцип вимірювання полягає у визначенні часу падіння кульки у циліндричній скляній трубці, наповненій рідиною. Робочий кут падіння в трубці зафіксований у положенні 80° відносно горизонталі.

Користувач розраховує динамічну в'язкість зразка, визначаючи час падіння кульки між верхніми та нижніми кільцевими мітками, що відображаються на падаючій трубці. Використовуючи дані про константи кульки, різницю щільності між зразком рідини та кульки та константу робочого кута, використовується математичне рівняння для перетворення виміряного часу на значення в'язкості в сантипуазах. Ціна пристрою 4466\$.

Висновки за розділом

Найбільш перспективним для використання в системах управління, для автоматизації та комп'ютеризації процесу вимірювання в'язкості є ультразвуковий метод.

Ультразвукові віскозиметри засновані на такому принципі: в рідині робить коливання плоска пластина, а параметри коливань залежать від властивостей середовища, зокрема, від в'язкості і густини.

2 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ПРОТОТИПІВ ДАВАЧІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ В'ЯЗКОСТІ РІДИН

2.1 Вібраційний давач в'язкості на основі МЕМС з використанням структури у формі подвійної спіралі

Розглянемо давач вібраційного типу, що має генератор подвійного спірального типу, як показано на рисунку 2.1 [17].

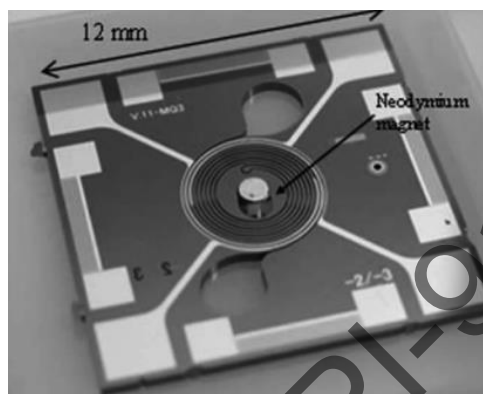


Рисунок 2.1 — Давач в'язкості у формі подвійної спіралі

Спиральна структура утворена з пластини кремнію товщиною 400 мкм проникаючими траншеями шириною 40 мкм. Траншеї формуються за допомогою реактивного іонного травлення. Ширина спіральної стінки становить 80 мкм. Золоте покриття формується на спіральній структурі за допомогою технології розпилення та фотолітографії і використовується як тензодавач для виявлення зміщення.

Неодимовий магніт діаметром 1 мм прикріплений до центру спіралі за допомогою клею. Спиралеподібний вібратор ділиться на «вібраційне тіло» з магнітом у центрі та «вібро-вимірювальне тіло» без магніту. Встановлюється зовнішня котушка і на поверхню спіралі перпендикулярно накладається змінне магнітне поле. Потім центр «вібуючого тіла» вібує в напрямку, перпендикулярному до підкладки. Оскільки зовнішній край спіралі з'єднаний з підкладкою, він деформується, як гвинтова пружина.

Як показано на рис. 2.2 [18], подвійна спіраль складається з двох незалежних спіралей. Червону та синю спіралі називають відповідно вібуючою та

чутливою спіраллю. Центр вібраційної спіралі приводиться в рух магнітом, який закріплено в центрі спіралі, під дією змінного магнітного поля.

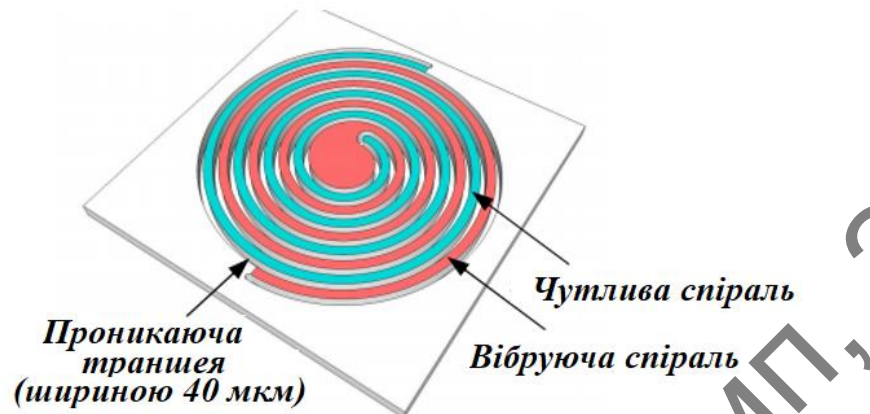


Рисунок 2.2 — Схематичне зображення подвійної спіралі

Деформація вібраційної спіралі, що показана на рис. 2.3, зроблена з перебільшеним зміщенням, щоб чітко показати деформацію спіралі. Фактичний зсув становить близько 1 мкм, і, на перший погляд здається, він не рухається. Деформація спіралі подібна до деформації гвинтової пружини. Рух бокової стінки вібраційної спіралі є псевдопаралельним рухом до бічної поверхні чутливої спіралі у разі відносно невеликого зміщення центра вібруючої спіралі. Така геометрія забезпечує безшовну поверхню і просту структуру псевдопаралельної стінки, щоб створити потік Куетта для відчуття в'язкого напруження.

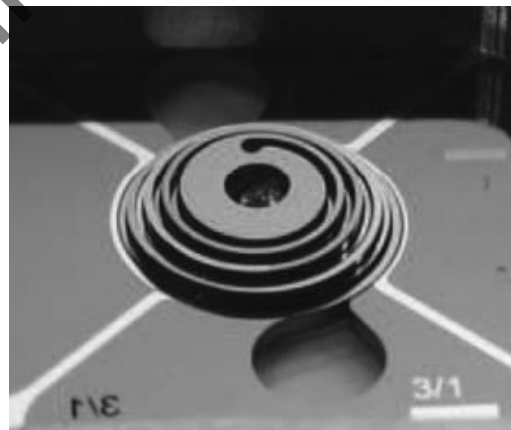


Рисунок 2.3 — Змодельоване відтворення деформації вібраційної спіралі

У повітрі коливається лише вібраційна спіраль, навіть коли прикладається змінне магнітне поле, але коли весь давач занурений у рідину, рух вібраційної спіралі спричинює зсувний потік рідини між нею, та чутливою спіраллю, змушуючи чутливу спіраль рухатися. Чим більша в'язкість рідини, тим більша

амплітуда сили потоку рідини, що діє на чутливу спіраль. Коли співвідношення амплітуд чутливого тіла і віброуючого тіла невелике (близько 10%), коефіцієнт амплітуди A_r центрального зміщення двох спіральних осциляторів майже пропорційний в'язкості:

$$\eta = C_m \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{\omega} \frac{A_r}{\sqrt{1 - A_r^2}},$$

де ω — частота приводу; ω_0 — власна частота; а C_m — постійна пристрою.

На рис. 2.4 показаний корпус давача. Він виготовлений з нержавіючої сталі і містить котушку та друковану плату [17]. У центрі отвору знаходиться сам давач. Металева балка, що простягається зверху отвору праворуч — це магнітне ярмо, виготовлене з пермалою.



Рисунок 2.4 — Корпус давача в'язкості розміром з USB-флешку

Мініатюрний контактний зонд довжиною 2 мм вбудований у друковану плату для забезпечення електричного контакту з давачем. Тефлонові листи використовуються як упаковка.

На рис. 2.5 зображена схема його внутрішньої структури. Всередині утримує встановлена котушка, а магнітні силові лінії індукуються нижче давача ярмом пермалою з високою магнітною проникністю, внаслідок чого вібрує магніт вібраційного тіла. Мініатюрний контактний зонд довжиною 2 мм вбудований у друковану плату для забезпечення електричного контакту з давачем. Тефлонового лист використовується для запобігання потрапляння рідини

всередину. Корпус давача виготовлений з нержавіючої сталі, і весь його розмір менше, ніж USB-флешка.

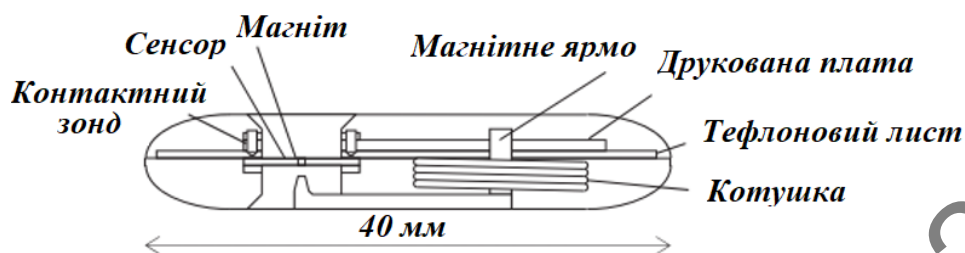


Рисунок 2.5 — Схема внутрішньої структури давача в'язкості

Під час вимірювання необхідно розмістити весь корпус у рідині, як показано на рис. 2.6.



Рисунок 2.6 — Вимірювання в'язкості за допомогою давача в'язкості

Структурна схема управління вимірюванням показана на рис. 2.7. Схема включає в себе двоканальний міст Уітсона, підсилювач каналів та аналого-цифровий перетворювач. Аналоговий сигнал перетворюється в цифровий та вводиться в мікрокомп'ютер FPGA [18].

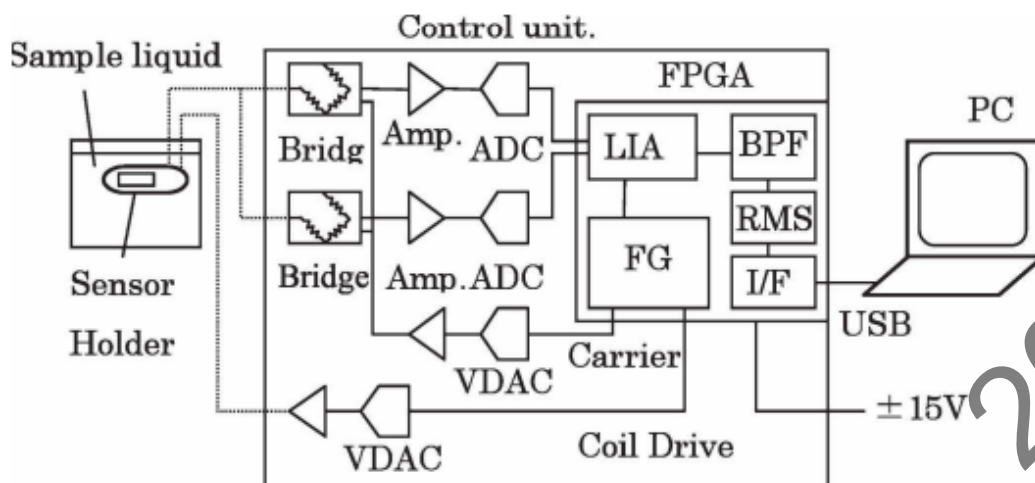


Рисунок 2.7 — Структурна схема вимірювання в'язкості

Амплітуда сигналу переміщення перетворюється на постійну напругу колом RMS і потім передається на персональний комп'ютер через USB-зв'язок. На персональному комп'ютері добуток коефіцієнта амплітуди та константи пристрою обчислюється програмним забезпеченням для обчислення в'язкості.

На рис. 2.8 показані результати експерименту з використанням стандартного розчину для калібрування віскозиметра [17]. Датчик безпосередньо поміщали в посуд з розчином для вимірювання коефіцієнта амплітуди осцилятора. Вимірювання проводили при кімнатній температурі. Як показано на рис. 2.8, отримано лінійну залежність в'язкості рідини від коефіцієнта зміщення амплітуди A_r спірального осцилятора. Це підтверджує основний принцип цього датчика в'язкості, що в'язкість невідомої рідини може бути обчислена шляхом обчислення коефіцієнта амплітуди.

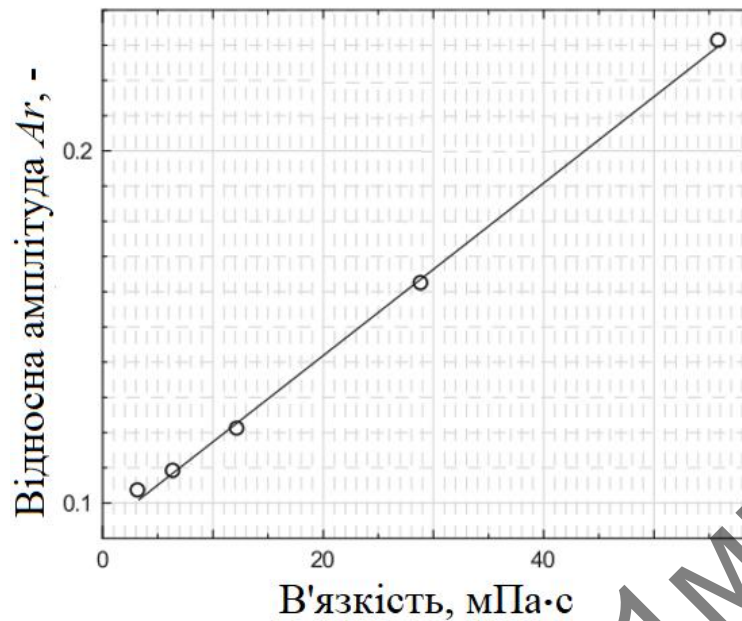


Рисунок 2.8 — Результати перевірки вимірювання в'язкості

Вкажемо на недоліки даного давача:

- не можна використовувати в місцях з вібрацією або сильним потоком. Так як, вимірювання проводиться за допомогою коливань вібратора, давач не буде добре працювати у місці з вібрацією або місці з сильним потоком;
- вимірювання неможливе, якщо пісок або пил застрягли в канавках. Як було сказано вище, ширина канавки становить 40 мкм, тому якщо частинки, більші за її розмір, містяться в рідині, вони забиваються. Крім того, навіть коли розмір частинок становить 40 мкм або менше, в'язкість неможливо виміряти, так як частинки порушують потоки між спіральними канавками;
- давач використовує магніт та котушку, тому його структура є складною, що обмежує зниження витрат. Тому є сенс змінити метод збудження коливань спіралі за допомогою електромагнітної котушки на інший.

2.2 Огляд акустичного давача вимірювання в'язкості

Визначення в'язкості на основі швидкості руху призводить до одного з найбільш небажаних аспектів традиційних методів вимірювання в'язкості — або сенсорний механізм, або рідина повинні рухатися, щоб зробити вимірювання. Це спостерігається в системах, що базуються на потоці рідини, що

включають в себе капілярні трубки, коріолісові трубки, падаючі кульки, рухомі поршні та обертові шпинделі [19].

Щоб підвищити якість виконання технологічних операцій в фармацевтичному, лакофарбовому, керамічному виробництвах, виготовлення ізоляційних і гумових покриттів, операцій фарбування і друку, контролю стану рухомих металевих деталей в масляному середовищі, стабілізувати роботу двигунів і турбін, необхідно оперативно вимірювати в'язкість використовуваних рідких середовищ. Виконання цієї операції — складне технічне завдання, оскільки діапазон значень в'язкості і температури рідин широкий, а агресивний характер середовища, її складний хімічний склад, абразивні властивості і інші чинники часто ускладнюють цей процес.

Однак ці завдання можуть успішно вирішувати пристрої, в яких використовується поширення акустичних хвиль в твердому тілі.

В основі роботи ПАХ-давачів лежить властивість поверхневих акустичних хвиль змінювати свою швидкість і частоту в залежності від стану середовища, по поверхні якого вони розповсюджуються.

Давачі на поверхневих акустичних хвилях — це клас мікроелектромеханічних систем, які базуються на модуляції поверхневих акустичних хвиль. Давач перетворює вхідний електричний сигнал в механічну акустичну хвилю, яка, на відміну від електричної, може легко впливати на фізичні явища. Потім пристрій перетворює цю хвилю назад в електричний сигнал. Зміни амплітуди, фази, частоти або затримки часу між вхідними та вихідними електричними сигналами можуть бути використані для вимірювання характеристик бажаного явища.

Віскозиметри на поверхневих акустичних хвилях можуть бути інтегровані в системи прямого моніторингу та управління процесами в режимі реального часу.

При вимірюванні параметрів в'язкої рідини датчиком на основі поверхневих акустичних хвиль (ПАХ) на зразок п'єзокварцу наноситься шар контрольованої рідини.

Електроакустичним перетворювачем (ЕАП) в п'єзокварці збуджується поверхнева або об'ємна акустична хвиля (рис. 2.9), яка поширюється між ЕАП і відбивається структурою [19]. При цьому виникає стояча хвиля, що еквівалентно формуванню електричного кола, резонансна частота якого обернено пропорційна подвоєному часу затримки акустичної хвилі при поширенні між ЕАП і відбиваючою структурою.

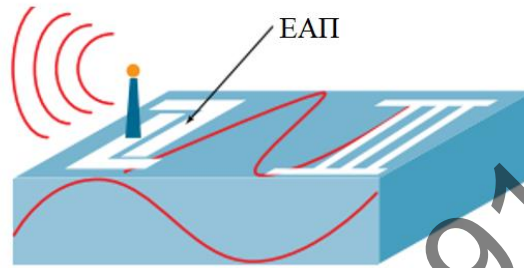


Рис.2.9 — Схема безконтактного ПАХ-давача

Типова еквівалентна електрична схема ПАХ - датчика з одним портом містить коло з послідовним і паралельним резонансом (рис. 2.10) [20]. Частотна характеристика провідності такого давача має вигляд резонансної кривої високодобротного контуру — рис. 2.10 (б). Резонансна частота і максимальне значення провідності залежать від температури рідини, її в'язкості і складу.

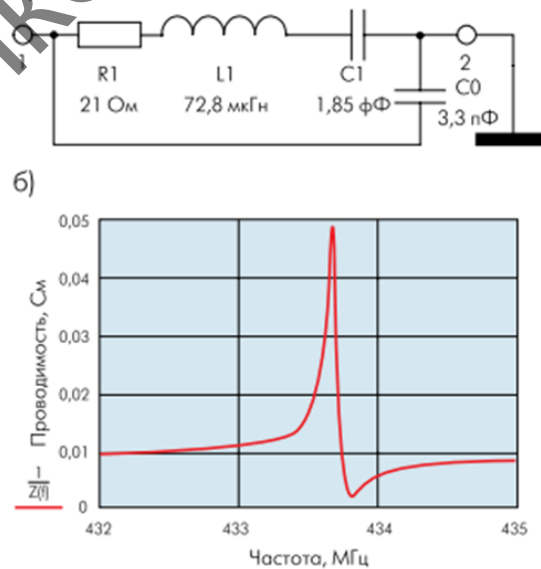


Рисунок 2.10 — Еквівалентна електрична схема ПАХ-давача TFSS433D (а) і частотна характеристика його провідності (б)

Датчики низьких і високих значень в'язкості рідини фірми Vectron International (Low Shear Square — LSS і High Shear Square — HSS) виконуються в прямокутному корпусі (рис. 2.11) [19]. LSS-датчик випускається також у вигляді болта (Low Shear Bolt — LSB) з різьбою близькою до метричної M14.

Моделі ViSmart класів LSS і LSB працюють на частоті 5 МГц. Вони не мають рухомих частин; їх чутлива поверхня виконана з високоміцного матеріалу. Результат вимірювань не залежить від орієнтації давача і від вібрацій ємності з контрольованою рідиною. Для вимірювання потрібно не більше 100 мкл рідини. Споживачеві не потрібно калібрувати давач. Для реєстрації результату вимірювань в цифровому вигляді або використання аналогового виходу датчики моделі ViSmart через порт USB можна з'єднати з ноутбуком. Похибка вимірювання, що не перевищує 10%, пропорційна вимірюваному значенню, а не максимальному номіналу шкали.

Зовнішній тиск становить (0 – 4,14) бар; періодичність повторення вимірювань - не частіше 1 відліку в секунду (програмується користувачем, за замовчуванням періодичність дорівнює 1 відліку в 30 с). Для живлення датчика використовується джерело постійного струму на напругу (5 – 10) В, при цьому споживаний струм не перевищує 35 мА, споживана потужність – 175 мВт.

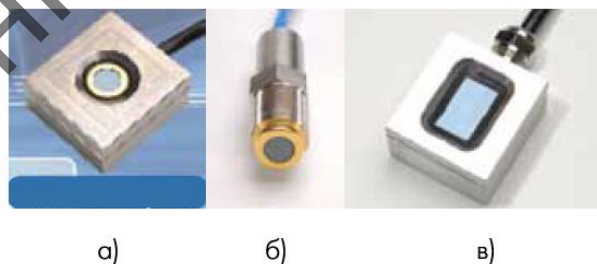


Рис. 2.11 — Давачі в'язкості LSS (а), LSB (б), HSS (в)

Для зв'язку з ПАХ-давачами і обробки результатів вимірювань використовуються цифрові блоки моделей eCup, FluidTrackr і VisConnect (рис. 2.12) [20].



Рисунок 2.12 — Модулі зв'язку з датчиками eCup (а), FluidTrakr (б),
VisConnect (в)

eCup - ручний модуль для зв'язку з датчиками і відліку вимірюваних показників рідини. У нього два порти зв'язку з датчиками. У модулі передбачено автоматичне узгодження з РК-дисплеєм з діагоналлю 9,6 см, який працює за принципом "ввімки і грай" (Plug-to-Play).

FluidTrakr - переносний модуль цифрової індикації результатів вимірів. Має кольоровий РК-дисплей з діагоналлю 14,2 см, пам'ять об'ємом 16 Гбайт, швидкодіючий ОЗП об'ємом 1024 Мбайт. Вбудований інтерфейс USB; можливий бездротовий зв'язок з комп'ютером, що працює з ОС Windows. Акумуляторна батарея забезпечує безперервну роботу протягом 9 год.

VisConnect - модуль зв'язку з датчиками в'язкості. З виходу модуля знімається або струм (4 – 20) мА, або напруга (0,5 – 4,5) В. У модулі є два канали вимірювання в'язкості і температури; послідовний інтерфейс зв'язку з комп'ютером RS 232 при швидкості передачі 9600 Кбод. Живлення від мережі змінного струму (110 – 240) В або від джерела постійного струму на напругу (9 - 24) В.

2.3 Вібраційні консольні конструкції

Важливим давачем для обговорення є давач на основі вібраційної консолі, про що свідчить їх широке використання та популярність. Принцип їх роботи схожий на акселерометр, коли балка закріплена на одному кінці і може вібрувати. Однак, на відміну від акселерометра, завданням якого є відхилення для вимірювання, ці конструкції орієнтовані на вібрацію з певною резонансною частотою. Для повітря це буде деяке певне значення, але для рідин з різною в'язкістю, резонансна частота буде різною [21].

Крім того, розглядаючи також напругу зсуву, стає можливим одночасно характеризувати як в'язкість, так і щільність будь-якої рідини, що є важливою перевагою. Основна конструкція вібраційної консолі наведена на рисунку 2.13 [22].

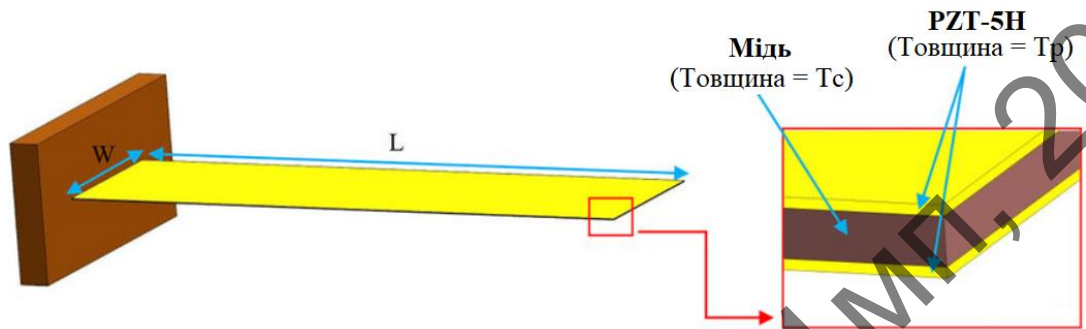


Рисунок 2.13 — Ілюстрація біморфної п'єзоелектричної консольної структури з одним пасивним шаром (мідь) та одним активним шаром (PZT-5H) з обох сторін

Давач дозволяє вимірювати два різних сигнали, один використовуючи силу зсуву, яка вимірюється від чутливого елемента, а інший через поздовжню силу від п'єзоелектричних шарів. Зсувна сила впливає на резонансну частоту, яку можна виміряти за допомогою оптичного інструмента, такого як віброметр. Потім це дасть відношення в'язкості рідини порівняно з відомою основою. Поздовжня сила, створювана щільністю рідини, забезпечує фазовий зсув і може бути легко розрахована. Верхній і нижній шари балки виготовлені з п'єзоелектричного матеріалу.

Другий вид конструкції показаний на рисунку 2.14. У цій конструкції використовується міст Уітсона на прикріпленому кінці консольної балки для вимірювання створюваного напруження згину [23]. Для вібрації консолі використовується магнітне поле, і резонансна крива може бути отримана за допомогою диференціального виходу напруги.

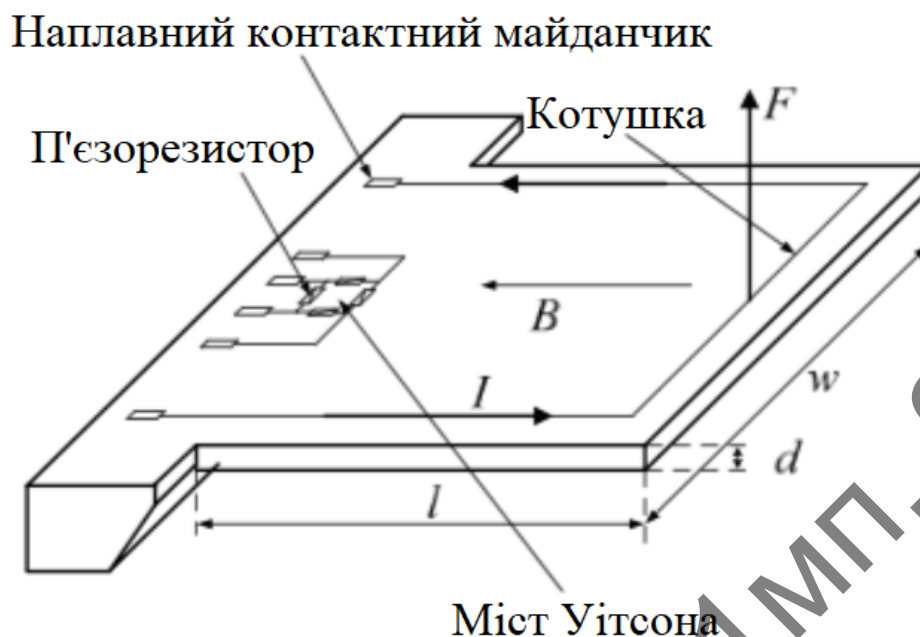


Рисунок 2.14 — Схема консольної балки на основі моста Уїтсона

Ці конструкції не позбавлені недоліків. Зокрема, завдяки використанню тонких консольних балок виникають очевидні проблеми надійності, які ускладнюються тим, що властивості матеріалу балки можуть змінюватися протягом тривалих періодів експлуатації. Оскільки конструкції намагаються робити якомога точнішими, то переходять на довші балки, що в свою чергу знижує надійність ще більше.

Крім того, залежно від методу, яким приводиться в рух давач, такий як магнітне спрацювання, це може спричинити потенційні перешкоди для самої рідини, що призводять до неправильних вимірювань.

Досліди [24] показали, що мікрорезонатор має різні резонансні частоти та добротності через різну густину та в'язкість досліджуваних рідин. Як правило, резонансна частота мікрорезонатора зменшувалася зі збільшенням щільності рідини, а повна ширина на половині максимуму мікрорезонатора зростала зі збільшенням в'язкості рідини. З розвитком технології мікроелектромеханічних систем резонатор MEMS має більш високий резонансний коефіцієнт частоти та добротності та дає багато переваг для здійснення онлайн-вимірювань параметрів рідини, таких як швидкий час відгуку.

Конструкція мікроконсольного резонансного давача показана на рисунку 2.14. Мікроконсоль проектується з довжиною l , шириною w і товщиною

d. Металева котушка розміщена на поверхні мікроконсолі. Міст Уїтсона складається з чотирьох п'єзорезисторів, призначених для розміщення в положеннях концентрації напруги. Для з'єднання із вхідними та вихідними сигналами використовувались контактні майданчики, B позначає постійну магнітну проникність, яку забезпечує зовнішній магніт. Коли металева котушка живиться змінним струмом I з певною частотою, змінна сила Лоренца F створюється для вібрування приводу мікроконсолі з однаковою частотою. Потім значення опору чотирьох п'єзорезисторів змінюються на основі п'єзорезистивного ефекту, оскільки умови напруження чотирьох п'єзорезисторів змінювались. Міст Уїтсона видає відповідний сигнал, пропорційний величині вібрації мікроконсолі. Тому отримуємо динамічну резонансну криву з виходу моста Уїтсона. Коли частота змінного струму через металеву котушку буде близькою до власної частоти мікроконсолі, то мікроконсоль буде вібрувати в резонансі. Пікове значення вихідного сигналу моста Уїтсона визначається по резонансній кривій, тоді можна буде обчислити резонансну частоту та добротність мікроконсолі.

Основні частоти f_1 і f_2 власних коливань мікроконсолі при згинальному та крутливому режимах можуть бути виражені рівняннями (2.1) та (2.2) відповідно:

$$f_1 = \frac{d}{4\pi} \frac{\phi_1^2}{l^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho_c}}, \quad (2.1)$$

$$f_2 = \frac{1}{4l} \sqrt{\frac{G\xi}{\rho_c J_P}}, \quad (2.2)$$

де ϕ_1 — позитивний корінь рівняння $1 + \cosh(\phi_n) \cos(\phi_n) = 0$, $\phi_1 = 1,8751$; ρ_c і E — густина та модуль пружності мікроконсолі відповідно; G — модуль зсуву, і $G = E/(2 + 2\nu)$, де ν — коефіцієнт Пуассона; J_P — полярний момент інерції, і $J_P = (wd^3 + w^3d)/12$;

ξ можна виразити так:

$$\xi = \frac{1}{3} d^4 \left(\frac{\omega}{d} - \frac{192}{\pi^5} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^5} \tanh \frac{n\pi\omega}{2d} \right), \quad (2.3)$$

де n – порядковий номер.

Резонансна частота і половина пікової ширини мікроконсолі мають тісний взаємозв'язок з густиною і в'язкістю рідини, коли мікроконсоль резонує у вимірюваних рідинах. Зв'язок резонансної частоти та густини рідини може бути описаний при вібраційному згині з хорошою точністю при виведенні відомого результату для прямокутної консолі:

$$\frac{f_{fluid1}}{f_{vac1}} = \left(1 + \frac{\pi\rho_f\omega}{4\rho_c d} \right)^{-1/2}, \quad (2.4)$$

де f_{fluid1} і f_{vac1} — резонансні частоти при згинанні мікроконсолі в рідині та вакуумі відповідно;

ρ_f — густина рідини.

Зв'язок між резонансною частотою та густиною рідини при крутильній вібрації можна описати наступним чином:

$$\frac{f_{fluid2}}{f_{vac2}} = \left(1 + \frac{3\pi\rho_f\omega}{32\rho_c d} \right)^{-1/2}, \quad (2.5)$$

де f_{fluid2} і f_{vac2} – резонансні частоти при крутінні мікроконсолі в рідині та вакуумі відповідно.

Рівняння (2.4) можна виразити в іншій формі:

$$\rho_f = \frac{4\rho_c d}{\pi\omega} \left(\frac{f_{vac1}^2}{f_{fluid1}^2} - 1 \right). \quad (2.6)$$

Крім того, рівняння (2.5) можна також виразити так:

$$\rho_f = \frac{32\rho_c d}{3\pi\omega} \left(\frac{f_{vac2}^2}{f_{fluid2}^2} - 1 \right). \quad (2.7)$$

У рівняннях (2.6) і (2.7) потрібно визначити f_{vac1} , f_{vac2} , ρ_c , d , ω , перш ніж вимірювати густину рідини за допомогою f_{fluid1} і f_{fluid2} . Однак всі вони є константами певної мікроконсолі.

Рівняння (2.6) та (2.7) були виведені для мікроконсолі довжиною, значно більшою за її ширину ($\frac{l}{w} \gg 1$). Крім того, існує відомий метод вимірювання густини текучого середовища та в'язкості за допомогою консольної структури пластини ($\frac{l}{w} \approx 1$), де взаємозв'язок резонансної частоти та густини рідини може бути виражений таким чином:

$$\rho_f = \frac{E\nu_n^5 d^3}{24\{1-\sigma^2\}l^5(2\pi f_{fluid})^2} - \frac{\rho_c d\nu_n}{2l}, \quad (2.8)$$

де σ – коефіцієнт Пуассона, ν_n – власне значення функції потенціалу швидкості рідини.

У рівнянні (2.8) всі змінні, крім ρ_f і f_{fluid} є константами певної мікроконсолі.

Для $Re \gg 1$ частотна характеристика прямокутної консолі у в'язкій рідині задається:

$$\frac{f_{fluid}}{f_{vac}} = \left(1 + \frac{\pi\rho_f\omega}{4\rho_c d} \operatorname{Re}[\Gamma(f_{fluid})] \right)^{-1/2}, \quad (2.9)$$

де $\operatorname{Re}[\Gamma(f_{fluid})]$ — це реальна частина гідродинамічної функції, що оцінюється за частотою в рідині.

Однак якщо розміри резонатора [25] будуть становити 2,8 мм x 2,6 мм, що дає змогу рівняння (2.9) представити як рівняння (2.10) завдяки тому, що

$\text{Re}[\Gamma(f_{fluid})]$ наближається до 1 при числі Рейнольдса значно більше 1 ($Re \gg 1$):

$$\rho_f = \frac{4\rho_c d}{\pi\omega} \left(\frac{f_{vac}^2}{f_{fluid}^2} - 1 \right). \quad (2.10)$$

Отже, рівняння (2.6) – (2.8) та (2.10) можуть бути спрощені до рівняння (2.11):

$$\rho_f = \frac{k_1}{f_{fluid}^2} + k_2, \quad (2.11)$$

де k_1 і k_2 – константи і обчислюються експериментальними калібруваннями.

Однак і k_1 і k_2 відрізняються при згинальному та торсіонному резонансних режимах. Тому можна використовувати рівняння (2.11) як робоче рівняння для вимірювання густини рідини в різних умовах, таких як згинальний та торсіонний резонансні режими. ♦

Добротність Q є важливим параметром для вимірювання в'язкості рідини. Коли резонатор з деякою формою коливається в рідині, інерційні та в'язкі сили діють на рух, а Q задається:

$$Q \propto (2\pi f_{fluid})^3 \eta_f \rho_f, \quad (2.12)$$

де η_f – в'язкість рідини.

Співвідношення резонансної частоти та в'язкості рідини можна описати як:

$$\eta_f = \frac{k_3}{\rho_f f_{fluid}^3} \left(\frac{2g_{fluid}}{f_{fluid}} - \frac{2g_{vac}}{f_{vac}} \right)^2, \quad (2.13)$$

де k_3 – константа і отримана експериментальним калібруванням; g_{fluid} та g_{vac} – це половина пікової ширини мікроконсоли в рідині та вакуумі відповідно.

Рівняння (2.13) можна записати наступним чином:

$$\eta_f = \frac{k_3}{\rho_f f_{fluid}^3} \left(\frac{2g_{fluid}}{f_{fluid}} - k_4 \right)^2, \quad (2.14)$$

так як для окремого мікроконсольного пристрою значення f_{vac} та g_{vac} є постійними і можуть бути визначені за допомогою калібрування, тому співвідношення g_{vac}/f_{vac} замінено на k_4 .

2.4 Ультразвукові перетворювачі

Ультразвукові перетворювачі та консольні системи на основі балки дуже схожі, ультразвукові перетворювачі працюють для вимірювання релаксації зсуву, що, в свою чергу, дозволяє розрахувати зсувну в'язкість рідини.

Загалом, ці пристрої працюють, посилаючи акустичну хвилю якогось типу через рідину до вимірювального пристрою, який потім вимірює отриману силу сигналу, який надаватиме інформацію про в'язкість. При більш високих коефіцієнтах в'язкості хвиля буде значно загасати. Одним з таких прикладів цієї конструкції є датчик, призначений для використання ємнісного мікрообробленого ультразвукового перетворювача (CMUT) [26].

CMUT є відносно новим поняттям в галузі ультразвукових перетворювачів. Більшість комерційно використовуваних ультразвукових перетворювачів сьогодні, засновані на п'єзоелектриці. CMUT є перетворювачами, у яких енергія трансдукції пов'язана зі зміною ємності. CMUT побудовані на кремнії з використанням техніки мікрообробки. У кремнієвій підкладці утворюється порожнина, а тонкий шар на верхній частині порожнини служить мембраною, на якій нанесено металізований шар, що діє як електрод у комплексі з кремнієвою підкладкою, яка слугує донним електродом.

Якщо сигнал змінного струму відхиляє електроди він буде генерувати ультразвукові хвилі. У цьому випадку, трансдюсер працює як передавач. Якщо ультразвукові хвилі діють на мембрану, відхиляючи SMUT, він буде генерувати змінний струм відповідно до зміни ємності SMUT. Таким чином, він працює як приймач ультразвукових хвиль [26].

Досягти високої робочої частоти при використанні SMUT легше через їх менший розмір. Частота роботи залежить від розміру осердя (порожнина мембрани) і від жорсткості матеріалу, що використовується як мембрана. Інтеграція з іншою мікроелектронікою для SMUT у порівнянні з іншими технологіями перетворювачів легша, оскільки перетворювач побудований на кремнії [27].

Ці конструкції забезпечують значні переваги перед іншими завдяки таким речам, як велика пропускна здатність та краща осьова роздільна здатність. Ці пристрої можуть бути виготовлені надзвичайно малих розмірів і не залежати від тривалого часу травлення, що робить їх ідеальними для системної інтеграції. На рисунку 2.15 показана конструкція одного такого датчика [26].

У режимі передачі, сигнал змінного струму зі зміщенням постійного струму прикладеним між електродами, призводить до вібрації системи в будь-якій рідині, з якою вона контактує. Ці хвилі як правило, знаходяться в діапазоні (1 – 10) МГц, і більша величина ідеальна для отримання більш точного вимірювання.

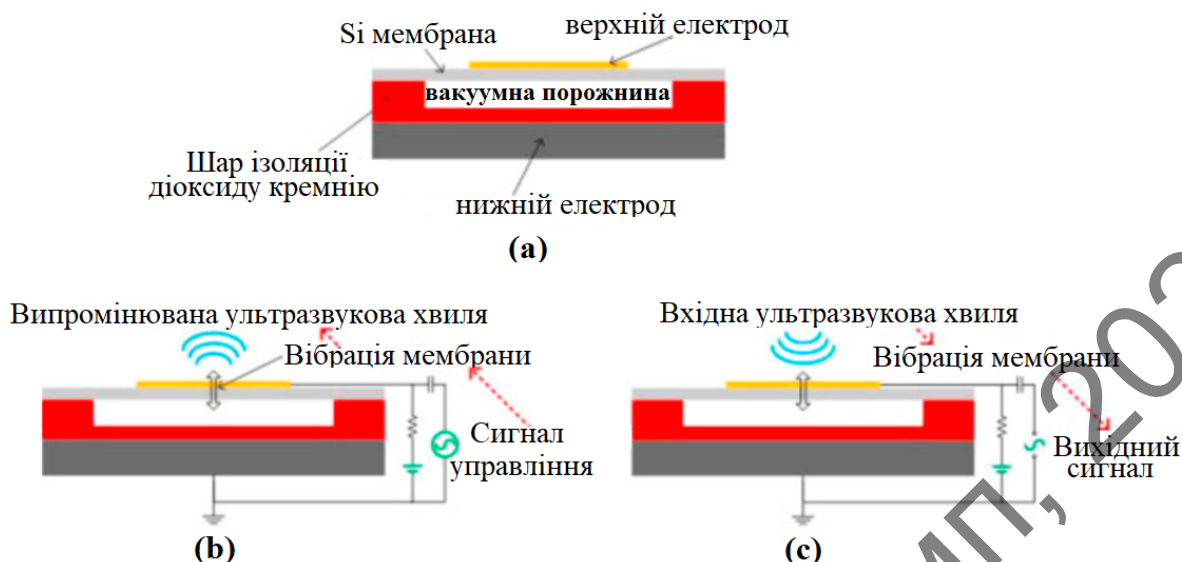


Рисунок 2.15 — Схема ультразвукового давача в різних режимах роботи

У режимі прийому застосовується лише зміщення постійного струму, а ефективний вхід змінного струму зчитується як вхідна хвиля. Додаткові конструкції використовують п'єзореzистивні датчики для більш точного виявлення вхідних сигналів [28]. У повній конструкції використовується в цілому два блоки CMUT, один з яких виконує роль передавача, а інший - приймача. Потім отриманий сигнал обробляється за допомогою перетворення Фур'є для знаходження різниці частот. Центральна частота є найважливішою, однак зміна пропускної здатності також важлива. Цей тип конструкції особливо корисний, оскільки він надзвичайно малий і часто може виконуватися на одній лінії, не впливаючи на потік. Недоліком цієї конструкції є, як правило, вимірювання лише в'язкості, а не щільності, на відміну від конструкції консольної балки.

Завдяки вдосконаленню технологій мікробиробництва технологія ємнісних мікрооброблених ультразвукових перетворювачів CMUT виникла як конкурентоспроможна технологія в області вимірювання в'язкості.

Найбільш часто вживаний метод використовує взаємодію між рідиною та переданою акустичною хвилею.

2.5 Конструкції на базі MEMS капілярного типу

Віскозиметри MEMS капілярного типу зустрічаються набагато рідше, ніж ультразвукові та вібраційні (рис. 2.16).

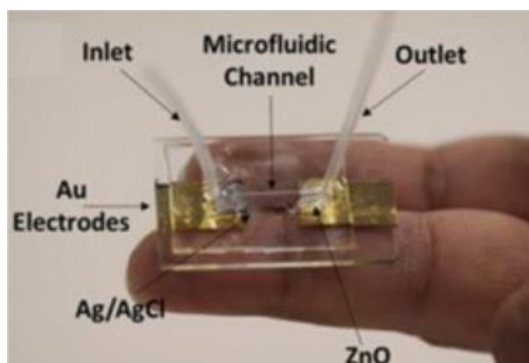


Рисунок 2.16 — Конструкція давача на базі MEMS капілярного типу

Вони вимагають виготовлення мікротекучих каналів та роботи зовнішнього насоса для отримання потоку рідини. Найбільш типова реалізація включає мікрофлюїдну систему, яка може одночасно виявляти швидкість потоку, падіння тиску і температури рідини через відому відстань для вимірювання в'язкості рідини [29].

Висновки за розділом

В якості прототипу вибираємо п'єзоелектричну консольну структуру, тобто розглянемо п'єзоелектричний перетворювач в діапазоні ультразвукових коливань. До переваг сенсорів на базі п'єзоелементів можна віднести простоту конструкції, низьку вартість, технологічність виготовлення. Робоча частота сенсора може досягати (50-100) кГц.

3 РОЗРОБКА П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ДАВАЧА

3.1 Основи виникнення п'єзоефекту

П'єзоелектричність — це властивість певних діелектричних матеріалів фізично деформуватися в присутності електричного поля або, навпаки, виробляти електричний заряд при механічній деформації.

Існує велика різноманітність матеріалів, які певною мірою демонструють це явище, включаючи природні кристали кварцу, полікристалічну п'єзокераміку, кістки та навіть дерево.

П'єзоелектричність зумовлена спонтанним розділенням заряду з певними кристалічними структурами за належних умов. Це явище, яке називають спонтанною поляризацією, є причиною зміщення електронних хмар відносно їх окремих атомних центрів, тобто зміщенням позитивних іонів щодо негативних іонів у їхніх кристалічних клітинках. В результаті маємо електричний диполь.

Полікристалічна кераміка, один з найактивніших відомих п'єзоелектричних матеріалів, складається з довільно орієнтованих кристалітів. Кожен кристаліт далі поділяється на крихітні "домени", або області, що мають подібні дипольні розташування. Загальний ефект випадково орієнтованих полярних доменів — це початкова відсутність п'єзоелектричної поведінки. Однак матеріал може спонукатись проявляти макроскопічну поляризацію в будь-якому заданому напрямку, піддаючи його сильному електричному полю, як показано на рисунку 3.1. Такі матеріали називаються сегнетоелектриками. Поляризація здійснюється шляхом застосування сильного електричного поля. Після поляризації сегнетоелектричний матеріал залишатиметься поляризованим, поки не деноляризується протилежним полем або підвищеною температурою [30].

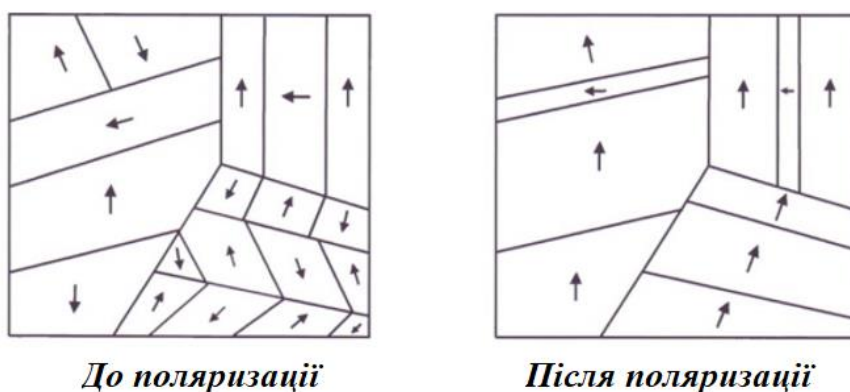


Рисунок 3.1 — Індукування макроскопічної поляризації в полікристалічній п'єзокераміці шляхом прикладання сильного електричного поля до випадково орієнтованих мікроскопічних полярних доменів

П'єзоелектричні матеріали (п'єзоелектрики), зокрема п'єзокераміка, відрізняються тим, що при деформації під дією зовнішнього механічного тиску на їх поверхні виникають електричні заряди. Цей ефект називається прямим п'єзоелектричним ефектом і був відкритий в 1880 р. братами Кюрі.

Прямий п'єзоелектричний ефект був відкритий спочатку у кристалах турмаліну. Було визначено, що якщо подавати механічний тиск на кристал у певному напрямку, на протилежних сторонах кристала виникають електричні заряди, пропорційні тиску і протилежної полярності. Пізніше вони відкрили подібний ефект у кварці та інших кристалах.

У 1881 р. був відкритий і зворотний п'єзо ефект — матеріал, розташований між двома електродами, реагує на прикладену до нього електричну напругу, змінюючи свою форму.

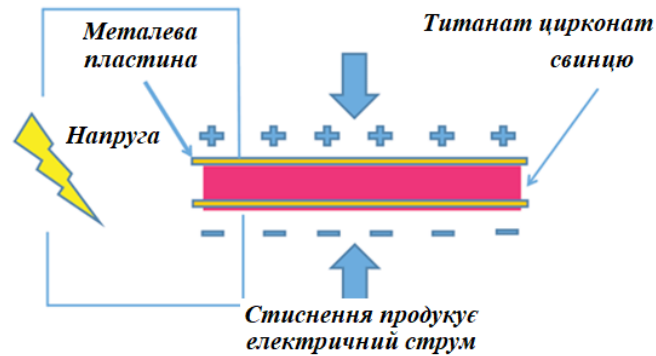


Рисунок 3.2 — Прямий п'єзоелектричний ефект відбувається за рахунок стиснення п'єзоелектричного матеріала

П'єзокерамічний матеріал — непровідна п'єзоелектрична кераміка або кристал — розміщується між двома металевими пластинами. Для отримання п'єзоелектрики потрібно, щоб цей матеріал був стиснутий. Механічне напруження, яке застосовується до п'єзоелектричного керамічного матеріалу, генерує електричний струм.

Як показано на рис. 3.2, потенціал напруги є в усьому матеріалі. Дві металеві пластини розміщені навколо п'єзокристалу. Металеві пластини збирають заряди, які створюють / виробляють напругу (символ блискавки). Таким чином, п'єзоелектричний ефект діє як мініатюрний акумулятор, оскільки він виробляє електроенергію. Це прямий п'єзоелектричний ефект. Пристрої, що використовують прямий п'єзоелектричний ефект, включають мікрофони, датчики тиску, гідрофони та багато інших пристроїв зондування [31].

П'єзоелектричний ефект може бути зворотним. Це відбувається при прикладенні електричної напруги для зменшення або розширення п'єзоелектричного кристала (рис. 3.3). Зворотний п'єзоелектричний ефект перетворює електричну енергію в механічну.

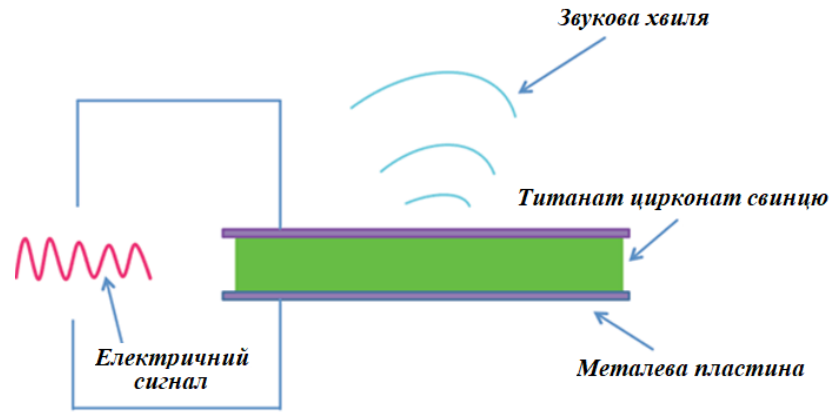


Рисунок 3.3 — Зворотній п'єзоелектричний ефект

Використання зворотного п'єзоелектричного ефекту може допомогти розробити пристрої, які генерують та видають акустичні звукові хвилі. Прикладами п'єзоелектричних акустичних пристроїв є динаміки (зазвичай зустрічаються в кишенькових пристроях). Перевага наявності таких динаміків полягає в тому, що вони дуже тонкі, що робить їх корисними для багатьох телефонів. Навіть медичні ультразвукові та сонарні перетворювачі використовують зворотний п'єзоелектричний ефект. Неакустичні зворотні п'єзоелектричні пристрої включають двигуни та пускачі.

Обернений п'єзо ефект застосовують для перетворення електричної енергії у механічну, здебільшого — для генерації звуку та ультразвуку в рідкому або повітряному середовищі. Інколи п'єзоелектрики використовують також і в контакт з твердою речовиною, в якій за допомогою п'єзо ефекту збуджуються ультразвукові або гіперзвукові хвилі. Крім того, обернений п'єзо ефект є фізичною основою п'єзоелектричних приводів — актуаторів та двигунів.

Найважливіші самостійні науково-технічні галузі, основані на використанні п'єзо ефекту, такі [32]:

- п'єзоелектроніка (п'єзотехніка об'ємних акустичних хвиль) – розроблення п'єзоприймачів, п'єзотрансформаторів і п'єзодвигунів, телефонів, адаптерів і мікрофонів, п'єзорезонаторів і п'єзофільтрів;
- акустоелектроніка (п'єзотехніка поверхневих акустичних хвиль) – розроблення мікроелектронних перетворювачів інформації – ліній затримки, фільтрів, датчиків зовнішніх впливів, підсилювачів і т. ін.;

– акустооптика — використання взаємодії оптичних хвиль з акустичними, що дозволяє розробляти дефлектори, оптичні фільтри й інші оптичні пристрої;

– МЕМС — застосування п'єзоелектрики як сенсорів і виконавчих елементів у мікроелектронних системах.

Основними характеристиками п'єзокерамічних матеріалів є [33]:

- коефіцієнт електромеханічного зв'язку (K_p);
- відносна діелектрична проникність ($\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$);
- питомий об'ємний електричний опір (ρ_V);
- густина (ρ);
- водопоглинання (W);
- п'єзомодуль у динамічному режимі (d_{31}, d_{33});
- п'єзомодуль в статичному режимі (d_{31});
- модуль Юнга (Y_{31});
- механічна добротність (Q_m);
- тангенс кута діелектричних втрат в слабких електричних полях ($\text{tg } \delta$);
- електрична міцність ($E_{\text{міц}}$);
- температура Кюрі (T_K);
- межа механічної міцності при статичному стисненні ($\sigma_{\text{сс}}$);
- межа механічної міцності зі статичним вигином ($\sigma_{\text{виг}}$);
- межа механічної міцності при статичному розтягуванні ($\sigma_{\text{розт}}$).

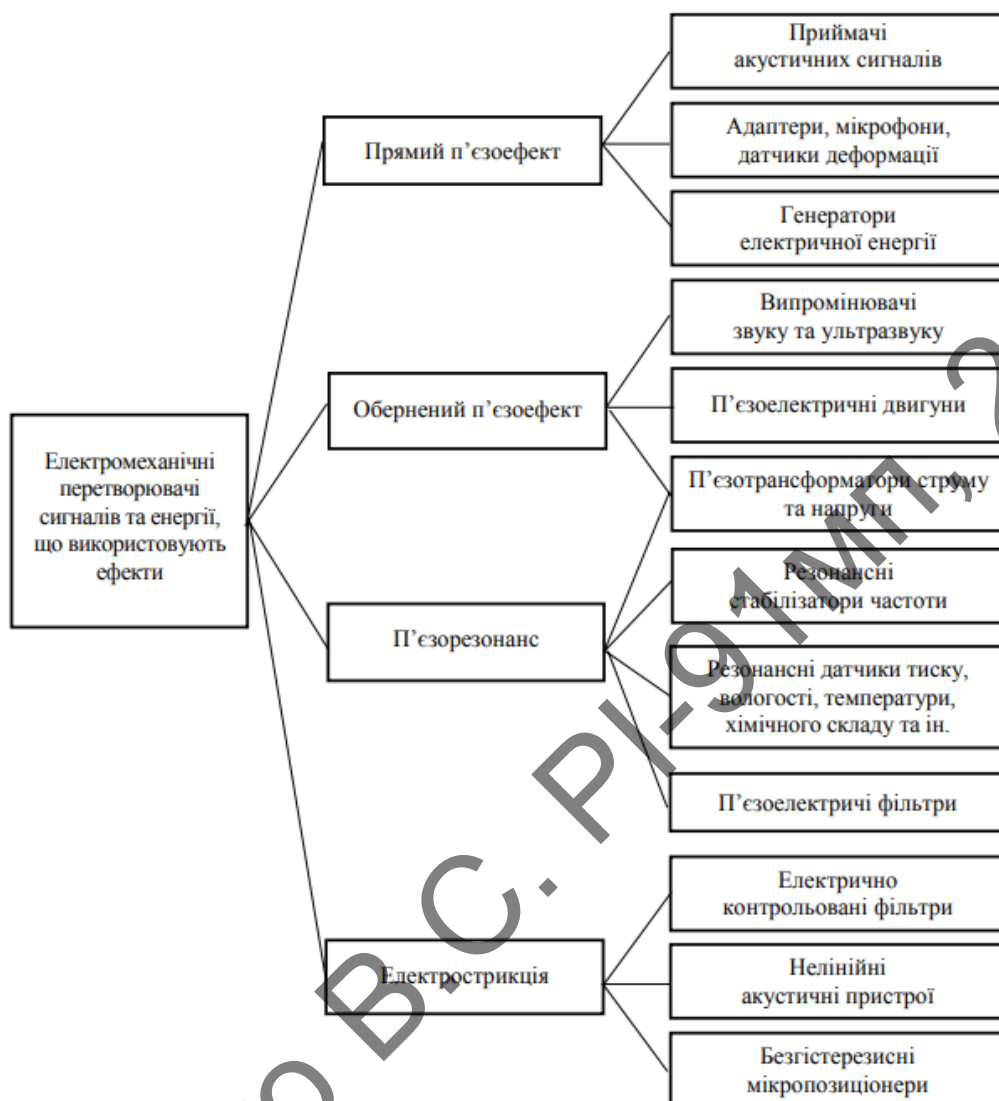


Рисунок 3.4 — Класифікація технічних застосувань п'єзоефекта

Отже, п'єзоефект широко застосовується для дослідження різних матеріалів в залежності від типу та характеру взаємодії з рідиною.

3.2 П'єзоелемент та розрахунок його резонансної характеристики

3.2.1 Електромеханічні характеристики п'єзоелемента

П'єзоматеріали характеризуються в основному такими параметрами: п'єзомодуль в напрямку робочих деформацій, модуль Юнга, коефіцієнт електромеханічного зв'язку і механічна добротність. Вони визначають діапазон переміщень, пружні і резонансні властивості, ефективність перетворення електричної енергії в механічну, ступінь загасання коливальних процесів п'єзоелемента. Тому у нашому випадку виберемо матеріал з високою добротністю.

Дуже важливою характеристикою п'єзоелемента є залежність опору (провідності) зразка п'єзокераміки від частоти напруги, що подається на його обкладки. По цій характеристиці можна визначити резонансні і антирезонансні частоти елемента [34].

П'єзоелектричний модуль (п'єзомодуль) d_{ij} – це відношення електричного заряду, що виникає на обкладинках п'єзоелемента, до сили, що викликає його деформацію F : $d_{ij} = \frac{q}{F}$. Одиниця виміру Кл/Н. Нижні індекси в позначенні п'єзомодуля вказують на взаємну спрямованість прикладеної сили і реакції п'єзоелемента відносно поляризації кристала (рис. 3.5).

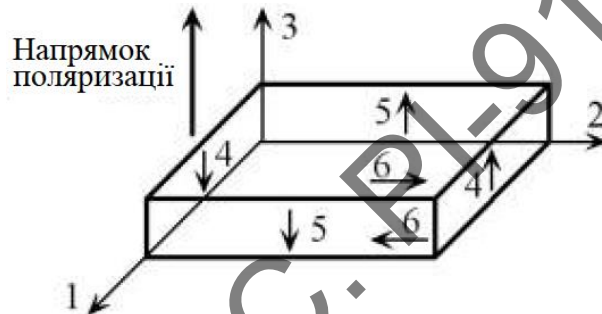


Рисунок 3.5 — Визначення напрямків впливу і реакції п'єзоелемента щодо напрямку поляризації

Наприклад, індекси в позначенні п'єзомодуля d_{31} для прямого п'єзоефекту означають, що механічна дія відбувалася в напрямку поляризації, а різниця потенціалів знімалася з граней, розташованих в площинах, перпендикулярних осі «1» рис. 3.5, а індекси п'єзомодуля d_{15} для зворотного п'єзоефекту означають, що різниця потенціалів прикладалася в напрямку осі «1», а зсувна деформація спостерігалася за напрямком «5» рис. 3.5.

Коефіцієнт електромеханічного зв'язку k_{ij} характеризує ефективність перетворення механічної енергії в електричну або навпаки: $k_{ij} = \sqrt{\frac{W_M}{W}}$ чи

$k_{ij} = \sqrt{\frac{W_E}{W}}$, де W – енергія, що прикладається до п'єзоелемента; W_M , W_E – енергія відгуку п'єзоелемента, механічна або електрична відповідно.

Добротність (механічна) — кількісна характеристика резонансних властивостей коливальних систем, яка вказує у скільки разів амплітуда коливань

при резонансі перевищує амплітуду коливань на граничній частоті смуги пропускання. Смуга пропускання (Δf) - це область частот, на межах якої енергія коливань системи вдвічі менше, ніж енергія на резонансній частоті (f_0). Добротність дорівнює відношенню резонансної частоти до ширини смуги пропускання.

Для п'єзоелектричної коливальної системи добротність можна виразити через частоти, пов'язані з механічним резонансом системи (резонансна частота f_p) і з електричним резонансом, який ще називають «антирезонанс» (антирезонансна частота f_a):

$$Q_M = \frac{f_a^2}{2\pi f_r z_r C_{пе} (f_a^2 - f_p^2)},$$

де Q_M — добротність; z_r — модуль комплексного опору на резонансі; $C_{пе}$ — ємність п'єзоелементу.

Модуль пружності Юнга (Y_{ij}), характеризує податливість матеріалу деформації. В позначенні має відповідні п'єзомодулю індекси.

3.2.2 Електрична модель п'єзоелемента

Оскільки п'єзоелемент є електромеханічною системою, то для спрощення розрахунку його параметрів можна провести аналогію між механічними і електричними характеристиками матеріалу. Для цього слід порівняти диференціальні рівняння, складені за другим законом Кірхгофа для послідовного RLC — кола, і механічної коливальної системи. Перше рівняння має вигляд:

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt = e(t),$$

де L , R , C — індуктивність, опір і ємність послідовного коливального контуру відповідно; $e(t)$ — ЕРС джерела, підключеного до кола, причому ЕРС можна виразити через напругу: $e(t) = u(t)$.

Рівняння для механічної коливальної системи можна записати у вигляді:

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + c \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = F(t),$$

де m , c , k — маса, коефіцієнт демпфування і коефіцієнт пружності відповідно, причому, $k = \frac{1}{\lambda}$, λ — податливість; x — зміщення під дією сили F .

З огляду на те, що похідна за часом від переміщення є швидкість $v(t) = \frac{dx(t)}{dt}$, можна переписати рівняння у вигляді:

$$m \frac{dv(t)}{dt} + cv(t) + \frac{1}{\lambda} \int v(t) dt = F(t).$$

Таким чином, можна провести аналогії між електричними і механічними характеристиками системи: Напруга u — сила F ; електричний струм i — v швидкість; індуктивність L — маса m ; електричний опір R — коефіцієнт демпфування c ; ємність C — податливість λ . Отже, індуктивний опір електричної системи має дорівнювати інерційному опору механічної, а ємнісний — пружному: $\omega L = \omega m = z_{\text{ін}}$; $\frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\omega \lambda} = z_{\text{пружн}}$. Електричний імпеданс має дорівнювати механічному: $Z_E = \frac{u}{i} = \frac{F}{v} = Z_M$.

З урахуванням того, що п'єзоелемент з електричної точки зору являє собою конденсатор, то, використовуючи наведені вище аналогії, буде коректним змодельовати електромеханічну систему п'єзоелемента у вигляді електричного кола, зображеного на рис. 3.6.

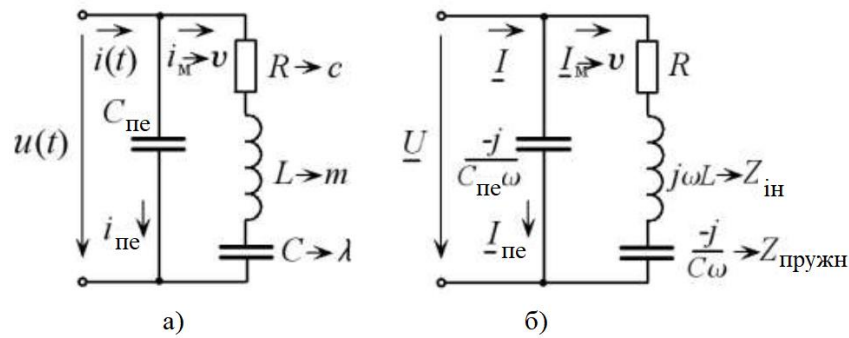


Рисунок 3.6 — Електрична модель п'єзоелемента: а – в часовій формі;
б – в комплексній формі

Схема на рис. 3.6 є схемою складного коливального контуру, в якому може спостерігатися резонанс струмів в паралельних гілках і резонанс напруг (механічний резонанс або антирезонанс) в послідовному коливальному контурі.

3.2.3 Розрахунок резонансних характеристик п'єзоелемента

Розрахунок резонансних характеристик п'єзоелементу проведемо для пластини цирконата титаната свинцю ЦТС 842 [35], який можна використати для нашого дослідження — вимірювання в'язкості паливно-мастильних матеріалів. Цей матеріал використовується для виготовлення п'єзодвигунів і віброелементів широкого призначення.

Для поставленої задачі вибираємо наступні геометричні розміри пластини п'єзоелемента: ширина $l_1 = 5$ мм; довжина $l_2 = 10$ мм; висота $l_3 = 2$ мм. Індeksi геометричних параметрів відповідають координатній сітці рис. 3.5.

Компанія-виробник п'єзокераміки APC International Ltd. декларує наступні характеристики матеріалу ЦТС 842:

- відносна діелектрична проникність $K^T = \frac{\epsilon_{33}}{\epsilon_0} = 1250$;
- точка Кюрі [$^{\circ}\text{C}$] $T_c = 325$;
- коефіцієнт електро механічного зв'язку $k_{31} = 0,35$;
- п'єзоелектричний модуль [$10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{Н}}$] $d_{33} = 300$; $-d_{31} = 125$; $d_{15} = 480$;
- модуль Юнга [$10^{10} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$] $Y_{11} = 8,0$; $Y_{33} = 6,8$;
- густина [$\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$] $\rho = 7,6$;

– добротність $Q_m = 600$.

Для розрахунку частотної характеристики п'єзоелементу, необхідно визначити параметри елементів кола рис. 3.6. Власну ємність п'єзоелемента $C_{\text{ПЕ}}$ можна розрахувати за формулою:

$$C_{\text{ПЕ}} = \frac{K^T \varepsilon_0 l_1 l_2}{l_3} (1 - k_{31}^2),$$

де K^T — відносна діелектрична проникність; ε_0 - електрична постійна ($\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); $l_1 \cdot l_2$ - площа грані п'єзоелемента; l_3 - товщина пластини п'єзоелемента; k_{31} - коефіцієнт електромеханічного зв'язку.

Підставляючи значення параметрів в формулу, розрахуємо власну ємність п'єзоелементу:

$$C_{\text{ПЕ}} = \frac{1250 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} (1 - 0,35^2) = 2,43 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}$$

Власна резонансна частота для пластинчатого п'єзоелемента визначається його механічними характеристиками — щільністю і пружністю:

$$\omega_0 = \frac{1,58}{l_3} \sqrt{\frac{Y_{11}}{\rho}},$$

де Y_{11} - модуль Юнга; ρ - щільність.

Підставляючи значення параметрів в формулу, розрахуємо власну резонансну частоту: $\omega_0 = 2,563 \cdot 10^6 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$

Резонансна частота електромеханічної системи розраховується з урахуванням коефіцієнта електромеханічного зв'язку:

$$\omega_p = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 - k_{31}^2}}.$$

Підставивши значення маємо: $\omega_p = 2,736 \cdot 10^6 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$

Ширину смуги пропускання розрахуємо з урахуванням добротності Q_M :

$$\Delta\omega = \frac{\omega_p}{Q_M}.$$

$$\text{Тоді } \Delta\omega = 4,56 \cdot 10^3 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Граничні частоти смуги пропускання резонансної системи (ω_1 і ω_2) визначаємо з системи рівнянь:

$$\begin{aligned} \Delta\omega &= \omega_2 - \omega_1; \\ \omega_p &= \sqrt{\omega_1 - \omega_2}. \end{aligned}$$

З урахуванням розрахованих значень $\Delta\omega$ і ω_p отримаємо:

$$\omega_1 = 2,736 \cdot 10^6 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \quad \omega_2 = 2,738 \cdot 10^6 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Для визначення частотної характеристики електромеханічної системи п'єзоелемента, скористаємося електричними аналогіями механічних параметрів пружної коливальної системи і схемою електричної моделі п'єзоелемента рис. 3.6. З урахуванням того, що індуктивний опір електричної системи має дорівнювати інерційному опору механічної, отримаємо значення індуктивності послідовного коливального контуру: $L = V\rho$, де V – об'єм пластини п'єзоелемента, $V = l_1 l_2 l_3$.

$$\text{Отже, } L = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 7,6 \cdot 10^3 = 76 \text{ (мГн)}.$$

Еквівалентну електричну ємність C (рис. 3.6) розрахуємо, використовуючи умову резонансу $\omega_p L = \frac{1}{\omega_p C}$:

$$C = \frac{1}{\omega_p^2 L} = 1,758 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}.$$

Опір електричної моделі рис. 3.6 визначимо з формули добротності послідовного резонансного контуру: $Q_M = \frac{\omega_p L}{R}$:

$$R = \frac{\omega_p L}{Q_M} = 3,466(\text{Ом}).$$

Схема на рис. 3.6 являє собою складний коливальний контур. У паралельному коливальному контурі спостерігається резонанс струмів, який характеризується мінімальною електричною провідністю системи (антирезонансу). У послідовному коливальному контурі на резонансній частоті ω_p (частинний механічний резонанс системи) електрична провідність максимальна. Визначимо комплексну частотну характеристику електромеханічної системи $Y(j\omega)$ (рис. 3.6), де Y — електрична провідність:

$$Y(j\omega) = C_{\text{ПЕ}} j\omega + \frac{1}{R + j(L\omega - 1/C\omega)} \frac{-C_{\text{ПЕ}} RC\omega^2 + ((C_{\text{ПЕ}} + C)\omega - C_{\text{ПЕ}} LC\omega^3) j}{1 - LC\omega^2 + RC\omega j}.$$

Перейдемо до показникової форми запису комплексних величин:

$$Y(j\omega) = \sqrt{\frac{(-C_{\text{ПЕ}} RC\omega^2)^2 + ((C_{\text{ПЕ}} + C)\omega - C_{\text{ПЕ}} LC\omega^3)^2}{(1 - LC\omega^2)^2 + (RC\omega)^2}} \cdot e^{j \left(\arctg \frac{(C_{\text{ПЕ}} + C)\omega - C_{\text{ПЕ}} LC\omega^3}{-C_{\text{ПЕ}} RC\omega} - \arctg \frac{RC\omega}{1 - LC\omega^2} \right)}.$$

де $Y(\omega)$ - амплітудно-частотна характеристика (АЧХ); $\varphi(\omega)$ – фазочастотна характеристика (ФЧХ).

Графіки АЧХ і ФЧХ електромеханічної системи побудовані в системі Mathcad і наведені на рис. 3.7 та рис. 3.8 відповідно. Розрахунки знаходяться в Додатку А.

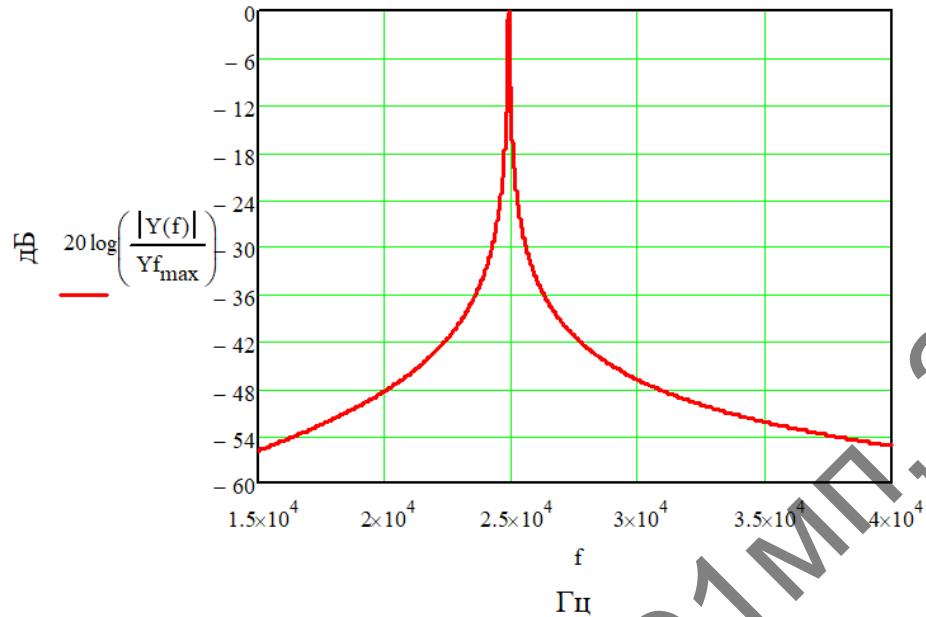


Рисунок 3.7 — АЧХ електромеханічної системи п'єзоелемента

Резонансна частота становить 25 кГц (діапазон ультразвуку).

За графіком АЧХ можна визначити поведінку електромеханічної системи, як на частотах, наближених до резонансних, так і на частотах, що істотно відрізняються від резонансних.

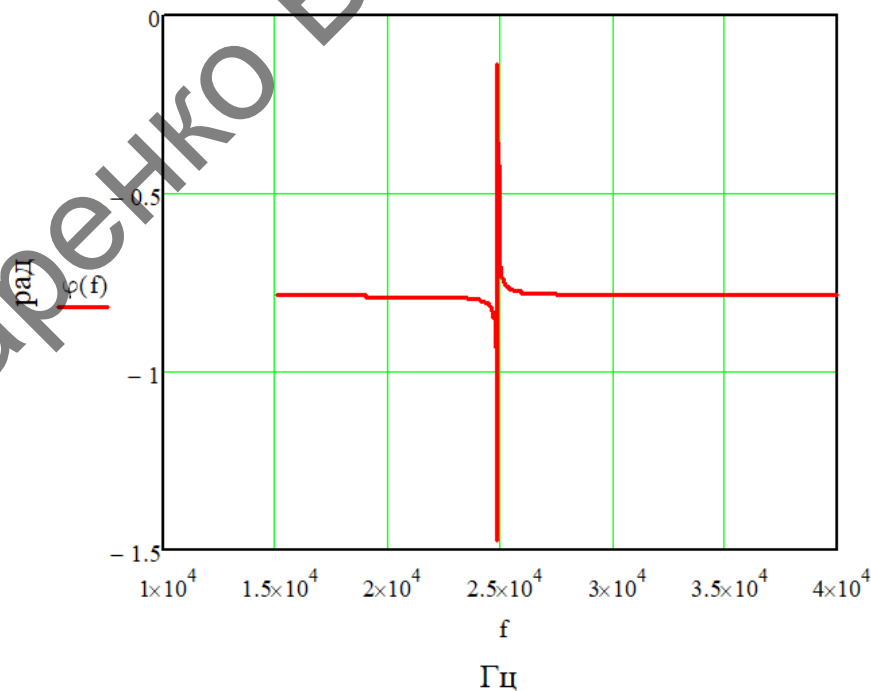


Рисунок 3.8 — ФЧХ електромеханічної системи п'єзоелемента

П'єзoeлектричний ефект сьогодні знаходить широке застосування в різних електромеханічних пристроях і системах. Тому, дотримання

характеристик п'єзоелементів при виробництві таких систем є основним завданням проектування. Запропонований алгоритм розрахунку частотних характеристик п'єзоелемента дозволяє на основі даних, що надаються фірмою - виробником п'єзокераміки визначити такі параметри п'єзоелемента заданої форми, як його резонансна і антирезонансна частоти, ширина полоси пропускання і граничні частоти смуги пропускання. Розрахунок цих параметрів простий, з його допомогою можна побудувати сімейство частотних характеристик для різних габаритів п'єзоелемента, що дає можливість розробникам електромеханічних систем на основі п'єзоефекту визначити оптимальну конструкцію чутливого або виконавчого елемента.

Для дослідження рідин можна використовувати певний розмір давача таким чином, щоб налаштуватися на резонанс (рис. 3.9).

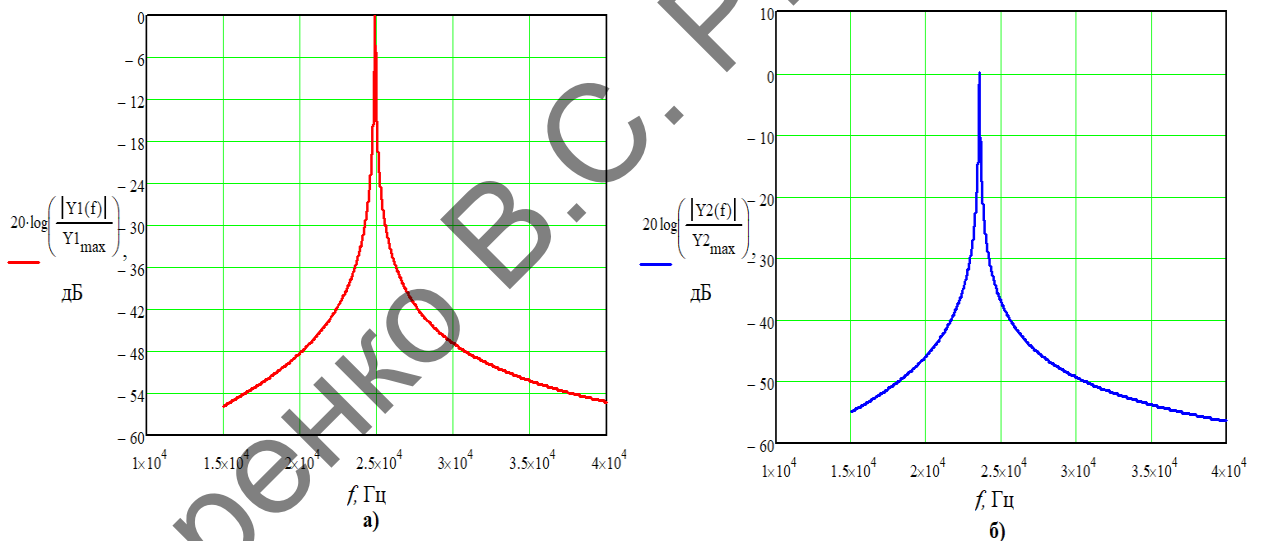


Рисунок 3.9 — АЧХ п'єзоелемента в залежності від його товщини: а) — 2 мм;
б) 2,2 мм

На рис. 3.9 наведено АЧХ для початкових габаритів п'єзоелемента (червона крива — резонансна частота 25 кГц) та при зміні товщини пластини п'єзокераміки на 10% (синя крива — 23,5 кГц). За графікою АЧХ можна визначити поведінку електромеханічної системи, як на частотах, наближених до резонансних, так і на частотах що, істотно відрізняються від резонансних.

3.3 П'єзоелектричні сенсорні диски

Ультразвукові давачі на п'єзоелектричних дисках засновані на п'єзоелектричному ефекті. Подача тиску на п'єзоелектричний матеріал призводить до генерації напруги на поверхнях електродів (прямий п'єзоелектричний ефект). І навпаки, застосовуючи електричне поле на п'єзоелектричному матеріалі, який реагуватиме розширенням або стиском (зворотній п'єзоефект). Використання обох ефектів дозволяє використовувати лише один диск ультразвукового датчика як для випромінювання, так і для виявлення звукових хвиль [36].



Рисунок 3.10 — Ультразвуковий перетворювач

При подачі сигналу змінного струму на електроди п'єзоелементу матеріал реагуватиме періодичним розширенням і стискуванням. Через внутрішню жорсткість і масу матеріалу механічні резонанси виникають на певних частотах. Коли елемент працює в резонансному режимі, амплітуда коливань та рівень звукового тиску та чутливість можуть бути значно посилені — ефект, який використовується в ультразвукових перетворювачах.

Ці резонанси можна класифікувати за різними режимами коливань. Ультразвукові давачі використовуються для поздовжніх або поперечних коливань (рис. 3.11).

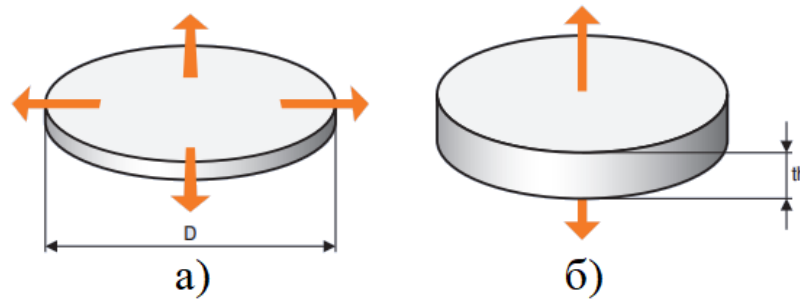
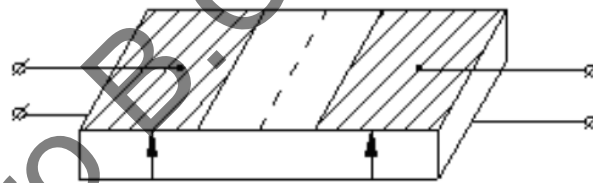


Рисунок 3.11 — Поздовжні а) та поперечні б) режими коливань п'єзоелектричного диска

Будь-який диск може мати як поздовжній, так і поперечний резонанси.

3.4 П'єзоелектричні трансформатори

П'єзоелектричний трансформатор — пластина з п'єзоелектричного матеріалу, що складається з двох секцій: збуджувач і генератор (рис. 3.12). Тобто, п'єзотрансформатором можна замінити два п'єзоелементи, що значно спростить конструкцію.



Збуджувач **Генератор**

Рис. 3.12 — Ілюстрація п'єзотрансформатора

Резонансні властивості електромеханічних приладів використовують у п'єзотрансформаторах. Ці прилади в радіоелектронних пристроях відіграють роль малопотужних і малогабаритних джерел електричної енергії. Від електромагнітних трансформаторів їх відрізняє схема перетворення енергії: «електрична — акустична — електрична», що зумовлює істотне спрощення конструкції п'єзотрансформатора (рис. 3.13), у якому немає яких-небудь проводів або обмоток, потрібних в електромагнітних трансформаторах [32].

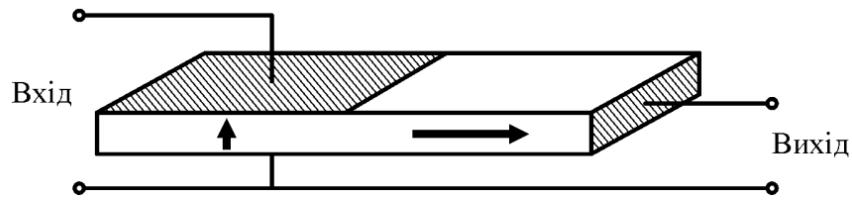


Рис. 3.13 — Найпростіший макет п'єзотрансформатора

За особливостями застосування і конструктивного використання розрізняють п'єзоелектричні трансформатори напруги і струму. Найбільш загальна характеристика п'єзотрансформаторів — значення п'єзодобротності, що визначає їх ККД: $G_{31} = k_{31}Q_M$, де k_{31} — коефіцієнт поперечного електромеханічного зв'язку; Q_M — механічна добротність для поперечних коливань п'єзоелемента.

Як робочий матеріал у п'єзотрансформаторах використовують різні види п'єзоелектричної кераміки, оскільки саме п'єзокераміка дозволяє конструктивно поєднувати в одній пластинці (диску, стрижні) обидва елементи п'єзотрансформатора — збудник і генератор. Це зумовлено технологічною можливістю диференційованого завдання орієнтації вектору п'єзоелектричної поляризації у процесі виготовлення компонентів відповідних моноблокових керамічних п'єзоелементів.

Використовуючи обернений п'єзоефект, збуджувач створює в пластинці механічну деформацію, що охоплює у вигляді резонансної хвилі весь об'єм п'єзоелемента (п'єзотрансформатори працюють у режимі акустичного резонансу). На частоті, яка дорівнює одній з резонансних механічних частот трансформатора, утворюється стояча хвиля з максимальною амплітудою коливань. У генераторній секції п'єзотрансформатора, в результаті вже прямого п'єзоефекту, виникає змінний електричний сигнал, гальванічним способом розділений із вхідною напругою. На резонансних частотах коефіцієнт трансформації має максимальне значення.

За способом перетворення енергії в збуднику і генераторі п'єзоелектричні трансформатори можна класифікувати як поперечно-поперечні, поздовжньо-поздовжні, поперечно-поздовжні, поздовжньо-поперечні.

За типом коливань п'єзоелектричні трансформатори підрозділяють на трансформатори з порушенням коливань поздовжніх, радіальних, зсуву і вигину.

Основні конструкції п'єзоелектричних трансформаторів показані на рис. 3.14 [33]. Трансформатор з поздовжньою поляризацією збудника і генератора (рис. 3.14, а) називається трансформатором кільцевого типу, а з поперечно-поздовжнього поляризацією (рис. 3.14, б і в) - трансформатором поперечного типу. Дисковий трансформатор (рис. 3.14, г) також є трансформатором поперечного типу, але має деякі особливості роботи, тому дискові трансформатори виділяють в окрему групу.

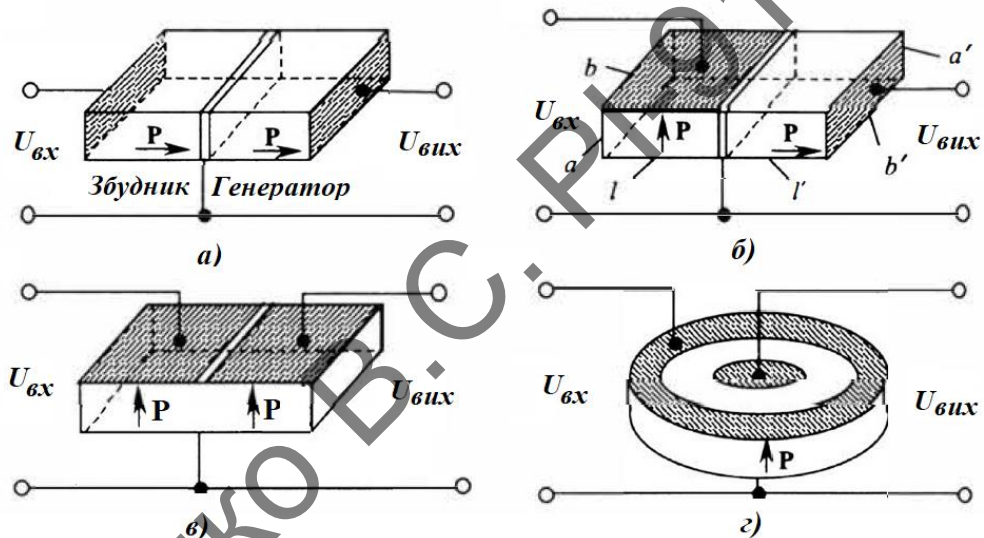


Рис. 3.14 — Конструкції п'єзоелектричних трансформаторів

Поздовжньо-поздовжні і поперечно-поперечні трансформатори є симетричними. Їх коефіцієнт трансформації не залежить від геометричних розмірів і досягає декількох десятків і навіть сотень одиниць.

Поперечно-поздовжній трансформатор є несиметричним, і його коефіцієнт трансформації залежить від співвідношення геометричних розмірів. Ця конструкція трансформатора становить найбільший практичний інтерес. Коефіцієнт трансформації поперечно-поздовжнього трансформатора може досягати декількох тисяч.

Загальна характеристика п'єзотрансформаторів залежить від електричної добротності, що визначає їх ККД, а також залежить від коефіцієнта

електромеханічного зв'язку і механічної добротності конкретного п'єзоелектричного матеріалу та типу коливань.

3.4.1 Моделювання п'єзотрансформатора для дослідження рідин

Розглянемо метод вимірювання в'язкості рідини за допомогою п'єзоелектричного трансформатора, поміщеного в досліджувану рідину (дизельне паливо), шляхом збудження в ньому вільних коливань і визначенні в'язкості по числу цих коливань, що перевищують деякий фіксований рівень.

Як було показано в [37], при імпульсному збудженні п'єзопретворювача в ньому виникають коливання з власною частотою, загасаючою по експоненціальному закону з показником загасання δ :

$$\delta = \frac{R}{2L},$$

де R — активні втрати контура, Ом; L — індуктивність, Гн.

Активний опір R , включений в коло коливального контуру (рис. 3.6), що характеризує втрати в п'єзоелементі (внутрішнє тертя), для даного випадку має бути доповнений ще двома опорами:

- опором, що характеризує в'язкість рідини;
- опором, що характеризує втрати на випромінювання, та залежить від співвідношення акустичних опорів п'єзокераміки та рідини.

При незмінній величині внутрішнього тертя п'єзокераміки і ультразвукових втрат, загасання коливань залежить тільки від в'язкості рідини.

Декремент загасання Δ дорівнює [38]:

$$\Delta = e^{\delta T} = e^{-\frac{R}{2Lf_p}},$$

де f_p — резонансна частота, $f_p = \frac{1}{T}$; R — сума всіх трьох опорів, розглянутих вище: $R = R_1 + R_2 + R_3$; L — еквівалентна індуктивність п'єзоелемента.

Число вільних коливань N_0 від значення початкової амплітуди A до амплітуди a можна визначити з виразу:

$$e^{-\frac{RN_0}{2Lf_p}} = \frac{1}{a}.$$

Після перетворень отримаємо:

$$N_0 = \frac{2Lf_p}{R} \ln \frac{1}{a}.$$

Число коливань за секунду:

$$N = f_{сл} f_p \frac{2L}{R_1 + R_2 + R_3} \ln \frac{1}{a}, \quad (3.1)$$

де $f_{сл}$ — частота слідування імпульсів.

Звідси випливає, що за кількістю загасаючих коливань N , що перевищують фіксований рівень a , можна судити про в'язкість рідини. Характер і тип збуджуваних коливань залежить від геометрії п'єзоелемента, його кріплення, напрямку поляризації.

Для досліджуваних рідин необхідні параметри, наведені нижче.

Моделювання буде включати:

- побудова амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) контуру;
- побудова фазочастотних характеристик (ФЧХ) контуру;
- визначення впливу опору на затухаючий процес.

Для цього розглянемо еквівалентний послідовний коливальний контур з такими параметрами:

- частота генератора гармонічного сигналу від 20 Гц до 50 кГц;
- амплітуда 1 В;
- індуктивність 200 мГн;
- ємність 20 нФ;
- резонансна частота 25 кГц.

Дослідження моделі проведемо в системі NI Simulink 14.1 згідно з розробленою схемою (рис. 3.15).

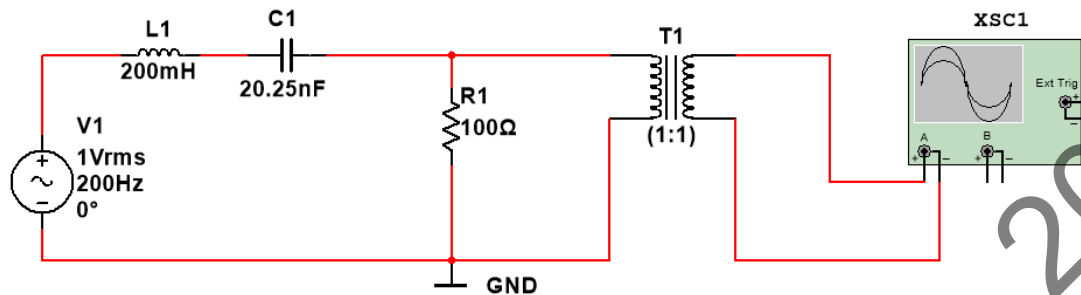


Рисунок 3.15 — Схема послідовного коливального контура (моделі п'єзоелектричного трансформатора)

Результати моделювання наведені на рис. 3.16.

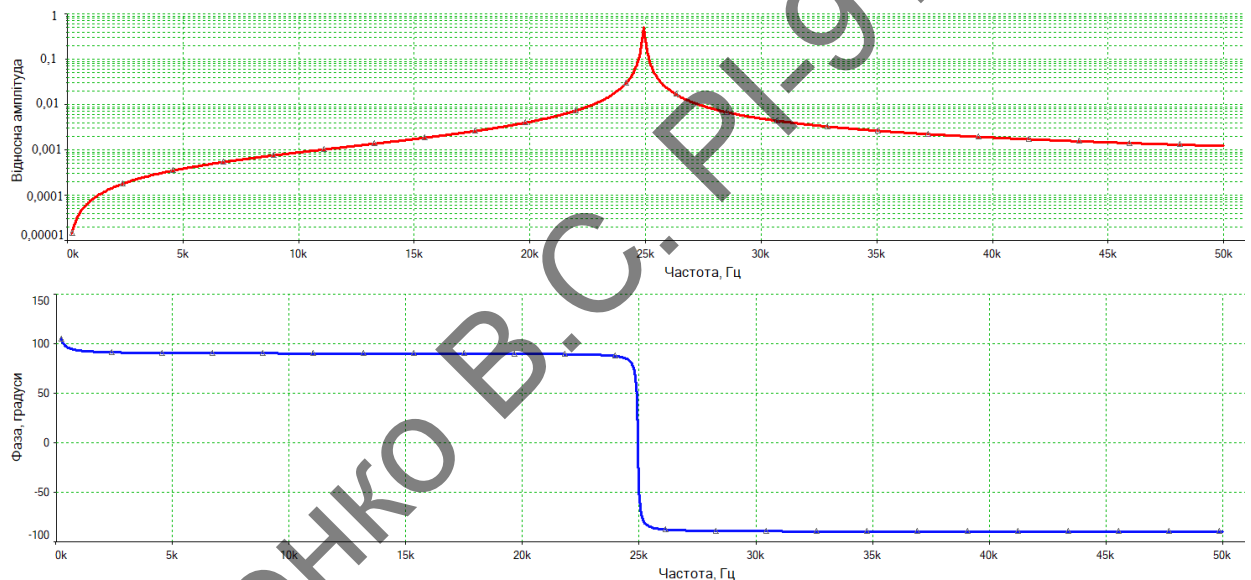


Рисунок 3.16 — АЧХ та ФЧХ еквівалентної моделі п'єзотрансформатора

Згідно рис. 3.16, резонанс настає на частоті 25 кГц. Графік АЧХ побудовано уже в логарифмічному масштабі (система NI Simulink 14.1)

Виконаємо моделювання при тривалості збуджуючого імпульсу 0,1 мс, період проходження імпульсів 15 мс, амплітуда імпульсу 1В.

Дослідження моделі проведемо в системі NI Simulink 14.1 згідно рис. 3.17.

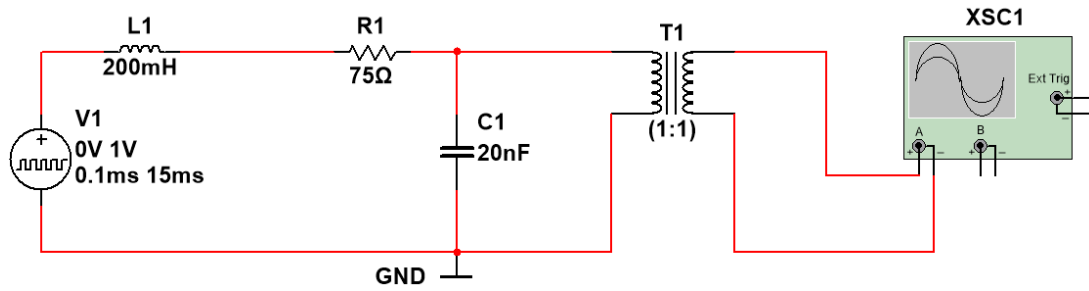
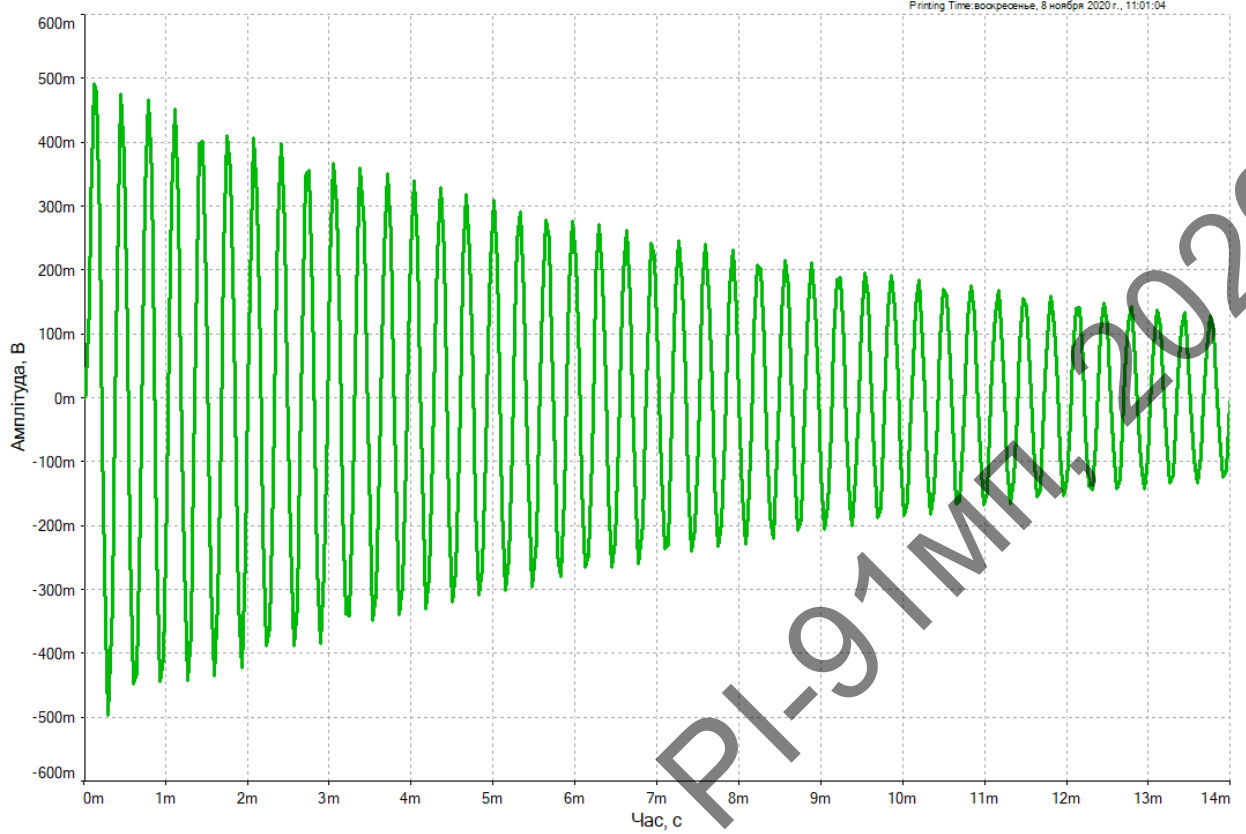
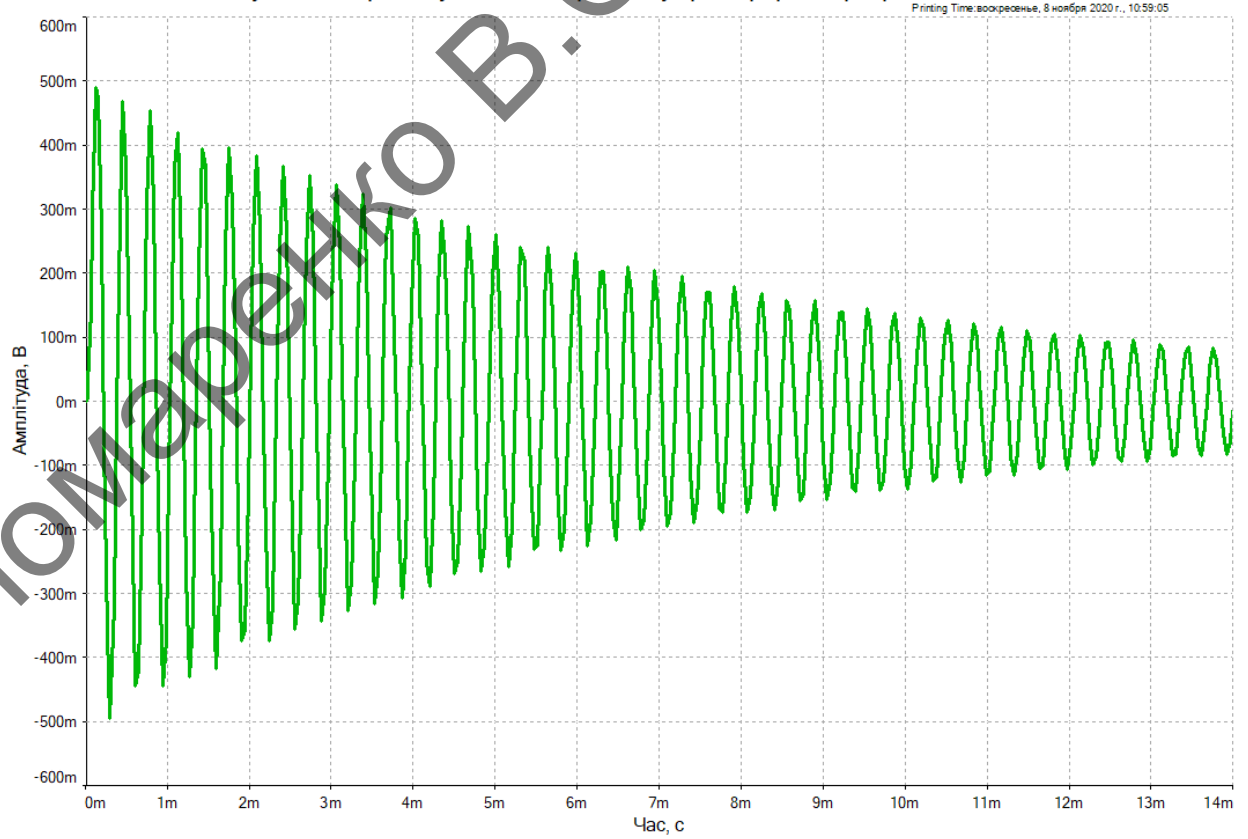


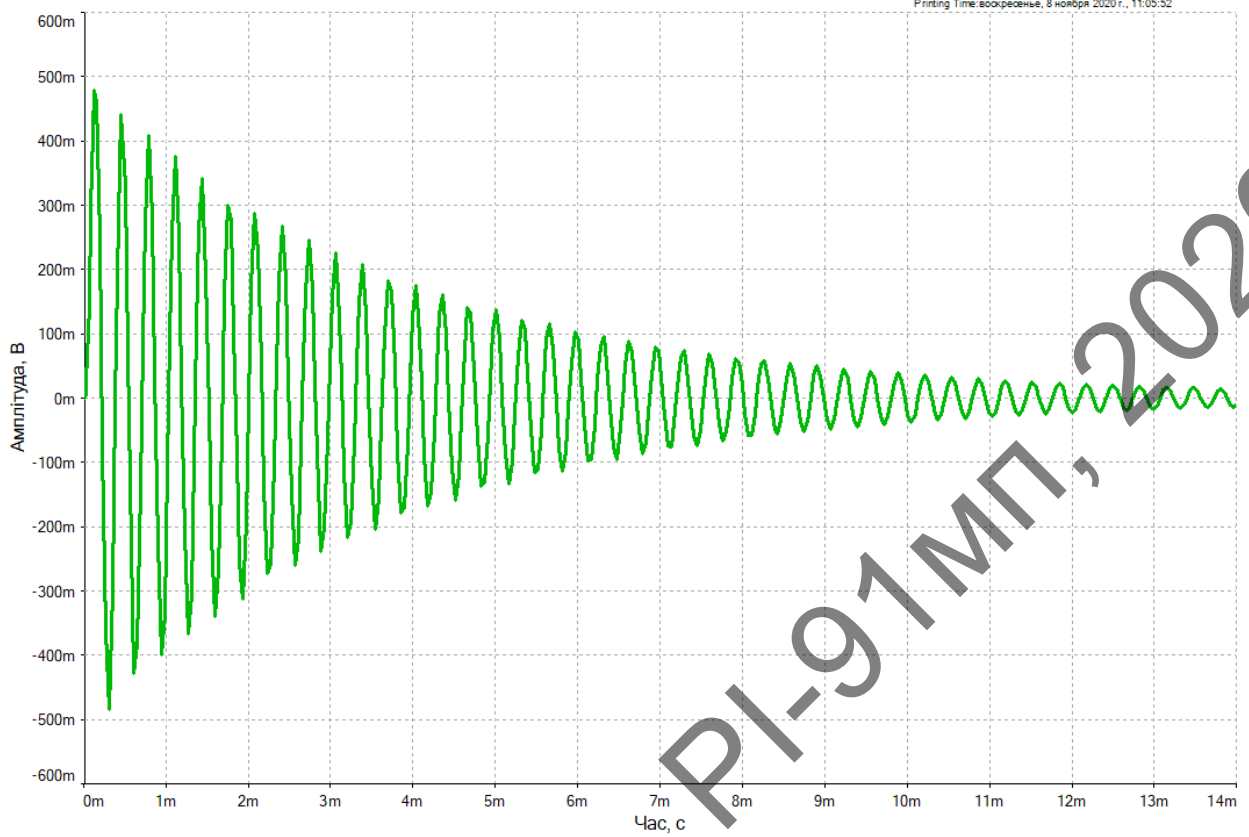
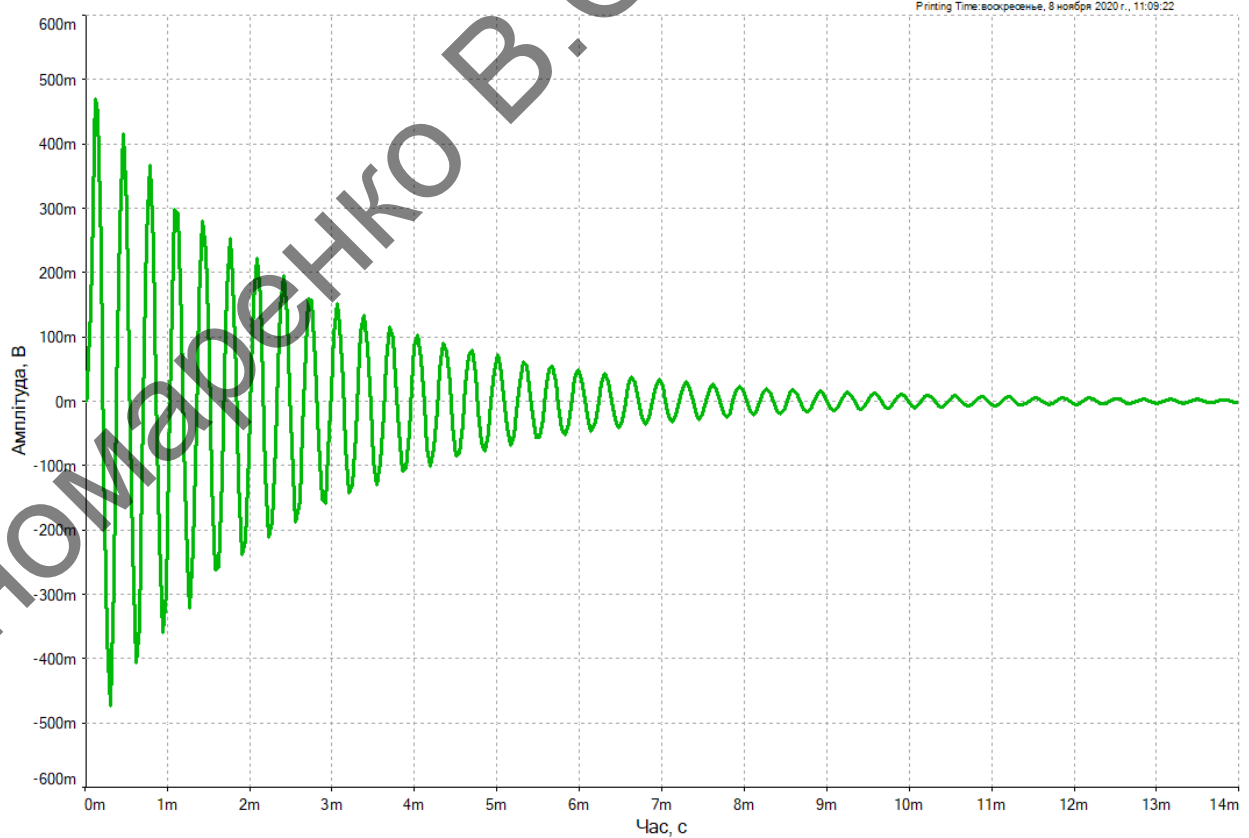
Рисунок 3.17 — Схема моделі дослідження п'єзоелектричного трансформатора

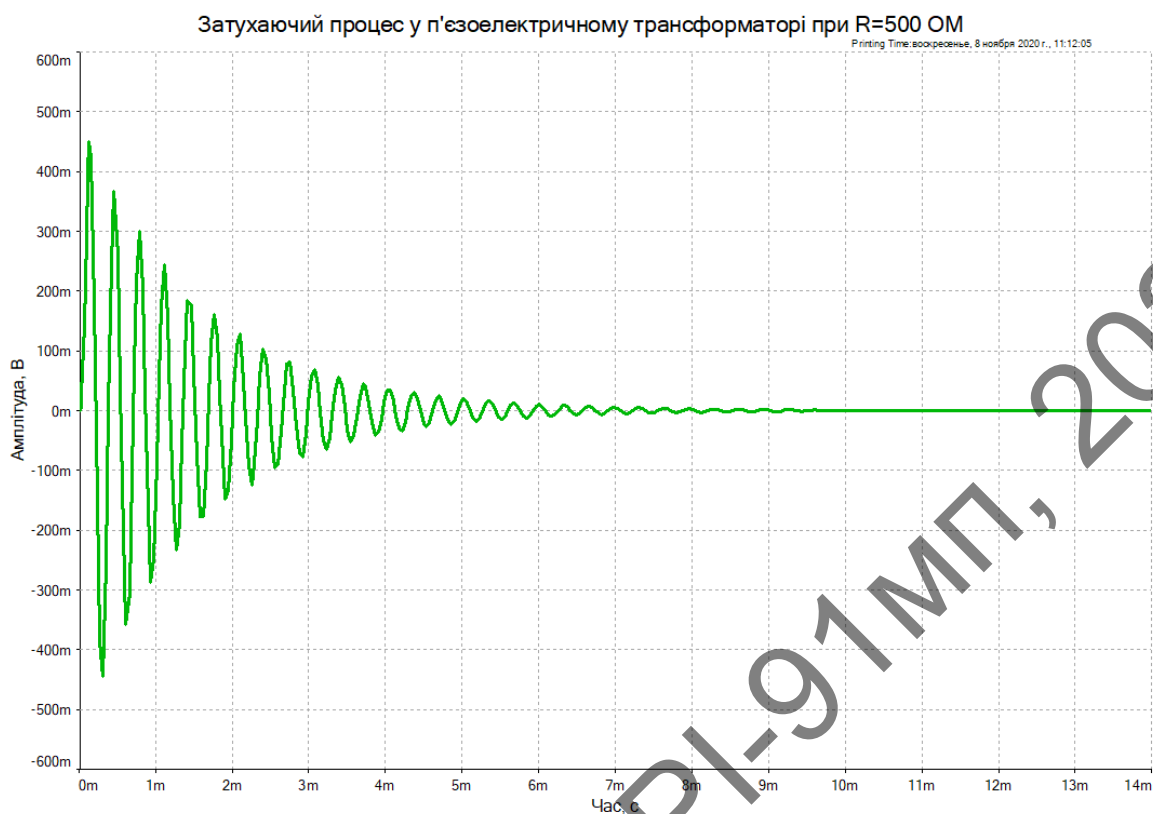
Результати моделювання наведено на рис. 3.18.

Пономаренко В.С. РІ-91МП, 2020

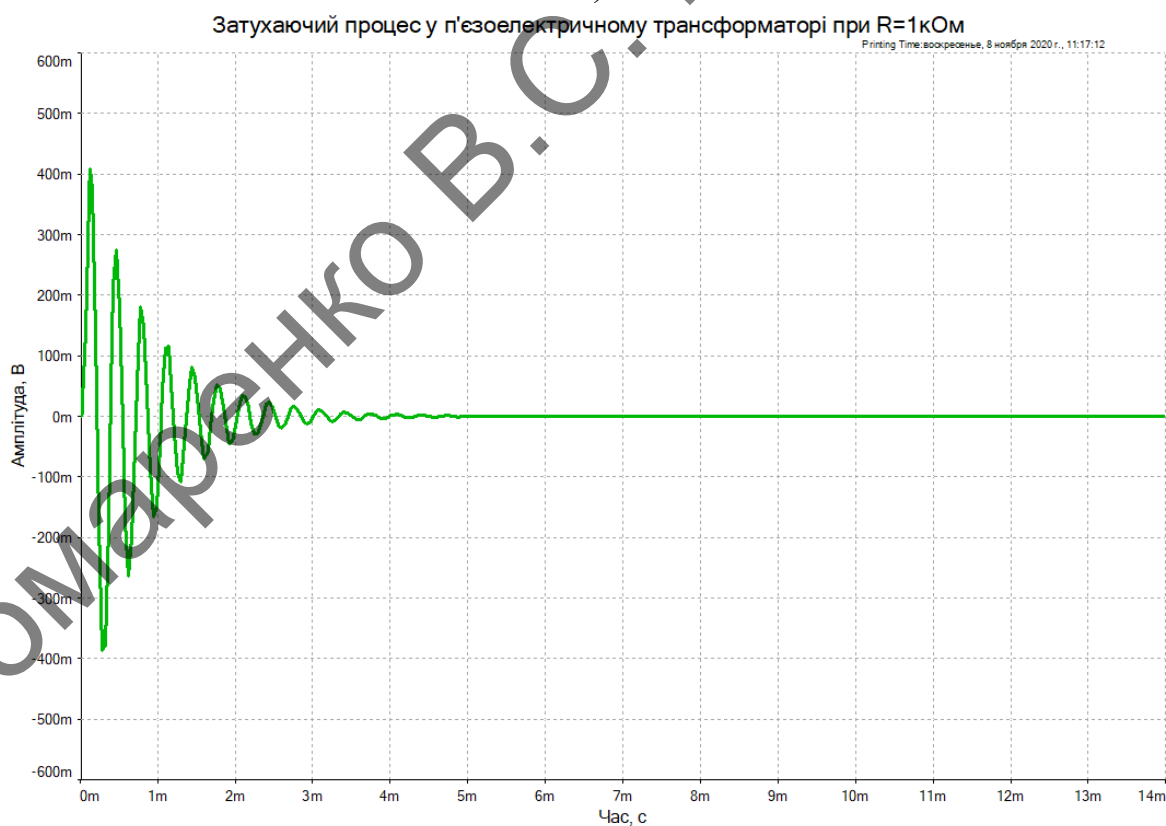
Затухаючий процес у п'єзоелектричному трансформаторі при $R=75 \text{ OM}$ Затухаючий процес у п'єзоелектричному трансформаторі при $R=100 \text{ OM}$ 

б)

Затухаючий процес у п'єзоелектричному трансформаторі при $R=200 \text{ Ом}$ Затухаючий процес у п'єзоелектричному трансформаторі при $R=300 \text{ Ом}$ 



д)

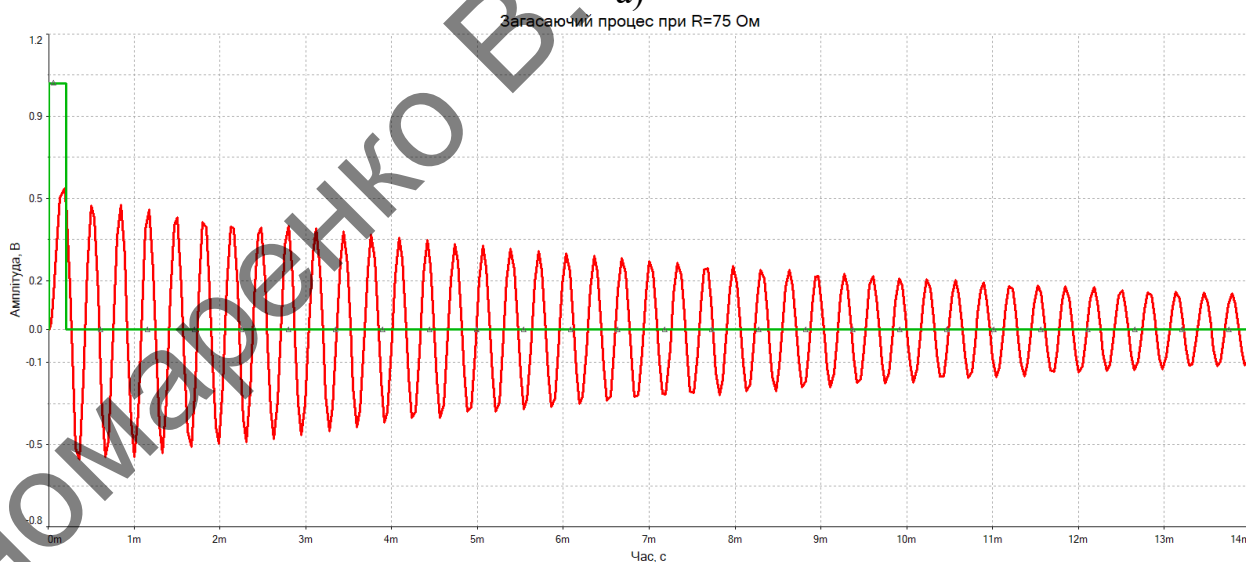
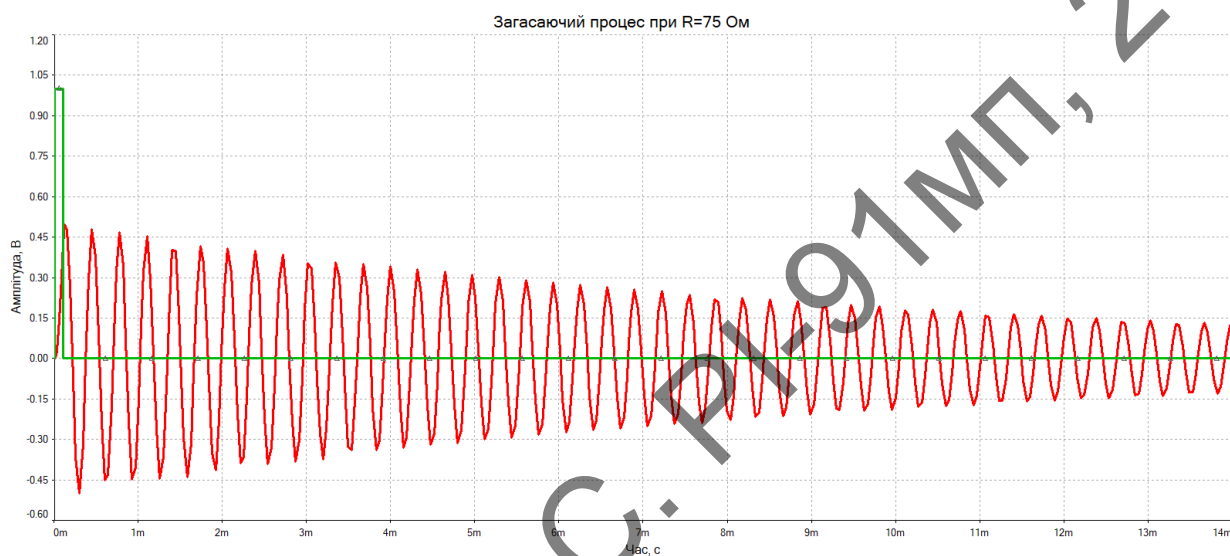


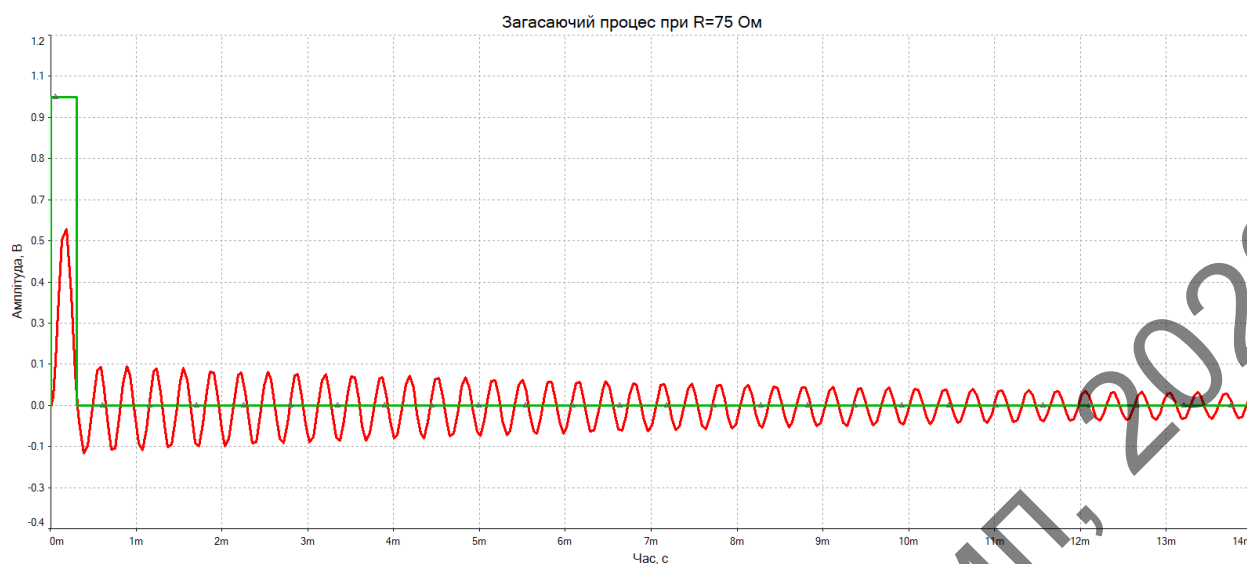
е)

Рисунок 3.18 — Затухаючий процес в п'єзоелектричному трансформаторі при: а) $R=75 \text{ Ом}$; б) $R=100 \text{ Ом}$; в) $R=200 \text{ Ом}$; г) $R=300 \text{ Ом}$; д) $R=500 \text{ Ом}$; е) $R=1000 \text{ Ом}$.

Як видно з рис. 3.18, чим більша величина втрат R , тим швидше загасання коливань.

Проведемо дослідження впливу тривалості імпульсів на характеристику загасання коливань в п'єзоелектричному трансформаторі. Для цього виконаємо моделювання при постійному опорі $R = 75$ Ом і при тривалості імпульсів: 0,1 мс, 0,2 мс, 0,3 мс.





в)

Рисунок 3.19 — Затухаючий процес в п'єзоелектричному трансформаторі при $R=75$ Ом та при тривалості імпульсів а) 0,1 мс; б) 0,2 мс; в) 0,3 мс

Згідно рис. 3.19, оптимальною є тривалість імпульсів (0,1 – 0,2) мс. Так як при більшій тривалості маємо різке загасання амплітуди (червона крива на рисунках), а наш метод визначенні в'язкості базується на кількості збуджених вільних коливань, що перевищують деякий фіксований рівень (більше 0,3 В).

Зелена крива на рис. 3.19 — збуджуючий імпульс.

Реалізація запропонованого методу вимірювання в'язкості

Структура сенсора зображена на рис. 3.20. Сенсор складається з п'єзоелектричного трансформатора, провідників для його підключення до контактів сенсора. Всі складові сенсора розташовані в заливному матеріалі (епоксидна смола).

Сенсор під час вимірювання в'язкості має бути зануреним на глибину L (якщо він не є вбудованим пристроєм), або кріпитися до стінки по площині Y в протилежному випадку (рис. 3.20).

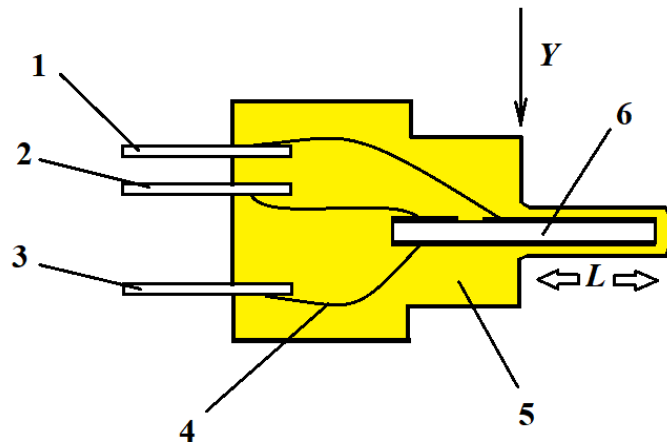


Рисунок 3.20 — Структура запропонованого сенсора: 1 — вхід сенсора; 2 — вихід сенсора; 3 — загальна шина; 4 — провідники для підключення п'єзоелектричного трансформатора; 5 — заливний матеріал; 6 — п'єзоелектричний трансформатор

Отже, можна стверджувати, що сенсор є портативним пристроєм.

Як зазначалось раніше матеріалом для п'єзотрансформатора було обрано п'єзокераміку ЦТС 842, котра має високу добротність $Q_m = 600$. Високий показник механічної добротності необхідний для підвищення електроакустичної ефективності перетворювача за рахунок зниження механічних втрат.

Структура пристрою для вимірювання в'язкості зображена на рис. 3.21.

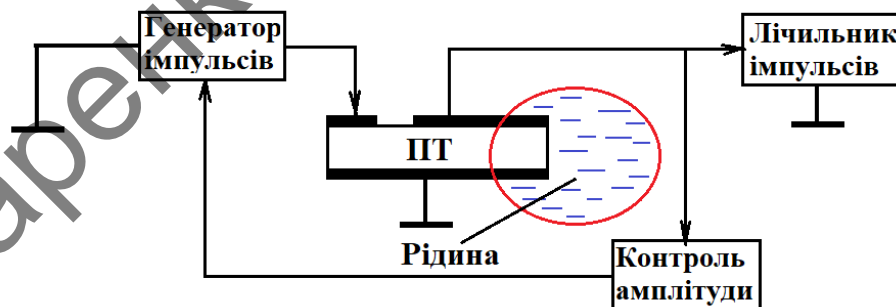


Рисунок 3.21 — Структура запропонованого пристрою (ПТ — п'єзоелектричний трансформатор)

Пристрій працює наступним чином.

Контакти сенсора підключаються до генератора імпульсів (контакт 2), лічильника коливань (контакт 1) та до загальної шини (контакт 3). Сенсор поміщається в ємність з рідиною.

Генератор імпульсів збуджує в п'єзоелектричному трансформаторі поздовжні вільні (загасаючі) коливання. Загасання цих коливань залежить як від втрат в самому п'єзоелементі, так і від в'язкості рідини. Як зазначалося у формулі (3.1) при незмінній величині внутрішнього тертя п'єзокераміки (R_1) втрат на випромінювання (R_3), загасання однозначно залежить від в'язкості рідини (R_2). Визначення в'язкості виконується лічильником по числу загасаючих коливань, що перевищують фіксований рівень.

Висновки за розділом

Резонансна частота п'єзоперетворювача залежить від його геометричних розмірів.

В'язкість можна вимірювати ультразвуковий методом шляхом збудження в п'єзоелектричному трансформаторі загасаючих коливань і вимірі числа коливань, що перевищують фіксований рівень.

Загасання коливань в п'єзоелектричному перетворювачі залежить не тільки від в'язкості рідини, але і від глибини його занурення в рідину.

4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Цей розділ призначений для проведення маркетингового аналізу стартап-проекту для визначення можливості його застосування на ринку та можливих варіантів його використання.

4.1 Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології)

В даному підрозділі проводиться аналіз змісту ідеї, можливі варіанти застосування, основні вигоди, що можуть бути у даного товару та основні відмінності від існуючих аналогів.

Таблиця 4.1 — Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувачів
Вимірювання в'язкості рідини за допомогою п'єзоелектричного методу	Спрощення процесу вимірювання в'язкості	Новий підхід до вимірювання в'язкості при менших розмірах
	Можливість розробки обладнання для вимірювання в'язкості з меншою собівартістю	
	Вдосконалення існуючого підходу для вимірювання в'язкості	

Конкурентами є подібні методи та пристрої для вимірювання в'язкості.

До довгострокових перспектив можна віднести:

- Використання оптимізованого п'єзоелектричного підходу ультразвукового методу.

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В даному підрозділі проводиться аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту.

Таблиця 4.2 — Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідеї проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Вимірювання в'язкості ультразвуковим методом	Технологія надання послуги	Так	Так
2		Наявність бази досліджень	Так	Так
3		База проведення досліджень	Ні	Так
4		Оформлення результатів досліджень	Ні	Так
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Технологія надання послуги				

Отже, було обрано технологію надання послуги.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

В цьому пункті визначаються ринкові можливості, котрі можуть бути використаними в разі ринкового впровадження проекту, а також ринкові загрози, це дозволяє спланувати варіанти та напрямки розвитку проекту з урахуванням стану ринку, потреб можливих клієнтів і пропозицій, що надають проекти-конкуренти (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 — Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од.	1
2	Загальний обсяг продажів, ум. од.	Невідомий
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер)	Невідома
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Існують
6	Середня норма рентабельності по ринку, %	Невідома

В результаті проведеного дослідження випливає, що проект привабливий для виходу на ринок за попереднім оцінюванням.

Наступним кроком є проведення аналізу ринкового середовища: необхідно створити таблицю факторів, що не дозволяли впровадити проект на ринку (табл. 4.4), та таблицю факторів, що навпаки сприяють його впровадженню.

Таблиця 4.4 — Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Більш ефективний метод вимірювання у конкурентів	Вплив на систему	Вихід із ринку

Таблиця 4.5 — Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Моніторинг потреб споживача	Зворотній зв'язок	Контакт із споживачем після продажу продукції

Таблиця 4.6 — Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможним)
1	2	3
1) Вказати тип конкуренції – монополія/олігополія/монополістична/чиста	Олігополія	Працю в рамках спрощення процесу виміру пропускної здатності радіоканалу
2) За рівнем конкурентної боротьби – локальний/національний/..	Локальний	Необхідно прикласти якомога більші зусилля для охоплення всього ринку
3) За галузевою ознакою – міжгалузева/внутрішньогалузева	Внутрішньогалузева. Конкуренція ведеться в технічній галузі України	Для того, щоб зайняти стійкі конкурентні позиції на ринку, необхідно зосередити зусилля на пошуку конкурентних переваг

Продовження таблиці 4.6

1	2	3
4) Конкуренція за видами товарів	Товарно-видова. Конкуренція на рівні марки товару. Існує конкуренція з марками-конкурентами.	Веде конкурентну боротьбу між товарами одного виду.
5) За характером конкурентних переваг – цінова/нецінова	Нецінова	Головною конкурентною перевагою є мала собівартість використання метода
6) За інтенсивністю – марочна/не марочна	Марочна	Диференціація методів та моделей за мотивом задоволення потреб

Таблиця 4.7 — Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
1	ViscoQC	Виробники п'єзоелектричних віскозиметрів	Невідомі	Невідомі	Невідомі

Значний вплив на рівні марки товару.

В межах структурного аналізу конкуренції визначено тип конкуренції – олігополістична конкуренція.

Фактори конкурентоспроможності наведено в табл. 4.10

Таблиця 4.8 — Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№	Фактори конкурентоспроможності	Обґрунтування вибору
1	Простота	Дана розробка не вимагає особливих знань
2	Актуальність	Необхідність ринку в даному пристрої
3	Асортимент	В разі збільшення інтенсивності між конкурентами завоювання можливе в разі використання нових методів та алгоритмів

Виконаємо SWOT – аналіз:

Таблиця 4.9 — SWOT – аналіз стартап-проекту

Сильні сторони	Слабкі сторони
<ol style="list-style-type: none"> Простота; Актуальність; Асортимент. 	<ol style="list-style-type: none"> Невідома компанія; Недостатнє забезпечення ресурсами.
Можливості	Загрози
<ol style="list-style-type: none"> Додатковий функціонал; Нові технології. 	<ol style="list-style-type: none"> Продукти-замінники.

З SWOT – аналізу виходить, що потреби в запровадженні альтернативної ринкової поведінки немає.

4.4 Розробка ринкової стратегії стартап-проекту

Передусім розроблення ринкової стратегії — це визначення стратегії охоплення ринку, тобто опис цільових груп, що є потенційними споживачами розроблюваного продукту (табл. 4.11).

Таблиця 4.11 — Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний в межах цільової групи (сегмента)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу в сегмент
1	Вчені та науковці, що займаються дослідженням методів віскозиметрії	Готовий	Високий	Середня	Висока
Які цільові групи обрано: компанії-розробники віскозиметрів та компанії, що займаються дослідження методів віскозиметрії					

В результаті аналізу обрано стратегію фокусування.

Складемо базову стратегію розвитку для роботи в обраних сегментах (табл. 4.12).

Таблиця 4.12 — Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Базова стратегія розвитку
1	Стратегія диференційованого маркетингу	Простота, актуальність, асортимент	Стратегія фокусування

Також необхідно обрати конкурентну поведінку (табл. 4.13).

Таблиця 4.13 — Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект “першопрохідцем” на ринку	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Так	Залучати нових і забирати існуючих	Ні	Патієнтна стратегія

У відповідності до вимог користувача до виробника, до продукту (табл. 4.5), до базової стратегії розвитку (табл. 4.12) та до стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.13) сформуємо стратегію позиціонування (табл. 4.14), за якою споживачі можуть ідентифікувати марку чи продукт.

Таблиця 4.14 — Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
1	Відповідність дійсним нормам і точність	Стратегія фокусування	Простота, актуальність, асортимент	Вчені та науковці, що займаються дослідженням методів віскозиметрії

4.5 Розроблення маркетингової програми

Для початку необхідно скласти маркетингову концепцію товару, тому у табл. 4.15 виконуємо підбиття підсумків аналізу конкурентоспроможності товару.

Табл. 4.15 — Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Спрощення процесу вимірювання в'язкості	Менші розміри при необхідній точності	Простота, актуальність, асортимент

Далі необхідно розробити маркетингову модель товару задля уточнення ідеї продукту, його складових та особливостей (табл. 4.16).

Доречно зазначити, що розроблюваний товар матиме захист від копіювання за рахунок інтелектуальної власності.

Таблиця 4.16 — Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Складові та сутність
1	2
1. Товар за задумом	Опис базової потреби споживача та її основної вигоди
2. Товар у реальному виконанні	Властивості та характеристики
	Підвищення ефективності вжитку пристрою Новий підхід до п'єзоелектричного методу
3. Товар із підкріпленням	До продажу – рівень виконання розробки
	Після продажу – ряд методів та алгоритмів
За рахунок чого товар буде захищено від копіювання: інтелектуальна власність	

Далі визначаються цінові межі, якими потрібно керуватися при визначенні ціни на майбутній товар, враховуючи ціни на пристрої-аналоги та товари-субститути, а також дохід групи потенційних покупців.

Таблиця 4.17 — Визначення меж встановлення ціни

№	Рівень ціни на товари-замінники, тис. ум. од.	Рівень цін на товари-аналоги, тис. ум. од.	Рівень доходів цільової групи споживачів	Межі встановлення ціни на товар
1	3-15	До 15	Середній	5-10

Таблиця 4.18 — Формування систем збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки	Функції збуту постачальника	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Невідома	Вільний доступ до товару	Невідома	Вільний доступ до товару

Останньою складовою є розробка концепції маркетингових комунікацій, що визначає специфіку поведінки клієнтів (табл. 4.19).

Таблиця 4.19 — Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Невідома	Наукові публікації і технічна сфера	Простота, актуальність, асортимент	Донести переваги до потенційних клієнтів	Донесення вигоди від стартап-проекту

Висновки за розділом

Отже, після проведених маркетингових досліджень можна зробити висновок про раціональність ринкового впровадження, оскільки розробка буде спрощувати вимірювання в'язкості. А оскільки сфера застосування є широкою, то є попит на дану продукцію.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз літературних джерел, показав, що найбільш придатними для використання в системах управління і автоматизації є сенсори, принцип дії яких заснований на ультразвуковому методі вимірювання в'язкості.

2. Запропоновано ультразвуковий метод контролю в'язкості дизельного палива шляхом збудження в п'єзоелектричному трансформаторі загасаючих коливань частотою 25 кГц від імпульсів амплітудою 1 В, тривалістю 1 мс, періодом 15 мс і контролі числа коливань, що перевищують рівень 0,3 В (в нашому випадку 160 коливань).

3. Загасання коливань в п'єзоелектричному трансформаторі залежить не тільки від в'язкості рідини, але і від глибини його занурення в рідину згідно залежності $1/a$, де a — глибина занурення (формула 3.1).

Пономаренко В.С. РІЗІМТ, 2020

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Метрологічне забезпечення вимірювання параметрів технічних рідин. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.metrology.kharkov.ua/fileadmin/user_upload/data_gc/conference/M2014/pages/06/2.pdf
2. Комп'ютерна система визначення реологічних характеристик суднових технічних рідин. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://item.comp-sc.if.ua/2017/Nikolskyi.pdf>
3. VISCO-895 віскозиметр. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://chemtest.com.ua/ua/visco-895-viskozimetr>
4. Реометр DV3T. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://chemtest.com.ua/reometr_dv3t_universalnyi_brookfield
5. Медична і біологічна фізика / За ред. О.В. Чалого, 2-е видання. – К.: Книга-плюс, 2005.
6. В'язкість рідин. Методи визначення в'язкості рідин. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.umsa.edu.ua/storage/kf_med_inform_mz/docs/4c6dL47HL6vfmeINKweyOsMeCmPPU8k8M8HdgOhO.pdf
7. Віскозиметрія. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.tsatu.edu.ua/ophv/wp-content/uploads/sites/13/vyskozymetria.pdf>
8. Viscosity. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://resources.saylor.org/wwwresources/archived/site/wp-content/uploads/2011/04/Viscosity.pdf>
9. Viscosity Measurement. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.autex.spb.ru/download/wavelet/books/sensor/CH30.PDF>
10. Вискозиметрія. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.spectrosystems.ru/methods/viskozimetr.shtml>

11. Методи визначення в'язкості. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://wiki.tntu.edu.ua/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B8_%D0%B2%D0%B8%D0%B7%D0%BD%D0%B0%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F_%D0%B2%27%D1%8F%D0%B7%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%96
12. Казаков А. В. Основы автоматизации химических производств / А.В. Казаков, М.В. Кулаков, Ю.К. Мелюшев // Учеб. пособие – М.: Машиностроение, 1970 – 376с.
13. Вискозиметр ротационный ViscoQC 100 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://granat-e.ru/viscoqc-100.html>
14. CAPILLARY U-TUBE (BS/U) & (BS/IP/RF) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://fungilab.com/product/kinematic-viscometers/capillary/utube/>
15. Tuning Fork Vibration Viscometer 43751 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.coleparmer.com/p/tuning-fork-vibration-viscometer-43751/43751>
16. BROOKFIELD KF30 and KF40. Falling Ball Viscometer [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.brookfieldengineering.com/-/media/ametekbrookfield/manuals/lab%20viscometers/kf30_kf40%20instructions.pdf?la=en
17. MEMS技術を用いた超小型粘度センサー [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.jstage.jst.go.jp/article/sicejl/54/5/54_351/pdf/-char/en
18. Yamamoto Y. VISCO-MEMS: The MEMS-based viscosity sensor using dual spiral vibrating beams / Y. Yamamoto, S. Matsumoto, H. Yabuno, M. Kuroda, T. Yamamoto, S. Choi // 2013 Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSensors XXVII), Barcelona, 2013, pp. 94-97.

19. ПАВ-датчики вязкости и температуры жидких сред компании Vectron International. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.electronics.ru/files/article_pdf/0/article_174_709.pdf

20. Surface Acoustic Wave (SAW) Products. Technical Resources. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.vectron.com/products/saw.aspx>

21. Rezazadeh Ghader. On the mathematical modeling of a mems-based sensor for simultaneous measurement of fluids viscosity and density / Ghader Rezazadeh, Mina Ghanbari // Sensing and Imaging 19 (2018), no. 1, 27.

22. Foroughi Javad. Geometry Optimization of Bimorph Piezoelectric Cantilever Energy Harvester for Maximum Output Voltage / Javad Foroughi, Hamid Reza Chabok, Madjid Abbaspour, Mohammad Tabeshpour // (2018). 10.13140/RG.2.2.23899.41767.

23. Zhao Lan. A MEMS Resonant Sensor to Measure Fluid Density and Viscosity under Flexural and Torsional Vibrating Modes / Lan Zhao // Sensors, vol. 16, (6), pp. 830, 2016.

24. Kim H.J. Piezoelectric layer embedded-microdiaphragm sensors for the determination of blood viscosity and density / H.J. Kim, J. Kim, O. Zandieh, M.-S. Chae¹, T.S. Kim, J.H. Lee, J.H. Park, S. Kim, K.S. Hwang // Appl Phys. Lett. 2014, 105.

25. Wilson T.L. Viscosity and density values from excitation level response of piezoelectric-excited cantilever sensors / T.L. Wilson, G.A. Campbell, R. Mutharasan // Sens. Actuators A Phys. 2007, 138, 44–51.

26. Hongbin Yu. Capacitive micromachined ultrasonic transducer (cmut) based micro viscosity sensor / Yu Hongbin, Lou Liang, Alex G. Yuandong // Sensors and Actuators B: Chemical 227 (2016), 346 – 351.

27. Chan Jasmine. Photoacoustic Imaging with Capacitive Micromachined Ultrasound Transducers: Principles and Developments. / Jasmine Chan , Zhou Zheng, Kevan Bell, Martin Le, Parsin Reza, John Yeow // Sensors (2019). 19. 3617. 10.3390/s19163617.

28. Chen Po-Cheng. Ultrasonic viscometer with integrated depth measurement / Po-Cheng Chen, A. Lal // 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Taipei, 2015, pp.1-4. doi: 10.1109/ULTSYM.2015.0247

29. Angelescu D.E. Highly integrated microfluidic sensors / D. E. Angelescu, H. Chen, J. Jundt, H. Berthet, B. Mercier, F. Marty // Proceedings of SPIE, vol. 6886, 2008, pp. 688607-688607-9.

30. The History of Piezoelectricity. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.piezo.com/tech4history.html>.

31. What is the Piezoelectric Effect? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.electronicdesign.com/power-management/article/21801833/what-is-the-piezoelectric-effect>.

32. Поплавко Ю. М. П'єзоелектрики / Ю. М. Поплавко, Ю. І. Якименко // Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". – Київ : НТУУ "КПІ", 2013. – 325 с.

33. Шарапов В.М. Пьезоэлектрические датчики / В.М. Шарапов, М.П. Мусиенко, Е.В. Шарапова // М.: Техносфера, 2006. – 632 с.

34. Радиооптика. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 04. С. 25–40.

35. Physical and piezoelectric properties of APC materials. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.americanpiezo.com/apc-materials/physical-piezoelectric-properties.html>.

36. Ultrasonic Sensor Disks. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tdk-electronics.tdk.com/download/2596934/13cfb7291202d0a26978071b6e176a15/ultrasonic-sensors-an.pdf>

37. Кисиль Т. Ю. Ультразвуковой метод, пьезоэлектрические преобразователи и устройства контроля вязкости жидкости повышенной точности для систем управления: Дис. ... канд. Одесса, 2003. 137 с.

38. Маскак В.И. Использование преобразователей для исследования прочностных и диссипативных характеристик механического контакта. / В.И. Маскак, И.Г. Минаев, В.М. Шарапов // Материалы всесоюзной конференции

«Автоматизация исследований несущей способности и длительной прочности летательных аппаратов» – Харьков, 1975.

Пономаренко В.С. РІ-91МП, 2020

ДОДАТОК А РОЗРАХУНКИ В СИСТЕМІ MATHCAD

Пономаренко В.С. РІ-91МП, 2020