

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

Факультет електроніки

Кафедра акустичних та мультимедійних електронних систем

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО

Завідувач кафедри АМЕС

Найда С.А.

« 14 » 06 2023 р.



Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Акустичні електронні системи та технології обробки акустичної інформації»

спеціальності 171 Електроніка

на тему: «Малогабаритна ультразвукова ванна для лабораторних досліджень»

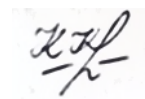
Виконав: студент IV курсу, групи ДГ-91
Олійник Роман Юрійович



Керівник: доцент кафедри АМЕС, к.т.н., доцент
Дрозденко Катерина Сергіївна



Рецензент: доцент кафедри ЕПС, к.т.н., доцент
Клен Катерина Сергіївна



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

Студент 

Київ – 2023

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

Інститут/факультет _____ Факультет Електроніки _____

Кафедра _____ акустичних та мультимедійних електронних систем _____

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) _____ 171 Електроніка _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри  Найда С.А.

« 30 » 05 20²³ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Олійнику Роману Юрійовичу

1. Тема роботи ____ Малогабаритна УЗ ванна для лабораторних досліджень

керівник роботи: к.т.н., доцент, Дрозденко К.С.

затверджені наказом по університету від «30» травня 2023 р. №2063-с

2. Строк подання студентом роботи 10.06.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: технічна література, технічна документація приладів та вимірювальної апаратури, електроакустичний перетворювач

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити)

1. Теоретичні данні про ультразвукові ванни та ультразвукову кавітацію.

2. Огляд приладів аналогів.

3. Побудова структурних схем.
 4. Розрахунок параметрів перетворювача.
 5. Результати експерименту.
 6. Висновки.
5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація в PowerPoint.
6. Дата видачі завдання 08.04.2023 р

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Обґрунтування поставленої задачі	08.04-18.04.23	Виконано
2	Виконання першої частини роботи	19.04-30.04.23	Виконано
3	Доопрацювання першого розділу із-за потреби більш глибокого теоретичного обґрунтування	01.05-07.05.23	Виконано
4	Виконання другої частини роботи	08.05-18.05.23	Виконано
5	Виконання третьої частини роботи	19.05-25.05.23	Виконано
6	Проведення експериментів	26.05-31.05.23	Виконано
7	Оформлення дипломної роботи	01.06-10.06.23	Виконано

Студент



Олійник Р.Ю.

Керівник роботи



Дрозденко К.С.

АНОТАЦІЯ

Олійник Р. Ю. Малогабаритна ультразвукова ванна для лабораторних досліджень: дипломна робота бакалавра: 171 Електроніка. – Київ, 2023. – 69 с.

Ця дипломна робота присвячена розробці малогабаритної ультразвукової ванни, яка призначена для лабораторних досліджень. Головною метою роботи є створення ефективного та компактного пристрою, здатного забезпечити ультразвукову очистку різних зразків та матеріалів. Дослідження включають вивчення параметрів, що впливають на ефективність очищення, впровадження автоматичного настроювання резонансу та оптимізацію режимів роботи. В результаті очікується створення функціонального прототипу малогабаритної ультразвукової ванни, який буде використовуватись для проведення лабораторних досліджень і сприятиме покращенню якості та швидкості очищення різних матеріалів.

Ключові слова: п'єзокерамічний перетворювач, кавітація, ультразвукова ванна.

ANNOTATION

Oliinyk R. Y. Small-sized ultrasonic bath for laboratory experiments: Bachelor's degree project: 171 Electronics. – Kyiv, 2023. – 69 p..

This thesis project is devoted to the development of a small-sized ultrasonic bath, which is intended for laboratory research. The main goal of the project is to create an efficient and compact device capable of providing ultrasonic cleaning of various samples and materials. The research includes the study of parameters affecting the cleaning efficiency, the implementation of automatic resonance tuning and the optimisation of operating modes. The project is expected to result in a functional prototype of a small-size ultrasonic bath, which will be used for laboratory research and will contribute to the improvement of the quality and speed of cleaning of various materials.

Keywords: piezoceramic transducer, cavitation, ultrasonic bath.

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.	8
1.1. Актуальність розробки малогабаритної УЗ ванни.	8
1.2. Ультразвукова кавітація та її ефекти.	13
1.3. Практичне застосування ультразвукової кавітації	21
1.3.1. Застосування ультразвукової кавітації в харчовій промисловості. ..	21
1.3.2. Застосування ультразвукової кавітації для очищення води.	23
1.3.3. Виробництво біодизеля з олії каноли за допомогою ультразвукової кавітації.	24
1.4. Огляд приладів аналогів.	26
1.5. Висновок до розділу 1	32
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МАЛОГАБАРИТНОЇ УЗ ВАННИ НА СТРУКТУРНОМУ РІВНІ.	33
2.1. Параметри які має реалізовувати УЗ ванна. Що необхідно щоб отримати кавітацію.	33
2.2. Структурна схема УЗ ванни.	35
2.3. Висновок до розділу 2	39
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ВУЗЛІВ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ВАННИ.	40
3.1. Розрахунки параметрів перетворювача.	40
3.2. Розробка конструкції УЗ ванни.	51
3.3. Експериментальні дослідження	53
3.4. Висновок до розділу 3	66
ВИСНОВКИ	67
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ	68

ВСТУП

У сучасному світі, де відбувається невідпинний розвиток науки і технологій, лабораторні дослідження стають все більш важливими для досягнення нових наукових досягнень і розробки інноваційних рішень. Ультразвукова технологія виявляється особливо ефективною в багатьох галузях, включаючи медицину, хімію, біологію, електроніку та інші.

Ця дипломна робота присвячена розробці малогабаритної ультразвукової ванни для лабораторних досліджень. Метою роботи є створення компактного та ефективного пристрою, який забезпечує ультразвукову очистку різних зразків та матеріалів. Очищення за допомогою ультразвуку дозволяє знищити мікроорганізми і забруднення, що не доступні для інших методів очищення.

У сучасній науковій та промисловій практиці розробка та використання малогабаритних систем стають все більш актуальними. Це особливо важливо в областях, де працюють з дорогими реагентами та обмеженими кількостями матеріалів. Використання малих об'ємів дозволяє зменшити витрати та зберегти ресурси.

У контексті лабораторних досліджень, де важлива точність і повторюваність результатів, розробка малогабаритної ультразвукової ванни стає необхідністю. Можливість працювати з малими об'ємами дозволяє використовувати реактиви економніше та забезпечує більш точні результати досліджень.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.

1.1. Актуальність розробки малогабаритної УЗ ванни.

Ультразвукова ванна - пристрій для створення кавітації в рідині, налитій у ванну. Зазвичай застосовується для ультразвукового очищення твердих тіл у мийних розчинах, проте може використовуватися і для прискорення фізико-хімічних процесів у рідинах (перемішування, розчинення, емульгування, екстракція, знезараження тощо).

Зазвичай ультразвукова ванна являє собою ємність із нержавіючої сталі (трапляються й інші матеріали), до дна або стінок якої прикріплені ультразвукові перетворювачі (випромінювачі), зазвичай п'єзоелектричні. На перетворювачі з електронного ультразвукового генератора подається змінна напруга, частота якої відповідає необхідній частоті. Перетворювачі можуть також вбудовуватися в отвори в корпусі ванни або поміщатися у ванну у вигляді окремих модулів. Останній спосіб дає змогу виготовляти ультразвукові ванни дуже великих розмірів.

Ультразвукову ванну широко застосовують у медичних установах і лабораторіях різного профілю для усунення забруднень з поверхонь інструментів, посуду та іншого медичного приладдя з металу, скла і пластмаси. Ефективна санація цих предметів складної конфігурації проходить за допомогою ультразвуку. Дбайлива і швидка гігієнічна обробка проходить під впливом кавітації та акустичних потоків при зануренні виробів у мийний розчин.

Купуючи уз-ванну, слід керуватися відомостями про те, що найкраща продумана конструкція організовує очищення більшої кількості забруднених інструментів та інших предметів у потоковому режимі, що дуже важливо в плані продуктивності роботи. [1]

Технічною основою цього пристрою є: генератор ультразвуку, який під'єднаний до випромінювача і металевий відбивач у формі пластини.

Контейнери, піддони, що входять до комплектації, виготовляються за взаємозамінним принципом, завдяки якому повністю виключений тактильний контакт рук працівників з інструментом. Тому дане обладнання має низку переваг: зниження ризику алергічних реакцій і заражень у працівників, запобігання механічних пошкоджень, скорочення циклів обробки.

Сучасні моделі цього обладнання, залежно від призначення, можуть мати унікальні конструкційні можливості і забезпечуватися випромінювачами різної потужності. Стоматологічні пристрої, наприклад, завдяки максимальному зближенню відбивача і випромінювача дають високу інтенсивність коливань. Це сприяє за мінімальної витрати дезінфікувальних і мийних засобів гарантованій стерильності та підвищеній глибині обробки предметів.

При виборі лабораторних уз-ванн важливо знати, що нові моделі цього обладнання підтримують постійний цикл стерилізації, який визнано найефективнішим, економічним і зручним. [2]

Ультразвукові ванни вважаються найефективнішим способом очищення інструментів нестандартної форми і малого розміру. Оброблені вироби при подальшому промиванні проточною водою повністю очищаються від забруднень. Наділене унікальними можливостями це обладнання широко застосовується при підготовці матеріалів для проведення різних проб, при змішуванні плазм і сироваток, для приготування емульсій. По суті, вони в рідкому середовищі прискорюють такі фізико-хімічні процеси, як: перемішування, емульгування, розчинення, екстракція, тому використовуються для каталізації реакцій. Найчастіше цей прилад має надійну конструкцію та нержавіючу чашу.

Під час вибору уз-ванн важливо враховувати такі критерії: кількість доступних режимів, діапазон потужності ультразвуку, відповідність габаритів пристрою розміру обладнання, наявність модулів зливу та підігріву.

Порівняно з традиційними методами ультразвукове очищення дає змогу:

- мінімізувати використання ручної праці до необхідного мінімуму.
- виконувати очищення і знежирення без застосування органічних розчинників
- очищати недоступні ділянки виробів та видаляти різні види забруднень
- скорочувати час процесів, таких як екстракція, диспергування, очищення, хімічні реакції
- Уникати використання дорогого механічного та хімічного очищення для теплообмінного обладнання. [3]

Питома потужність не менше 8 - 10 Вт/л вважається оптимально ефективною для сильних забруднень, накипу і т.д. - 40 - 60 Вт/л з інтенсивністю коливань в районі 2,5 Вт/см². За допомогою цього параметра можна до певної міри компенсувати вплив частоти на якість миття та/або на продукт, що очищується.

Однак не тільки або навіть не стільки потужність генератора є вирішальним фактором, що впливає на ефективність виробу. Оптимально сконструйований ультразвуковий генератор повинен компенсувати дестабілізуючі фактори, які неминуче виникають під час процесу очищення. Зміни температури, рівня, щільності, в'язкості технологічного середовища (миючої рідини), форми і площі продукту, що миється, знос коливальної системи (ультразвукових випромінювачів) - все це має значний вплив на стабільність процесу мийки. Багато з цих параметрів (наприклад, температура та інші фізичні параметри миючого розчину) змінюються під час кожного процесу. Добре, якщо генератор здатний усунути неузгодженість частот, викликану цими факторами.

Саме характеристиками ультразвукових ванн пояснюється величезна варіація вартості ультразвукових ванн на ринку. Вартість одного лише

правильно спроектованого ультразвукового трансформатора вища, ніж вартість будь-якої китайської ванни в зборі, представленої на ринку.

Основними критеріями вибору об'єму ванни є розмір деталі, що миється, кількість деталей, що очищаються одночасно, і форма деталей. З даних, наведених вище, видно, що правило "взяти з запасом" тут не працює. Наприклад, дослідження, проведені Мачалкіним Ю. Н. в процесі підготовки дисертації для отримання наукового ступеня кандидата технічних наук, показали, що для миття безштифтових розпилювачів дизельних форсунок оптимально використовувати малогабаритні ванни ємністю 3-28 літрів. [4]

Кілька слів про контейнери, які використовують різні виробники малогабаритних ультразвукових ванн. Ви, напевно, помітили, що більшість ванн мають наступну градацію об'єму: 1,3 л, 2,8 л, 4 л, 5,7 л, 9,5 л тощо. Це пов'язано з тим, що найчастіше в процесі виробництва використовуються пресовані гастроемності, розміри яких є універсальними для всіх виробників. Оскільки гастроемності спочатку не призначені для обробки ультразвуком, а використовуються для зберігання продуктів харчування, одним з ключових питань якості ванни є правильний вибір такої ємності. Економія призводить до швидких поломок: випромінювачі відвалюються через нерівномірну товщину стінок, погана обробка поверхні, а також будь-які вм'ятини і подряпини призводять до утворення паразитних бульбашок, які знижують якість миття, і швидко руйнують ємності через кавітаційну ерозію. Саме тому гарантія на дешеві ванни зазвичай не перевищує 6 місяців.

Інтенсивність кавітаційного розпаду, а отже, і очищення забруднень, залежить від температури розчинника. Кожен розчинник має свою оптимальну температуру для максимальної ефективності ультразвуку. Це пов'язано з тим, що утворення кавітаційних бульбашок і потужність мікровибухів залежить від в'язкості, густини технологічного середовища, а також його насиченості парою. Ці параметри, в свою чергу, залежать від температури рідини.

При цьому ванни об'ємом до 3 літрів часто використовують без підігріву, оскільки кавітація сама підігріває розчин. Але якщо мова йде про миття відповідальних виробів, де якість миття повинна бути строго контрольованою і повторюваною, нехтувати цим параметром не варто. [5]

Дегазація - це початкове видалення газів, присутніх у розчині. Після видалення всіх газів з очищувального розчину кавітація є більш ефективною, оскільки видалення газів забезпечує вакуум в бульбашках, що утворюються. Коли хвиля високого тиску вдаряє по стінці бульбашки, вона руйнується, а енергія, що вивільняється при руйнуванні, створює ефект очищення, розриваючи зв'язок між деталлю та її забрудненнями.

Функція дегазації надзвичайно корисна при використанні свіжого розчину, оскільки високий вміст повітря в рідині негативно впливає на утворення кавітаційних бульбашок. Для багаторазового використання розчину примусова дегазація не потрібна.

Варто зазначити, що під час ультразвукової обробки розчин дегазується без додаткових маніпуляцій, тому, якщо ця функція недоступна у вашій ванні, просто увімкніть її на максимальну потужність на 5 хвилин перед тим, як вставити деталі.

Технологічні рідини, що використовуються в процесах ультразвукового очищення, поділяються на миючі засоби та рідини для додаткової обробки (замочування, ополіскування тощо).

Залежно від типу забруднення, а також матеріалу виробу, що миється, можуть використовуватися: вода, розчини кислот, лугів і поверхнево-активних речовин, органічні розчинники, емульсії.

1.2. Ультразвукова кавітація та її ефекти.

Кавітація - це утворення пульсуючих бульбашок (порожнин) у рідині, наповненій паром, газом або їх сумішшю. Розрізняють акустичну кавітацію, спричинену проходженням звукової хвилі високої інтенсивності, і гідродинамічну кавітацію, викликану сильним локальним перепадом тиску в рідині внаслідок високих швидкостей потоку. В інтенсивній звуковій хвилі кавітаційні бульбашки виникають під час напівперіодів розрідження і швидко руйнуються після переходу в область більш високого тиску, генеруючи інтенсивні гідродинамічні збурення в рідині та активне випромінювання акустичних хвиль і викликаючи руйнування поверхонь твердих тіл, що межують з кавітуючою рідиною. [1]

Утворення кавітації відбувається, коли тиск у рідині падає нижче певного критичного значення, що спричиняє утворення кавітаційних бульбашок. Цей критичний поріг відповідає місцям, де тиск рідини знижується. В ідеально однорідній чистій рідині шанси на спонтанне утворення бульбашок стають помітними лише за досить великих розтягувальних напружень, наприклад для води теоретична величина критичного тиску близька до $1,5 \cdot 10^8 \text{ Па} = 1500 \text{ кг/см}^2$; реальні рідини менш міцні.

Максимальна межа міцності ретельно очищеної води, досягнута при 10°C , становить $-2,8 \cdot 10^7 \text{ Па} = 280 \text{ кг/см}^2$. За нормальних умов розриви суцільності рідини відбуваються при тисках лише трохи менших, ніж тиск пари максимальної концентрації при даній температурі. З наявністю так званих кавітаційних зародків пов'язана низька міцність реальних рідин - мікроскопічних бульбашок газу, твердих частинок з тріщинами, заповненими газом тощо.[3]

Кавітація виникає внаслідок втрати стійкості зародків, що потрапляють в область низького тиску в звуковій хвилі, і їх швидкого зростання. Процес розширення зароджених бульбашок зумовлений низкою ефектів:

перевищенням тиску газу і пари в бульбашці над тиском у оточуючій рідині; дифузією газу в бульбашку з рідини; випаровуванням рідини та збільшенням маси пари в бульбашці; а також коагуляцією зародків.

Вибір обладнання та миючих засобів для ультразвукового очищення залежить, в першу чергу, від типу забруднення. Оскільки кавітація в звуковому полі викликає механічне руйнування плівки забруднення і одночасно прискорює процес хімічної взаємодії миючої рідини з забрудненням під впливом акустичних струмів, доцільно класифікувати всі забруднення за трьома основними характеристиками:

- 1) здатності протистояти впливу мікроударних навантажень;
- 2) міцності зв'язку з поверхнею, що очищається;
- 3) характеру хімічної взаємодії з мийною рідиною.

За першою ознакою забруднення поділяються на кавітаційно-стійкі та кавітаційно-нестійкі, за другою - на міцно і слабо пов'язані з поверхнею, що очищується, за третьою - на ті, що хімічно взаємодіють і не взаємодіють з мийною рідиною. [2]

Слід зазначити, що класифікація забруднень за характером взаємодії з миючою рідиною є доволі умовною, оскільки завжди можна підібрати такий хімічний склад рідини, з яким забруднення вступатиме в хімічну реакцію. Тому під середовищем, яке хімічно взаємодіє із забрудненням, слід розуміти рідину, яка, видаляючи забруднення з поверхні, не вступає в хімічну реакцію з матеріалом деталі, що очищається, а якщо така взаємодія і спостерігається, то вона має протікати набагато повільніше, ніж процес видалення плівки забруднень, і не спричиняти ушкодження деталі та зміну фізико-механічних властивостей матеріалу.

Будь-яке забруднення можна охарактеризувати сукупністю перерахованих ознак у різних поєднаннях. Наприклад, якщо очищення тонких

жирових плівок на металевій поверхні проводиться у воді, то їх слід віднести до числа кавітаційно-стійких, слабо пов'язаних з поверхнею що очищується, хімічно не взаємодіючих з мийною рідиною. Просте перерахування зазначених ознак дає змогу зробити висновок, що ультразвукове очищення тонких жирових плівок у воді буде неефективним, а для забезпечення якісного очищення необхідно мийну рідину замінити хімічно активною, підібрати такі параметри звукового поля, що забезпечують утворення інтенсивних акустичних течій. [4]

Табл. 1 Перелік найпоширеніших забруднень

Забруднення	Характеристика
Пил	Кавітаційно-нестійкі, слабо пов'язані з поверхнею, що очищається, хімічно не взаємодіють з мийною рідиною
Жирові плівки	Кавітаційно-стійкі, слабо пов'язані з поверхнею, що очищається, хімічно взаємодіють з мийною рідиною
Лакові плівки, фарби	Кавітаційно-стійкі, міцно пов'язані з поверхнею, що очищається, хімічно взаємодіють з мийною рідиною
Полірувальні пасти	Кавітаційно-нестійкі, міцно пов'язані з поверхнею, що очищається, хімічно взаємодіють з мийною рідиною
Окалини, окисні плівки	Кавітаційно-стійкі, міцно пов'язані з поверхнею, що очищається, хімічно взаємодіють з агресивними рідинами
Продукти корозії	Кавітаційно-нестійкі, міцно пов'язані з поверхнею, що очищається, хімічно взаємодіють з агресивними рідинами
Нагар, резина, смолисті осади	Кавітаційно-стійкі, міцно пов'язані з поверхнею, що очищається, хімічно не взаємодіють, з мийною рідиною

Наведена класифікація дає змогу визначити також сферу застосування ультразвукового очищення. Якщо забруднення міцно пов'язане з поверхнею, що очищається, хімічно не взаємодіє з мийною рідиною і його кавітаційна

стійкість дорівнює або перевершує кавітаційну стійкість матеріалу деталі (наприклад, пригари формувальної землі на поверхні литих алюмінієвих деталей), то для його видалення не слід застосовувати ультразвукове очищення.

У табл. 1 перелічено найпоширеніші забруднення та проведено класифікацію за характерними ознаками.

Наведений перелік забруднень далеко не повний, але аналогічно можна охарактеризувати будь-яке забруднення.

Значення попередньої класифікації полягає в тому, щоб визначити, яка з ознак є найбільш вразливою з погляду видалення забруднень з поверхні. Визначивши цю ознаку, можна намітити необхідну технологію ультразвукового очищення, вибір мийних середовищ і параметрів звукового поля. [5]

Великі, видимі неозброєним оком газонаповнені бульбашки, які вносять у рідину на поверхні деталей, що очищаються, або вводять штучно шляхом продування стисненого газу.

Віднесені нами до другої групи пульсуючі бульбашки можуть виникати в об'ємі рідини тоді, коли рівень звукового тиску, що створюється джерелом ультразвукових коливань, досягає значень, за яких бульбашка не встигає захлопнутись у фазі стиснення. Тиск пари і газу в цих бульбашках значно менший за атмосферний. Тому зникають вони відразу, як вимикається джерело коливань.

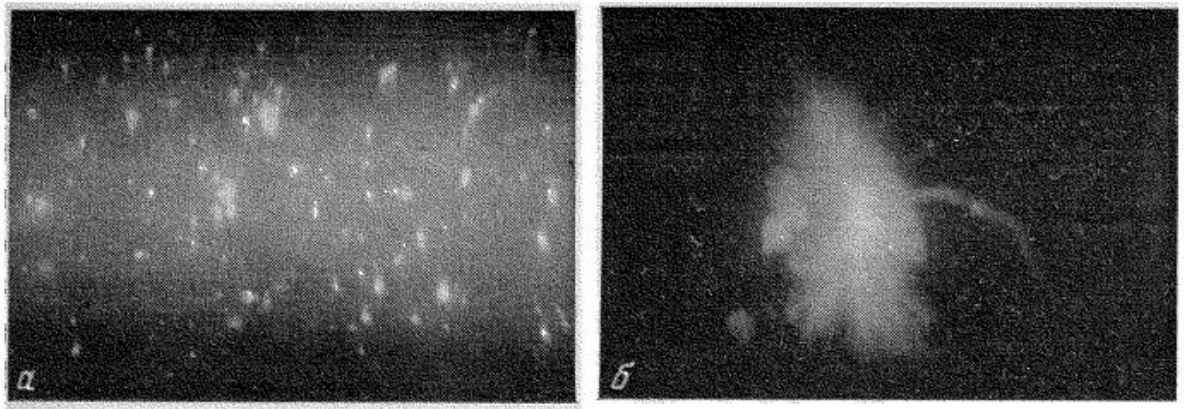


Рис.1 Кавітаційна область при нормальному(а) та підвищеному(б) тиску

Якісну відмінність між пульсуючими і кавітаційними бульбашками показано на рис. 1, де представлено кавітаційну ділянку за нормального і підвищеного статичного тиску. За нормального тиску кавітаційна область над поверхнею перетворювача типу ПМС-6М (рис.1, а), що має неоднорідне звукове поле на площі випромінювача, є скупченнями великих пульсуючих бульбашок, відносно рівномірно розподілених за об'ємом рідини поблизу випромінювача. З підвищенням тиску до $5 \cdot 10^5$ н/м², за тієї самої питомої акустичної потужності створюються несприятливі умови для зростання бульбашок, і великі бульбашки зникають, а сама ділянка кавітації спостерігається у вигляді туманоподібної хмари, що складається з безлічі бульбашок, які кавітують і зосереджені над центром випромінювача (рис.1, б), де рівень звукового тиску був найбільшим.

Кавітаційні бульбашки, пульсації яких призводять до виникнення ударних хвиль, виробляють мікроударне руйнування поверхневої плівки. Мікроударні навантаження характеризуються різким підвищенням тисків до значної величини, за чим слідує настільки ж швидке зменшення навантаження. Розподіл напружень, спричинених такими навантаженнями, відзначається локальністю та сильною нерівномірністю, що спричиняють появу в плівці забруднень, тріщин, а також слідів ерозії, які спостерігаються на поверхні плівки у вигляді точкових кратерів.

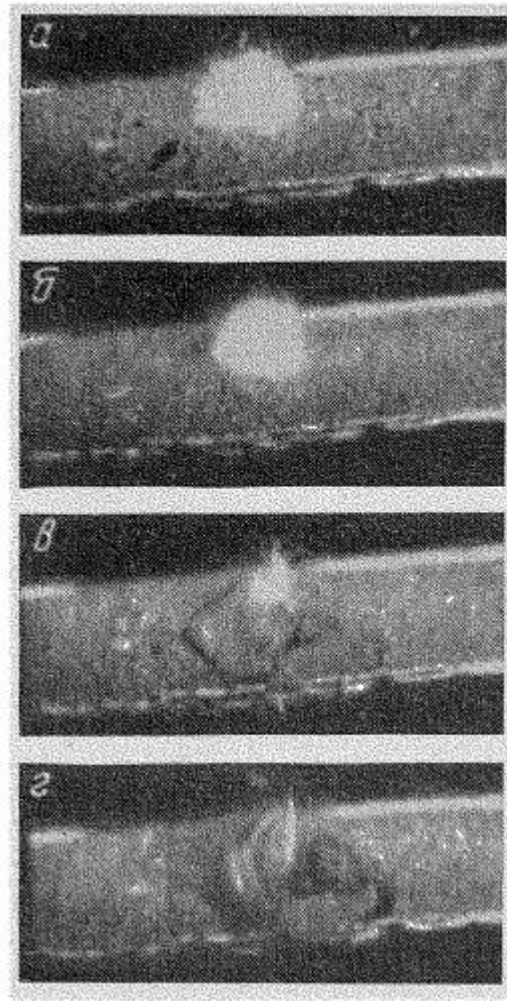


Рис.2 Руйнування плівки забруднення при захопленні кавітаційної бульбашки.

Однак не слід забувати, що мікроударному руйнуванню може піддатися не тільки плівка забруднень, а й матеріал, що очищається. Тому в деяких випадках під час видалення забруднень, міцно пов'язаних із поверхнею, що очищається, вигідно проводити очищення в кілька етапів, знижуючи інтенсивність кавітації в міру руйнування плівки забруднень.

Пульсуючі кавітаційні бульбашки у своїй більшості не створюють на межі рідина - тверде тіло значних мікроударних навантажень. Відомі три механізми руйнування поверхневих плівок пульсуючими кавітаційними бульбашками: відшарування, струминне очищення, емульгування.

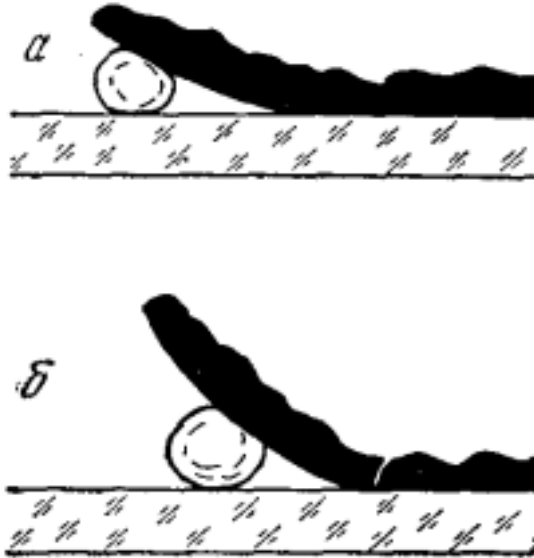


Рис.3 Схема відшарування плівки забруднення при пульсаціях кавітаційної бульбашки (а- початкова фаза відшарування, б- відколювання шматків плівки)

Відшарування плівок пульсуючими бульбашками докладно вивчено Розенбергом, Бебчуком, Макаровим за допомогою високошвидкісної кінозйомки. Об'єктом досліджень були скляні пластинки з нанесеним на поверхню шаром каніфолі. Отримані кадри дали змогу встановити такий механізм руйнування плівок: пульсуючі бульбашки внаслідок взаємодії поверхневих сил прагнуть "прилипнути" до твердої поверхні, заміщаючи нею частину своєї поверхні. Концентруючись на краях плівки, бульбашка може "прилипнути" не тільки до поверхні пластинки, а й до внутрішньої поверхні плівки, що відшарувалася (рис.3, а). При інтенсивних коливаннях бульбашки на плівку починають діяти сили, що відривають її від поверхні пластинки. Якщо сили зчеплення плівки з поверхнею перевершують міцність самої плівки, то вільний шматочок її просто відривається (рис.3, б). Якщо ж міцність плівки перевершує сили зчеплення, то плівка відшаровується з поверхні. Деякі бульбашки після багаторазових пульсацій захоплюються подібно до кавітаційної бульбашки, спричиняючи мікроударне руйнування плівки забруднень.

При видаленні тонких плівок зі слабкою адгезією до поверхні (наприклад, шару туші на платівці з органічного скла) під дією пульсуючих бульбашок механізм руйнування інший: пульсуючий пухирець, переміщуючись поверхнею, яку очищають, залишає в плівці забруднень "розчищені доріжки", напрямом яких збігається з траєкторією руху бульбашки. У цьому разі руйнівну дію кавітаційних бульбашок можна пояснити ударами струменя рідини об поверхню зразка під час поділу великих нестійких пульсуючих бульбашок на більш дрібні. Схематично процес поділу бульбашки зображено на рис.4, де стрілками показано напрямки ударів струменя рідини. Нестійкість бульбашки пояснюється тим, що за великих амплітуд коливань бульбашка втрачає сферичну форму, оскільки на окремих ділянках її поверхні гідродинамічні сили, походження яких пов'язане з виникненням мікропотоків на околицях бульбашки, можуть компенсувати або перевищити силу поверхневого натягу, завдяки

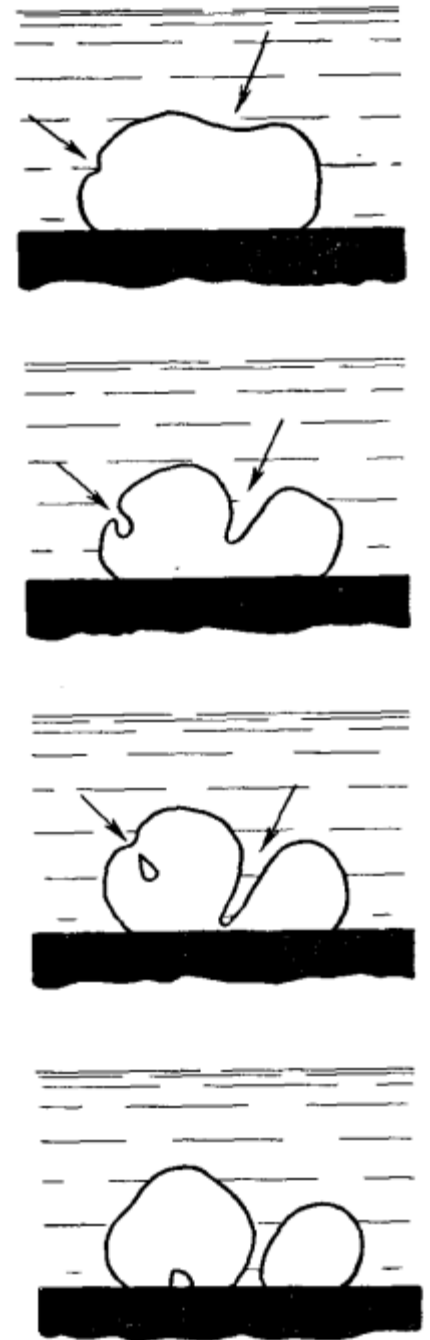


Рис. 4 Процес поділу бульбашки

чому бульбашка набуває здатності деформуватися найхимернішим чином. Під час поділу пульсуючих бульбашок відбувається своєрідне струминне очищення поверхні. [8]

1.3. Практичне застосування ультразвукової кавітації

З плином часу, технології не стоять на місці, тому людство знайшло дуже багато застосувань такого явища як ультразвукова кавітація. В останні роки кавітаційна технологія знаходить все більше застосувань в різних галузях, таких як оброблення органічних стічних вод, очищення питної води, гідроліз масел та посилення синтезу біодизеля. Ультразвукова кавітація є явищем, при якому сильні ультразвукові хвилі спричиняють утворення багатьох мініатюрних бульбашок в рідині, наприклад у воді, через негативний тиск.

Ультразвукові кавітаційні бульбашки постійно розширюються та стискаються під впливом ультразвукових коливань тиску, поки нарешті не зруйнуються. Внаслідок адіабатичного стиску, внутрішня температура бульбашок під час стиску може досягати 5000 К або більше, а внутрішній тиск може сягати декількох сотень атмосфер і більше. Утворення цього поля при кавітації термічно розкладає газ у бульбашці (наприклад, азот або кисень) і сприяє утворенню окислювачів, таких як радикали ОН і перекис водню. Це процес відомий як хімічна дія ультразвукових кавітаційних бульбашок.

1.3.1. Застосування ультразвукової кавітації в харчовій промисловості.

Наприклад, застосування ультразвукової кавітації в харчовій промисловості. У харчовій промисловості до недавнього часу актуальність застосування цього явища була під питанням. Традиційні процеси обробки і продуктів засновані на природних широко поширених способах передачі енергії: різні види механічного подрібнення, перемішування, теплопередача, на яких засновані всі види теплової обробки.

Нові види передачі енергії поки що не користуються великим попитом у харчовій промисловості. Так, наприклад, мікрохвильовий спосіб передачі енергії став усього лише допоміжним і застосовується, найчастіше, для підігріву продуктів. У виробництві продуктів харчування В основному застосовуються три способи впливу енергетичного подрібнення за допомогою

різання або деформації, перемішування і термічна обробка. Вони добре вивчені та зрозумілі, що підтверджує історія застосування їх упродовж багатьох століть під час обробки людством продуктів із біологічної сировини рослинного та тваринного походження.[8]

Крім дезінтегруючого впливу ультразвуку відомі абсолютно протилежні явища, що супроводжують трансформацію енергії коливань ультразвукового діапазону в рідкому середовищі. Так, поряд із диспергувальним ефектом, існує коагулювальний ефект ультразвуку, зумовлений дією сил Б'єркнеса тому. В реальних умовах, у реакторі довільної форми може існувати рівновага між емульгуванням і коалесценцією фази емульсії. Аналогічно, під час ультразвукової стерилізації рідин, поряд з областями поля, перебування в яких призводить мікроорганізми до летального результату, можуть існувати зони, де, навпаки, скупчення бактерій будуть розділятися без загибелі окремих клітин, даючи життя новим колоніям.

Застосування ефектів явища кавітації В переробній і харчовій промисловості, безсумнівно, ефективне, оскільки дає змогу істотно знизити, а, в деяких випадках, повністю виключити, використання хімічних харчових добавок. Застосування фізичного впливу вважається більш ефективним і безпечним, порівняно з використанням традиційних інгредієнтів. Активована, за рахунок кавітаційних впливів, вода легко зв'язується в емульсіях, де відбувається гідроліз жирів з утворенням ди- і моногліцеридів, які є природними загусниками.

Процеси отримання емульсій становлять одну з найважливіших основ сучасної харчової промисловості. Застосування ультразвукового кавітаційного впливу є одним із найперспективніших способів формування стійких емульсій за високої продуктивності застосовуваних технічних засобів. Для практичної реалізації процесу ультразвукового емульгування необхідно виявити оптимальні режими впливу та умови поширення коливань для створення

однорідного ультразвукового поля в об'ємі суміші двох взаємно нерозчинних рідин і отримання емульсій із заданими дисперсними характеристиками.[6]

На жаль, широкі можливості ультразвукових коливань високої інтенсивності для інтенсифікації процесів у високов'язких і високодисперсних середовищах поки що не набули широкого поширення через відсутність спеціалізованого обладнання, здатного забезпечити кавітаційний режим обробки рідких харчових середовищ.

З вищевикладеного можна зробити висновок, що використання ефектів сонохімії в харчовій промисловості перспективне. Нині вченими (О.М. Красуля, С.С. Хмельов) спільно з індійськими колегами (S. Anand) проводяться розроблення нових апаратів із заданими параметрами кавітаційної обробки, а також вивчаються теоретичні аспекти сонохімічного впливу на харчові емульсії.

1.3.2. Застосування ультразвукової кавітації для очищення води.

Технологія очищення води має велике значення для збереження водного середовища. Надмірне розмноження водоростей та планктону може призвести до зруйнування екосистеми та неприємного запаху. Існують різні методи боротьби з цими надлишковими мікроорганізмами, такі як хімічні агенти для знищення водоростей, використання флокулянтів, біоконцентрація та обробка озоном. Однак, є певні обтяжливості та занепокоєння щодо впливу хімічних речовин на природне середовище та здоров'я людей. Крім того, обробка озоном може спричинити корозію обладнання. Альтернативою є використання ультразвукової технології очищення води, яка привертає увагу як більш природо- та екологічно-дружній метод очищення, який має менший вплив на навколишнє середовище та завдає менше шкоди обладнанню [26]. Очікується, що ультразвукова обробка води, крім поліпшення якості води та інактивації мікроорганізмів, також дозволить вилучати активні інгредієнти шляхом руйнування клітин мікроорганізмів.

У цьому дослідженні були проведені експерименти з ультразвуковим опроміненням на різних тонких зразках, включаючи водорості, мікрокапсули і планктон. Для вивчення механізму руйнування кожного зразка, було застосовано ультразвукові хвилі з різними частотами: 20, 400, 1000, 2200, 3300 та 4300 кГц для водоростей і мікрокапсул, а також 26, 200, 430 і 950 кГц для планктону. Швидкість руйнування після ультразвукового опромінення була використана для вивчення механізмів руйнування водоростей і мікрокапсул. Крім того, для вивчення механізму інактивації планктону на кожній частоті та спостереження його з використанням оптичного мікроскопа, була виміряна швидкість інактивації планктону. [19].

1.3.3. Виробництво біодизеля з олії канולי за допомогою ультразвукової кавітації.

У сучасний час транспорт є найбільшим споживачем енергії серед всіх секторів суспільства. Згідно з Міжнародним енергетичним агентством, у 2017 році транспортний сектор використовував 64,8% загального світового споживання нафти. Це використання викопного палива призводить до зміни клімату та забруднення повітря в багатьох мегаполісах світу. Більше того, обмеженість викопних палив становить серйозну перешкоду для сталого розвитку суспільств. Значна частка споживання викопних палив у транспортному секторі та їх негативний вплив на довкілля змусили уряди розглядати нові джерела енергії. Використання біопалива у транспортних засобах може значно зменшити споживання традиційного палива і викиди вихлопних газів, сприяючи тим самим сталому розвитку

Проблема недостатнього змішування нафти та спирту у виробництві біодизеля має серйозні наслідки, такі як повільний масообмін і тривалість реакції. Цю проблему можна подолати за допомогою методу інтенсифікації, який забезпечує ефективний контакт між нафтою та спиртом за допомогою різних підходів. Один з найефективніших методів, який був вивчений останнім часом, - це ультразвукова кавітація. Дослідники провели оцінку

потенціалу ультразвукової кавітації з техніко-економічної точки зору. За допомогою програмного забезпечення Aspen HYSYS V8.4 було розроблено дві системи - одна на основі традиційного механічного перемішування і інша з використанням ультразвукової кавітації. Для порівняння цих процесів були враховані загальні інвестиції, витрати на продукти, чиста присутня вартість та внутрішня норма прибутку. Виявилось, що загальні інвестиції в ультразвукову кавітацію були на 20,8% нижчими порівняно з механічним перемішуванням. Використання ультразвукових реакторів призвело до зниження вартості продукції на 5,2% порівняно зі звичайним процесом. Завдяки позитивній чистій кінцевій вартості та внутрішньому коефіцієнту прибутковості у розмірі 18,3%, ультразвукова кавітація виявилася кращим варіантом. Крім того, застосування ультразвуку призвело до значного зменшення споживання енергії і кількості утворюваних відходів. Використання ультразвукової кавітації знизило загальне споживання енергії на 6,9%. Кількість відходів, утворених під час ультразвукової кавітації, становила лише одну п'яту від кількості відходів, утворених під час механічного перемішування. [20].

Ультразвукова кавітація використовує ультразвукові хвилі для емульгування реакційної суміші. Цей процес включає формування дрібних емульсій шляхом швидкого переміщення рідини внаслідок коливань акустичного тиску. Зміни тиску відбуваються через стиснення та розрідження суміші. Крім того, утворюється мікропотік, що спричиняє утворення мікробульбашок з газом. Ці бульбашки потім зливаються, створюючи інтенсивну вібрацію в обмеженому просторі. В результаті відбувається значне збільшення поверхні контакту між двома немісцевими рідинами [9].

З економічного погляду, використання ультразвукової кавітації у процесі виробництва має деякі фінансові переваги. Загальні інвестиції в цей процес є нижчими, ніж у випадку механічного перемішування, основними причинами є 50% зниження вартості реактора і 11,6% зниження вартості перегонної колони для метанолу. Крім того, використання ультразвукової кавітації зменшує

загальні витрати на виробництво біодизелю, зокрема шляхом зниження споживання олії на 4%, витрат хімічних речовин на 2,2% та вимог до комунальних послуг на 23,8%. За рахунок позитивної чистої поточної вартості, меншого часу окупності і вищої внутрішньої норми прибутку, процес ультразвукової кавітації вважається вигідною інвестицією [20].

Крім техніко-економічних переваг, пов'язаних з ультразвуковою кавітацією, цей процес має більш сприятливий екологічний вплив порівняно з механічним перемішуванням. Використання ультразвукової кавітації призводить до зниження відходів на 80% завдяки вищій ефективності реактора та скороченню використання хімічних речовин у процесі. Крім того, споживання алкоголю також зменшується внаслідок використання ультразвукової кавітації [10].

1.4. Огляд приладів аналогів.

Існують різні варіанти малогабаритних ультразвукових ванн, які можуть використовуватися для очищення різних предметів, наприклад, для очищення ювелірних виробів, зубних протезів, окулярів, монет, навушників, інструментів тощо. Деякі ванни можуть мати вбудовані чи змінні корзинки або стакани, які допомагають тримати предмети під час процесу очищення.

Ось декілька прикладів малогабаритних ультразвукових ванн, які можуть використовувати ультразвукову кавітацію для очищення:

Jeken CD-4800 - це малогабаритна ультразвукова ванна з розмірами 180x155x130 мм, яка має ємність 1,4 літри.

Ультразвукова ванна для професійного чищення. Ідеально підходить для наукових лабораторій, медичних або стоматологічних клінік та електронних майстерень. Може бути використана як професіоналами, так і любителями для чищення електронних компонентів, механічних частин, зброї або спортивного інвентарю. Підходить для очищення ювелірних виробів, ремінців від годинника, окулярів, зубних щіток і посуду.[10]

Технічні характеристики:

Частота ультразвуку - 42 000 Гц

Матеріал ванни - Нержавіюча сталь SUS303

Об'єм ванни - 1,4 л

Таймер - 5 циклів, відображення часу на екрані

Живлення - АС 220 ~ 240 В, 50 Гц

Споживана потужність - 70 Вт (230 В)

Габарити - 230 x 180 x 160 мм



Рис. 5 Jeken CD-4800

Branson B200 - це ще одна малогабаритна ультразвукова ванна, яка може використовувати ультразвукову кавітацію для очищення. Ця ванна має ємність 2 літри.

Очищувач використовує ультразвукову енергію 55 КГц для отримання мікроскопічної чистоти об'єктів. Невеликий і економічний. Працює від мережі 110-120 В змінного струму, 50-60 Гц. Включає 5-хвилинний таймер. Широкий спектр інших застосувань: деталі приладів і годинників, невеликі геологічні зразки, металеві та пластикові деталі машин, невеликі електричні та

електронні компоненти. Габаритні розміри: 222,25 * 114,3 * 127. Розмір ємності: 165,1 * 88,9 * 57,15; місткість ємності: 1,4 л. Пристрій постачається з кришкою та кошиком.



Рис. 6 Branson B200

Sonic Wave CD-4820 – На передній панелі є панель управління з таймером на 5 режимів (180/280/380/480/90 секунд). Корпус ванни виготовлений з якісного пластика. Подовжений резервуар для очищення інструментів дозволяє очищати довгі інструменти і трубки, виготовлений з нержавіючої сталі і розрахований на об'єм 2,5 літра. Також ванночка оснащена запобіжником, який захищає від перевантажень, і охолоджуючим вентилятором, який допомагає збільшити термін служби мийки.[10]

Технічні характеристики:

Вага – 2,5 кг

Розмір бака – 25x15x8

Розмір ванни - 29x23x18

Об'єм – 2500 мл

Потужність – 170 Вт. (70 Вт - потужність випромінювача і 100 Вт - потужність нагрівача)

Частота ультразвуку – 42 кГц.

Максимальна температура нагріву - 65°C (за 45 хв.)

Матеріал резервуара - нержавіюча сталь (SUS304)



Рис. 7 Sonic Wave CD-4820

Ультразвукова ванна УЗМ-3 призначена для очищення ювелірних виробів від жирових та інших забруднень і розрахована на застосування в промисловості та в побуті. Розроблено в Україні для чищення та знезараження інструментів у тату-салонах, перукарнях, стоматологічних кабінетах і СТО. Як мийну рідину можна використовувати чисту воду з додаванням лужних мийних засобів, наприклад, Деталан А-10М. Мийка прекрасно чистить деталі складної конфігурації з металів, кераміки, скла, пластмаси. Це можуть бути оптичні прилади, стоматологічні інструменти, керамічні та сітчасті фільтри, автомобільні інжектори та форсунки. Додатково до мийки можна придбати кошик або підвіску з нержавіючої сталі. Корпус мийки виготовлено з нержавіючої сталі, і він ніколи, на відміну від пластикових, не виходить з ладу.



Рис. 8 Ультразвукова ванна УЗМ-3

Особливості:

Ультразвукова мийка виробництва «Квінтал», на відміну від мийок інших брендів, слабо шумить. Рівень шуму на відстані 0,5 м не перевищує 60 дБ.

В ультразвуковій мийці встановлюються твердотільні нагрівальні елементи, які не перегорають під час увімкнення мийки без води! Нагрівальні елементи мають великий термін служби.

Ультразвукова мийка оснащена високоякісним і надійним генератором ультразвуку. Друкована плата генератора двошарова з металізацією перехідних отворів і виготовлена зі склотекстоліту. Шнур живлення знімний. Довжина шнура живлення 1,5 – 1,8 м. Для зручності перенесення на корпусі мийки встановлено ручки.[10]

Характеристики:

Потужність ультразвукового генератора, Вт – 120

Частота очищення, кГц – 40

Кількість випромінювачів Ланжевена – 2 шт

Товщина стінок ємності, мм – 0,7

Потужність нагрівача, Вт – 130

Температура нагріву, °С – 20 – 60

Інтенсивність шуму на відстані 0,5 м, дБ – 58

Таймер, хв – 1 – 60

Об'єм мийки, л – 3

Розміри резервуара мийки, мм – 240 x 137 x 100

Розміри кошика, мм – 210 x 110 x 40

Габаритні розміри, мм – 310 x 190 x 210

Напруга живлення, В – 220

Висновок: Серед розглянутих ультразвукових ванн, немає ванн які задовольняють встановленні вимоги, а саме малий об'єм та можливість регулювання потужності зведенні данні наведено в табл. 2.

Табл. 2 Порівняння приладів аналогів

	Jeken CD-4800	Branson B200	CD-4820	УЗМ-3
Вартість	4484 грн.	6050 грн.	6100 грн.	7550 грн.
Об'єм	1,4 л.	2 л.	2,5 л.	3 л.
Потужність генератора	70 Вт	70 Вт	70 Вт	120 Вт
Частота ультразвуку	42000 Гц	42000 Гц	42000 Гц	40000 Гц
Додаткові функції	Таймер зі зручним інтерфейсом	Таймер	Вбудований нагрівач з датчиком температури, таймер	Таймер 1 – 60 хв, нагрівач, 2 випромінювача,

1.5. Висновок до розділу 1

У результаті проведеного аналітичного огляду було виявлено, що на ринку України існує широкий вибір ультразвукових ванн для різних цільових груп споживачів. Було виявлено різноманітні моделі з різними характеристиками та функціональністю.

Аналізуючи ці моделі, було встановлено, що багато з них вже використовують ультразвукову кавітацію для ефективної очистки речей.

З урахуванням вищезазначених факторів, можна зробити висновок про необхідність розробки малогабаритних ультразвукових ванн. Такі ванни були би ефективним і зручним рішенням для лабораторних досліджень, де потрібно обробляти невеликі об'єми речей з використанням ультразвукової кавітації.

На основі проведеного аналітичного огляду будуть сформульовані вимоги та критерії для розробки малогабаритної ультразвукової ванни, які відповідатимуть потребам лабораторних досліджень і забезпечуватимуть ефективну очистку речей в обмеженому просторі.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МАЛОГАБАРИТНОЇ УЗ ВАННИ НА СТРУКТУРНОМУ РІВНІ.

2.1. Параметри які має реалізовувати УЗ ванна. Що необхідно щоб отримати кавітацію.

Ультразвукова кавітація виникає за певних умов, коли високочастотні звукові хвилі проходять через рідину, створюючи змінний тиск. Цей змінний тиск створює коливання та стиснення рідини, що може призводити до формування різниці тисків та відшарування мікроскопічних бульбашок газу в рідині.

При подальшому розширенні та стисканні цих бульбашок вони можуть схлопуватися, створюючи сильний потік рідини та механічні хвильові тиски, які можуть руйнувати забруднення на поверхні рідини та внутрішніх ділянках.

Отже, для отримання ультразвукової кавітації необхідно мати високочастотне джерело звуку та рідину, яка може реагувати на цей звук. Вимоги до джерела звуку можуть варіюватись залежно від вимог до розміру та потужності ультразвукової ванни, а рідина має мати властивості, що дозволяють їй взаємодіяти з ультразвуком, наприклад, має бути достатньо рідкою або мати певний вміст газів. [12]

Використання п'єзокерамічного випромінювача ультразвуку може допомогти зменшити розміри ультразвукової ванни, оскільки п'єзоелектричні випромінювачі мають високу ефективність перетворення електричної енергії в ультразвукові хвилі.

Крім того, п'єзокерамічні випромінювачі зазвичай мають малу габаритну довжину та можуть бути виготовлені у вигляді плоских пластин або круглих дисків. Це дозволяє розміщувати їх у вузьких просторах та зменшувати загальний об'єм ультразвукової ванни.

Проте, для зменшення об'єму ванни необхідно також враховувати мінімальний розмір предметів, які потрібно очищати в ультразвуковій ванні, оскільки їх розмір повинен бути меншим за внутрішні розміри ванни.

Крім того, важливо також враховувати мінімальний об'єм рідини, який необхідний для забезпечення ефективної ультразвукової очистки. Надто маленький об'єм рідини може спричинити нестачу води під час роботи ванни, що може призвести до збільшення шуму та зменшення ефективності очищення.

Якщо не брати до уваги розмір очищуваних речей, то зменшення розмірів ультразвукової ванни залежить від кількох факторів, таких як:

Частота ультразвукових хвиль: чим вища частота, тим менший може бути розмір випромінювача та резонатора.

Ефективність перетворення електричної енергії в ультразвукові хвилі: використання п'єзокерамічних випромінювачів може забезпечити високу ефективність перетворення енергії та дозволити зменшити розмір випромінювача.

Мінімальний об'єм рідини, необхідний для ефективної роботи ванни: зменшення розміру ванни повинно бути здійснене з урахуванням мінімального об'єму рідини, який необхідний для забезпечення ефективної ультразвукової очистки.

Форма та конструкція ванни: розробка оптимальної форми та конструкції ванни може допомогти зменшити її розмір.

Зважаючи на ці фактори, можна розробити малогабаритну ультразвукову ванну, яка буде ефективною для очищення різних предметів в обмеженому просторі. [13]

2.2. Структурна схема УЗ ванни.

На Рис. 9 приведена структурна схема типового ультразвукового генератора.

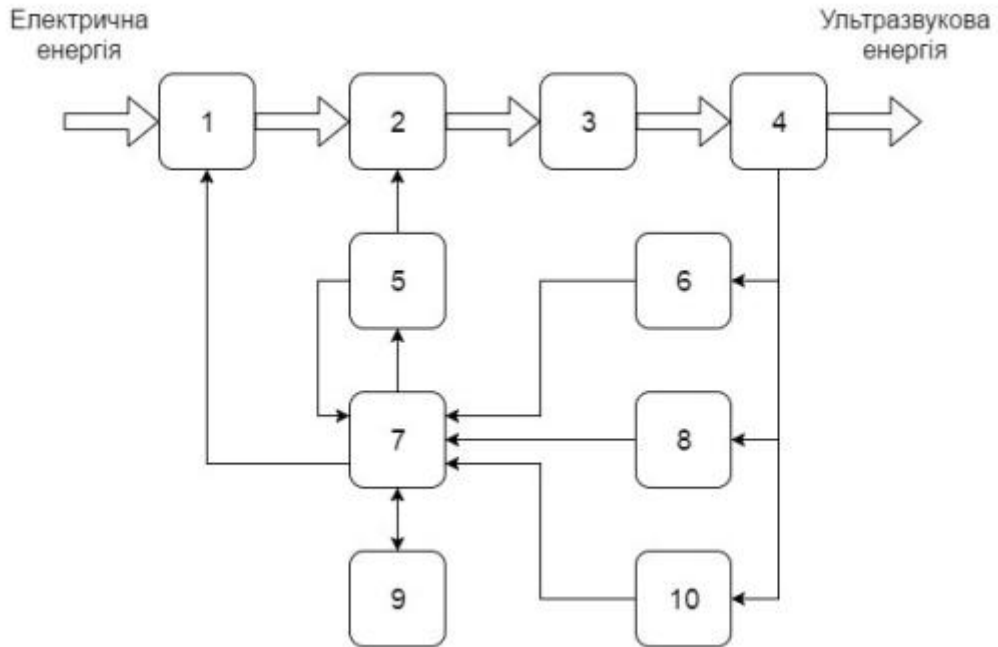


Рис. 9 Структурна схема УЗГ

Елементи 1, 2, 3, 4 складають електроакустичний шлях, що перетворює електричну енергію промислової мережі на енергію пружних коливань ультразвукової частоти. Блок 1 представляє собою джерело постійної напруги, яке регулюється, та подається на транзисторний інвертор 2. Частота інвертора контролюється керованим генератором ультразвукової частоти 5. Вихід інвертора 2 надає прямокутну напругу з амплітудою, що дорівнює вихідній напрузі джерела 1. Ця напруга потрапляє до погоджувального кола 3, де виділяється та посилюється перша гармоніка вхідного сигналу. З виходу погоджувального кола напруга подається на п'єзоелементи коливальної системи. Елементи блок-схеми 6, 8, 10 виконують функцію зворотного зв'язку. Мікроконтролер, використовуючи вузол 7, забезпечує реалізацію алгоритмів управління та стабілізації амплітуди механічних коливань ультразвукової коливальної системи, а також координує роботу всіх інших вузлів ультразвукового генератора [14].

Головним принципом, який лежить в основі сучасних ультразвукових генераторів, є автоматичне регулювання, що означає взаємозв'язок між генератором як джерелом електричної енергії і змінними режимами ультразвукового перетворювача. Перетворювач під впливом навантаження змінює свою резонансну частоту та внутрішній опір. Для забезпечення постійного та рівномірного дозування акустичної енергії необхідне постійне узгодження перетворювача з генератором шляхом автоматичного регулювання частоти або потужності. Перший спосіб передбачає неперервне відстеження зміни резонансної частоти перетворювача з боку ультразвукового генератора, що впливає на амплітуду коливань. Другий спосіб передбачає автоматичне збільшення або зменшення потужності відповідно до зміни навантаження на перетворювач.

Для досягнення оптимального використання позитивних властивостей п'єзокерамічних перетворювачів в напівпровідникових генераторах застосовують регулювання обома способами. На рис. 10 наведені відомі методи автоматичного регулювання частоти генераторів.



Рис. 10 Способи автоматичного регулювання частоти

До групи генераторів з самозбудженням належать схеми, в яких перетворювач входить до складу електромеханічної обробки зв'язку. Частота коливань генератора визначається характеристиками його еквівалентної схеми, і без перетворювача електричні коливання не виникають.

Група генераторів з незалежним збудженням є широко поширеною. Частота такого генератора залежить від зміни параметра системи, що прямо пов'язаний з резонансною частотою. При відключенні перетворювача коливання продовжують генеруватися.

Інші пристрої налаштовують частоту під резонансну частоту ультразвукового перетворювача. Дальший розвиток автоматичного регулювання пов'язаний зі синхронізацією генератора збудження, що створюється датчиком ультразвукового перетворювача [15].

У структурі ультразвукового генератора з функцією авторегулювання частоти присутні наступні основні компоненти: мережеве джерело живлення (ДЖ), підсилювач потужності (ПП), фазове авторегулювання частоти, п'єзокерамічний перетворювач (ПКП), блок узгодження (БУ) та датчик струму (ДС) (Рис. 11).

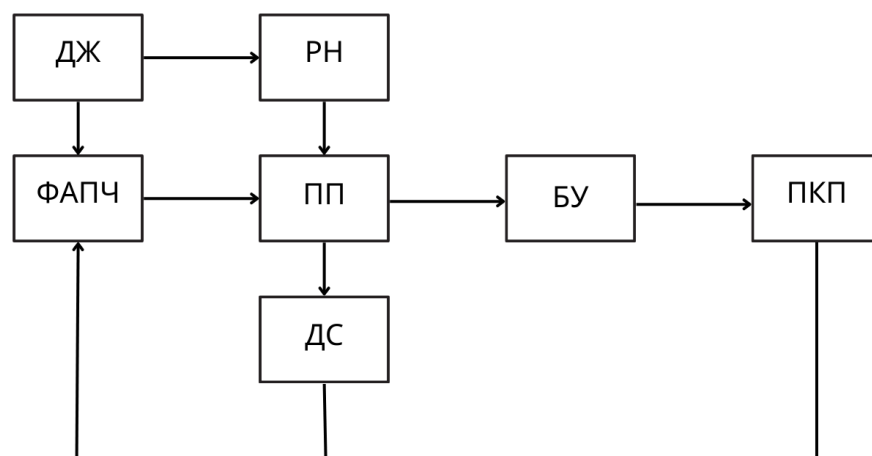


Рис. 11 Структурна схема УЗ ванни

Ця структурна схема забезпечує надійну та ефективну роботу ультразвукового генератора з функцією авторегулювання частоти. Шляхом взаємодії між мережевим джерелом живлення, підсилювачем потужності, фазовим автопідлаштуванням частоти, п'єзокерамічним перетворювачем, блоком узгодження та датчиком струму, система забезпечує стабільне

живлення, підсилювання сигналу, автоматичне настроювання частоти, генерацію ультразвукових коливань та контроль поточного струму.

Мережеве джерело живлення (ДЖ): його основна функція - забезпечити стабільне живлення всіх компонентів генератора. Воно перетворює вхідну електричну енергію від мережі відповідно до потрібних параметрів живлення для роботи системи.

Регулятор напруги (РН) — перетворювач електричної енергії забезпечує стабільну вихідну напругу в заданих межах, незважаючи на значні зміни вхідної напруги та опору навантаження

Підсилювач потужності (ПП): цей блок відповідає за підсилення електричного сигналу, який видається мережевим джерелом живлення. Він забезпечує достатню потужність для живлення п'єзокерамічного перетворювача та генерації ультразвукових коливань.

Блок узгодження (БУ) виконує функцію забезпечення взаємодії між різними елементами системи, зокрема підсилювачем потужності, п'єзокерамічним перетворювачем та фазовим автопідлаштуванням частоти. Він відповідає за передачу сигналу та забезпечення взаємодії між цими блоками для ефективної роботи генератора.

П'єзокерамічний перетворювач працює на резонансній частоті, де зсув фази між напругою і струмом наближається до нуля. Напруга для підживлення генерується з генератора, а струм вимірюється за допомогою датчика струму, розташованого недалеко від перетворювача. Коли зсув фази наближається до нуля, функція автоматичного підлаштування частоти (ФАПЧ) припиняє сканування частоти. На резонансі імпеданс п'єзокерамічного перетворювача є мінімальним, тоді як на антирезонансі він досягає максимального значення для даного типу перетворювача. У такому випадку, при антирезонансі напруга на датчику струму практично відсутня.

Датчик струму (ДС) вимірює поточний струм, що протікає через підсилювач потужності. Цей датчик має важливе значення при регулюванні потужності генератора, контролі струму та забезпеченні безпеки роботи системи. Він може виявляти перевантаження або неправильну роботу блоків системи та ініціювати заходи безпеки, такі як відключення живлення.

2.3. Висновок до розділу 2

В результаті розділу було проведено детальний аналіз та розробка концептуальної моделі малогабаритної ультразвукової ванни. Застосування структурного підходу дозволило розглянути ванну як складові блоки, кожен з яких відповідає певній функції та має свої вимоги та параметри.

Розроблена концептуальна модель малогабаритної ультразвукової ванни дозволяє зменшити розміри ванни при збереженні її функціональності та здатності здійснювати ультразвукову кавітацію для очищення різних речей. Це дозволить ефективно використовувати ванну в лабораторних умовах або в обмеженому просторі, де малі об'єми є важливим фактором.

Додатковою перевагою розробленої ванни є наявність функції автоматичного настроювання резонансу, яка дозволяє самостійно регулювати робочу частоту відповідно до змін у навантаженні або умовах роботи. Це покращує стабільність та точність процесу ультразвукової кавітації, а також забезпечує захист ванни від перевантажень та некоректних умов роботи.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ВУЗЛІВ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ВАННИ.

3.1. Розрахунки параметрів перетворювача.

Розрахуємо стержньовий несиметричний п'єзокерамічний перетворювач, який на резонансній частоті у робочому середовищі (воді) випромінює акустичну потужність 14,5 Вт. П'єзоактивний стержень із кераміки складу АРС – 880 виконано у вигляді двох ідентичних зклеєних шайб загальною довжиною $h_2 = 10$ мм, зовнішнім та внутрішнім діаметрами $d_{2н} = 38,5$ мм та $d_{2в} = 9$ мм відповідно. Електрично шайби включені паралельно. Накладки круглі. Робоча накладка має вигляд зрізаного конусу висотою, $h_1 = 38$ мм діаметрами $d_1' = 59$ мм та $d_1'' = 38,5$ мм і виготовлена із сплаву АМг-6. Тильна накладка товщиною $h_3 = 19$ мм і зовнішнім та внутрішнім діаметрами $d_{3н} 38,5$ мм та $d_{3в} = 9$ мм відповідно виконана із сталі.

Повний розрахунок перетворювача здійснюємо в два етапи. На першому етапі побудуємо його еквівалентну електромеханічну схему і розрахуємо параметри коливальної системи стержньового перетворювача. На другому етапі визначимо всі вихідні параметри перетворювача на основі цієї схеми.

Розрахунки електричних і механічних параметрів стержньового перетворювача.

Перш ніж виконувати розрахунки, візьмемо з літературних джерел [6], [10] необхідні вихідні данні щодо фізико-механічних параметрів матеріалів, з яких, згідно з умовами задачі, виготовлені елементи конструкції перетворювача:

п'єзoeлектрична кераміка АРС-880:

$$\rho_2 = 7,6 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$Y_3^E = 1,05 \times 10^{11} \text{ Па}$$

$$d_{33} = 152 \times 10^{-12} \text{ Кл/Н}$$

$$\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0} = 1450$$

алюмінієвий сплав:

$$\rho_1 = 2,7 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$Y_1 = 0,72 \times 10^{11} \text{ Па}$$

сталь:

$$\rho_3 = 7,8 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$Y_3 = 2,1 \times 10^{11} \text{ Па}$$

Площі поперечних перерізів стержня S_2 та накладок S_1 і S_3 становлять:

$$S_1 = 3,7 \times 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$S_2 = S_3 = 1,1 \times 10^{-3} \text{ м}^2$$

Швидкості звуку в матеріалах дорівнюють:

$$C_1 = \sqrt{\frac{Y_1}{\rho_1}} = 5,1 * 10^3 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right]$$

$$C_2 = \sqrt{\frac{Y_2}{\rho_2}} = 3,035 * 10^3 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right]$$

$$C_3 = \sqrt{\frac{Y_3}{\rho_3}} = 5,2 * 10^3 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right]$$

Знайдемо резонансну частоту f_r трьохкомпонентної коливальної системи перетворювача в повітрі. Рівняння, яке зв'язує між собою резонансні частоти і геометричні розміри перетворювача через хвильові розміри активного п'єзокерамічного елемента і двох пасивних накладок коливальної системи в цілому, має вигляд:

$$\frac{\rho_1 C_1 S_1}{\rho_2 C_2 S_2} * \tan\left(\frac{2\pi l_1}{\lambda_1}\right) * \frac{\rho_3 C_3 S_3}{\rho_2 C_2 S_2} * \tan\left(\frac{2\pi l_3}{\lambda_3}\right) * \tan\left(\frac{2\pi l_2}{\lambda_2}\right) = \frac{\rho_1 C_1 S_1}{\rho_2 C_2 S_2} * \tan\left(\frac{2\pi l_1}{\lambda_1}\right) + \frac{\rho_3 C_3 S_3}{\rho_2 C_2 S_2} * \tan\left(\frac{2\pi l_3}{\lambda_3}\right) + \tan\left(\frac{2\pi l_2}{\lambda_2}\right) \quad (1)$$

$$F1(f) := \frac{\rho_1 c_1 \cdot s_1}{\rho_2 c_2 \cdot s_2} \cdot \tan\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot l_1}{\frac{c_1}{f}}\right) \cdot \left(\frac{\rho_3 c_3 \cdot s_3}{\rho_2 c_2 \cdot s_2} \cdot \tan\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot l_3}{\frac{c_3}{f}}\right)\right) \cdot \tan\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot l_2}{\frac{c_2}{f}}\right)$$

$$F2(f) := \frac{\rho_1 c_1 \cdot s_1}{\rho_2 c_2 \cdot s_2} \cdot \tan\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot l_1}{\frac{c_1}{f}}\right) + \left(\frac{\rho_3 c_3 \cdot s_3}{\rho_2 c_2 \cdot s_2} \cdot \tan\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot l_3}{\frac{c_3}{f}}\right)\right) + \tan\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot l_2}{\frac{c_2}{f}}\right)$$

Розв'язавши це рівняння графічно, знаходимо точку перетину графіків, що знаходиться на частоті 31000 Гц.

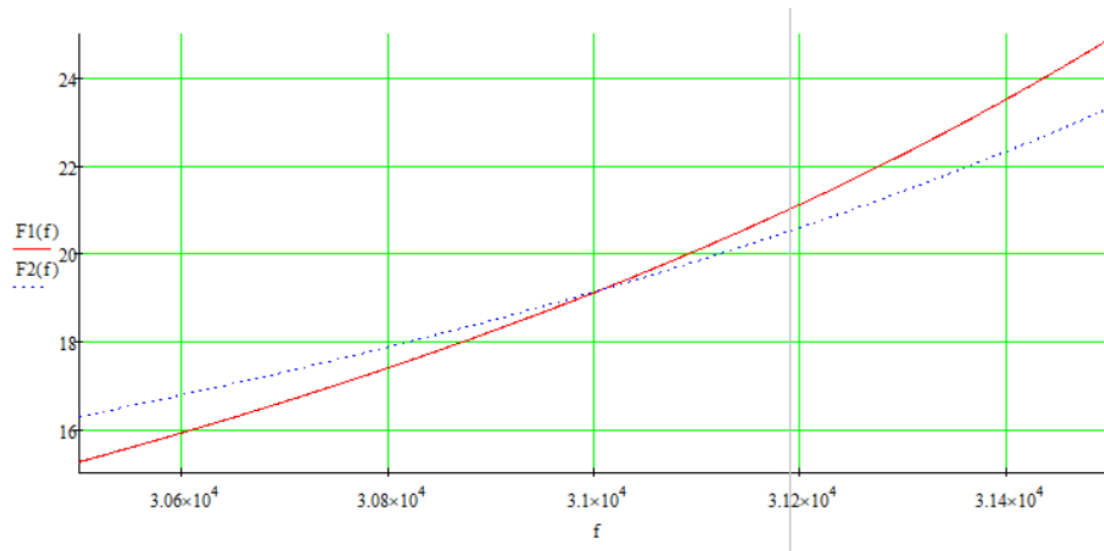


Рис. 12 Графік рівняння 1

З рис.12 можна зробити висновок, що $f_p = 31000$ Гц.

Знайдемо положення вузлового нейтрального перерізу. Хвильові розміри правої і лівої (відносно вузла коливальної швидкості) половин коливальної системи стержньового перетворювача розраховуються із системи рівнянь:

$$\tan\left(\frac{2\pi l_2''}{\lambda_2}\right) = \frac{1}{\frac{\rho_3 C_3 S_3 \tan\left(\frac{2\pi l_3}{\lambda_3}\right)}{\rho_2 C_2 S_2}}$$

$$\tan\left(\frac{2\pi l'_2}{\lambda_2}\right) = \frac{1}{\frac{\rho_1 C_1 S_1 \tan\left(\frac{2\pi l_1}{\lambda_1}\right)}{\rho_2 C_2 S_2}}$$

де l'_2 та l''_2 - відповідно відстані від початку активної частини до вузла коливальної швидкості стоячої хвилі (в повітрі) та від вузла швидкості до кінця активної частини ($l'_2 + l''_2 = 1$).

Довжини хвиль в матеріалах:

$$\lambda_1 = \frac{C_1}{f_p} ; \lambda_2 = \frac{C_2}{f_p} ; \lambda_3 = \frac{C_3}{f_p}$$

Тоді:

$$l''_2 = 3,1 \times 10^{-3} \text{ м}$$

$$l'_2 = 7,9 \times 10^{-3} \text{ м}$$

Коефіцієнт електромеханічної трансформації перетворювача на нижній моді коливань знайдемо за допомогою виразу:

$$n = \frac{n_{\text{акт}}}{2} \times \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{\rho_1 C_1 S_1}{\rho_2 C_2 S_2}\right)^2 \times \tan^2\left(\frac{2\pi l_1}{\lambda_1}\right)} + \sqrt{1 + \left(\frac{\rho_3 C_3 S_3}{\rho_2 C_2 S_2}\right)^2 \times \tan^2\left(\frac{2\pi l_3}{\lambda_3}\right)}}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{\rho_3 C_3 S_3}{\rho_2 C_2 S_2}\right)^2 \times \tan^2\left(\frac{2\pi l_3}{\lambda_3}\right)\right] \times \left[1 + \tan^2\left(\frac{2\pi l_1}{\lambda_1}\right)\right]}}$$

де $n_{\text{акт}}$ – коефіцієнт електромеханічної трансформації активного елемента коливальної системи стержньового перетворювача.

$$n_{\text{акт}} = \frac{2d_{33}y_3^E S_2}{\delta}, \text{ де } \delta - \text{відстань між електродами.}$$

В нашому випадку $\delta = 5 \times 10^{-3} \text{ м}$.

$$n_1 := \frac{2 \cdot 200 \cdot 10^{-12} \cdot 7 \cdot 10^{10} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3}} = 6.16$$

$$n := \frac{6.16 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{270030003.7 \cdot 10^{-3}}{760030351.09 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \cdot \frac{1 - \cos(2x1)}{1 + \cos(2x1)}} + \sqrt{1 + \left(\frac{780052001.1 \cdot 10^{-3}}{760030351.1 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \cdot \frac{1 - \cos(x3)}{1 + \cos(x3)}} \right]}{2 \sqrt{1 + \left(\frac{780052001.1 \cdot 10^{-3}}{760030351.1 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \cdot \frac{1 - \cos(x3)}{1 + \cos(x3)}} \cdot \left(1 + \frac{1 - \cos(x1)}{1 + \cos(x1)} \right)} = 21.548$$

Еквівалентна маса перетворювача на нижчій моді коливань становить:

$$m_{\text{екв}} = \frac{\rho_1 l_1 S_1}{2} + \frac{\rho_2 l_2 S_2}{2} \times \frac{\cos^2 \left(\frac{2\pi l_1}{\lambda_1} \right)}{\sin^2 \left(\frac{2\pi l'_2}{\lambda_2} \right)} + \frac{\rho_3 l_3 S_3}{2} \times \frac{\sin^2 \left(\frac{2\pi l''_2}{\lambda_2} \right)}{\cos^2 \left(\frac{2\pi l_3}{\lambda_3} \right)} \times \frac{\cos^2 \left(\frac{2\pi l_1}{\lambda_1} \right)}{\sin^2 \left(\frac{2\pi l'_2}{\lambda_2} \right)}$$

Маса секцій коливальної системи:

$$\rho_1 l_1 S_1 = 0,38 \text{ кг}$$

$$\rho_2 l_2 S_2 = 0,084 \text{ кг}$$

$$\rho_3 l_3 S_3 = 0,163 \text{ кг}$$

Еквівалентна маса перетворювача:

$$m := \left(\frac{27003810^{-3} \cdot 3.7 \cdot 10^{-3}}{2} \right) + \left[\left(\frac{76001010^{-3} \cdot 1.1 \cdot 10^{-3}}{2} \right) \cdot \frac{1 + \cos(2 \cdot x1)}{2} \right] + \left(\frac{78001910^{-3} \cdot 1.1 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \frac{1 - \cos(2x5)}{2} \cdot \frac{1 + \cos(2x1)}{2} \right) = 0.193$$

Еквівалентна гнучкість на нижній моді коливань дорівнює:

$$C_{\text{екв}} = \left\{ 2\pi^2 \left[\frac{y_1 S_1}{l_1} \times \left(\frac{l_1}{\lambda_1} \right)^2 + \frac{y_2 S_2}{l_2} \times \left(\frac{l_2}{\lambda_2} \right)^2 \times \frac{\cos^2 \left(2\pi \frac{l_1}{\lambda_1} \right)}{\sin^2 \left(2\pi \frac{l'_2}{\lambda_2} \right)} + \frac{y_3 S_3}{l_3} \times \left(\frac{l_3}{\lambda_3} \right)^2 \right. \right. \\ \left. \left. \times \frac{\sin^2 \left(2\pi \frac{l''_2}{\lambda_2} \right)}{\cos^2 \left(2\pi \frac{l_3}{\lambda_3} \right)} \times \frac{\cos^2 \left(2\pi \frac{l_1}{\lambda_1} \right)}{\sin^2 \left(2\pi \frac{l'_2}{\lambda_2} \right)} \right] \right\}^{-1}$$

Для нашого випадку:

$$\frac{Y_1 S_1 l_1}{\lambda_1^2} = 1.081 \times 10^9; \frac{Y_2 S_2 l_2}{\lambda_2^2} = 8,033 \times 10^6; \frac{Y_3 S_3 l_3}{\lambda_3^2} = 1,56 \times 10^8$$

Еквівалентна гнучкість:

$$x := \left[2\pi^2 \left(1.08110^9 + 8.03310^7 \cdot \frac{\frac{1+\cos(2x1)}{2}}{\frac{1-\cos(2x4)}{2}} + 1.5610^8 \cdot \frac{\frac{1-\cos(2x5)}{2}}{\frac{1+\cos(2x3)}{2}} \cdot \frac{\frac{1+\cos(2x1)}{2}}{\frac{1-\cos(2x4)}{2}} \right) \right]^{-1} = 4.665 \times 10^{-11}$$

Електрична ємність загальмованого стержньового перетворювача:

$$C_0^S = C^T (1 - K_{\text{еф}}^2)$$

де C^T – електрична ємність вільного перетворювача.

$$C^T = L \times C_n^T$$

де C_n^T – електрична ємність вільного п'єзоелемента (шайби),

L – кількість паралельно включених шайб.

$$C_n^T = \left(\frac{\varepsilon_{33}^T}{\varepsilon_0} \right) \times \frac{\varepsilon_0 S_{\text{ел}}}{\delta}$$

Площа електродів шайб:

$$S_{\text{ел}} = S_2 = 1.1 \times 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$\delta = 5 \times 10^{-3} \text{ м}$$

Діелектрична проникливість вакууму:

$$\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$$

$$C_n^T = 1450 * \frac{8,85 * 10^{-12} * 1,1 * 10^{-3}}{5 * 10^{-3}} = 2,8 * 10^{-9}$$

$$C^T = 2 * 2,8 * 10^{-9} = 5,6 * 10^{-9} [\text{Ф}]$$

$$K_{\text{еф}}^2 = \frac{n^2 C_{\text{екв}}}{C^T} = \frac{464,31 * 4,665 * 10^{-11}}{5,6 * 10^{-9}} = 3,86$$

$$C_0^S = C_0 = 5,4 * 10^{-9} * (1 - 0,43) = 3 * 10^9 [\Phi]$$

Опір електричних втрат на резонансній частоті перетворювача в повітрі:

$$R_{\text{ев}} = \frac{1}{\omega_p C_0 \tan \delta}$$

$$R_{\text{ев}} := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 310003 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{10} \cdot 0,03} = 5,704 \times 10^{-6}$$

Опір механічних втрат $r_{\text{мвр}}$ на резонансній частоті перетворювача приблизно можливо оцінити по експериментальним значенням механічної добротності $Q_{\text{м}}$, які одержані для аналогічних конструкцій:

$$Q_{\text{м}} = \frac{\omega_p m_{\text{екв}}}{r_{\text{мвр}}}$$

Наприклад, стержньові перетворювачі, герметизація яких виконується гумою або металом, мають відповідно механічні добротності $Q_{\text{м}} = 10 \dots 40$ та $Q_{\text{м}} = 30 \dots 100$

Прийmemo $Q_{\text{м}} = 50$.

$$r_{\text{мвр}} = \frac{\omega_p m_{\text{екв}}}{Q_{\text{м}}}$$

$$r := \frac{2 \cdot \pi \cdot 31000193 \cdot 10^{-3}}{50} = 751,846$$

Опір випромінювання стержньового перетворювача у воді становить:

$$z_{\text{вип}} = (\rho C)_{\text{в}} S_{\text{вип}} (\alpha - \beta)$$

де $(\rho C)_{\text{в}}$ – питомий хвильовий опір води,

α і β – безрозмірні коефіцієнти активної і реактивної складових опору випромінювання.

Оскільки в умовах завдання не визначені величини цих коефіцієнтів, а діаметр випромінюючої поверхні перетворювача приблизно вдвічі більший довжини хвилі частоти резонансу, можна прийняти, що $\alpha = 0,74$, а $\beta = 0$. Тоді:

$$z_{\text{вип}} = r_{\text{вип}} = (\rho C)_{\text{в}} S_{\text{вип}} \alpha = 1000 * 1500 * 1,45 * 10^{-3} * 0,74 = 1605 \left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right]$$

Обчислення вихідних параметрів перетворювача

Активна складова механічного опору:

$$r_{\text{м}} = r_{\text{мвр}} + r_{\text{вип}} = 751.8 + 4107 = 4858.8 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Реактивна складова механічного опору на резонансній частоті:

$$x_{\text{м}} = 0$$

Механічна добротність в робочому середовищі (воді) на резонансній частоті:

$$Q_{\text{м}} = \frac{2\pi f_{\text{р}} m_{\text{екв}}}{r_{\text{м}}} = \frac{2\pi * 31000 * 0.193}{4858.8} = 7.737$$

Вхідні електричні опір Z та провідність Y :

$$Z = \frac{RX(X - jR)}{X^2 + R^2} ; Y = G + jB ; G = \frac{1}{R} ; B = \frac{1}{X}$$

Активна R_0 складова вхідного опору на резонансній частоті:

$$R_0 = \frac{\frac{r_{\text{м}}}{n^2}}{1 + \frac{r_{\text{м}}}{R_{\text{ев}} n^2}}$$

$$R := \frac{\frac{4858.8}{21.5^2 \cdot 10^{10}}}{1 + \frac{4858.8}{5704010^{-10} \cdot 21.5^2 \cdot 10^{10}}} = 1.051 \times 10^{-9}$$

$$R_0 = 10,51 \text{ [Ом]}$$

Реактивна X_0 складова вхідного опору перетворювача на резонансній частоті:

$$X_0 = \frac{1}{\omega_0 C_0} = \frac{1}{2\pi * 31000 * 3 * 10^{-9} * 10^{10}} = 1711 * 10^{-10} \left[\frac{\text{C}}{\text{M}} \right] = 1711 \text{ [Ом]}$$

Акустикомеханічний к.к.д.:

$$\eta_{a/m} = \frac{r_{\text{вип}}}{r_m} = \frac{1605}{4858,8} = 0,33$$

Механоелектричний к.к.д. на частоті резонансу:

$$\eta_{m/e} = \frac{1}{1 + \frac{r_m}{R_{\text{ев}} \times n^2}} = \frac{1}{1 + \frac{4858,8}{57040 * 10^{-10} * 21,5^2 * 10^{10}}} = 0,99$$

Акустикоелектричний к.к.д.:

$$\eta_{a/e} = \eta_{a/m} \times \eta_{m/e} = 0,33 * 0,99 = 0,32$$

Електрична напруга, яку необхідно підвести до стержньового перетворювача для забезпечення випромінювання в робоче середовище заданої акустичної потужності $W_{\text{ак}}$ на резонансній частоті:

$$U = \sqrt{\frac{W_{\text{ак}} R_0}{\eta_{a/e}}} = \sqrt{\frac{14,5 * 10,51}{0,32}} = 21,82 \text{ [В]}$$

Максимальні динамічні напруження (амплітудні значення), які виникають в активному елементі при випромінюванні питомої акустичної потужності:

$$W_{\text{пит}} = \frac{W_{\text{ак}}}{S_{\text{вип}}} = \frac{14,5}{3,7 * 10^{-3}} = 3,92 * 10^3 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$$

На частоті f :

$$T_{\text{дин}} = K_{\text{дин}} \frac{f_p}{f} \sqrt{\frac{W_{\text{пит}}}{\alpha}} \times \frac{(\rho C)_k \sqrt{2}}{\sqrt{(\rho C)_c}}$$

де $K_{\text{дин}}$ – коефіцієнт, який залежить від типу механічної системи перетворювача;

$(\rho C)_k$ та $(\rho C)_c$ – хвильові опори п'єзокераміки та робочого середовища;

α – безрозмірний коефіцієнт активної складової опору випромінювання.

При тих співвідношеннях $\frac{S_1}{S_2}$, що мають місце в нашому випадку, для стержньового перетворювача можна прийняти $K_{\text{дин}} = 1$.

Для води на резонансній частоті f_p :

$$T_{\text{ст}} := \sqrt{\frac{3.92 \cdot 10^3}{0.74}} \cdot \frac{76003035 \sqrt{2}}{\sqrt{10001500}} = 1.939 \times 10^6$$

Максимальні статичні напруження, які виникають в активному елементі силової конструкції при дії статичного тиску q :

$$T_{\text{ст}} = K_{\text{ст}} \times q$$

де $K_{\text{ст}}$ – коефіцієнт, що залежить від типу механічної системи перетворювача.

Для стержньового трьохкомпонентного перетворювача:

$$K_{\text{ст}} = \frac{S_3}{S_2}$$

Для умов нашої задачі:

$$K_{\text{ст}} = 1$$

$$q = 1 \text{ атм} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$T_{\text{ст}} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

Звуковий тиск (ефективне значення), який перетворювач розвиває в напрямку своєї поздовжньої осі:

$$p = \frac{1}{2r} \sqrt{\frac{1}{\pi} W_{\text{ак}} (\rho C)_c \times K_k}$$

де r – відстань від перетворювача до точки в дальній зоні, в якій визначається тиск;

K_k – коефіцієнт вісьової концентрації перетворювача, який може бути обчислено згідно з виразом:

$$K_k = \frac{4\pi S_{\text{вип}}}{\lambda^2}$$

де λ – довжина робочої хвилі у воді

$$K_k := \frac{4\pi \cdot 3.7 \cdot 10^{-3}}{0.028^2} = 59.306$$

Тоді

$$p = \frac{1}{2r} \sqrt{\frac{1}{\pi} \times 14.5 \times 1000 \times 1500 \times 59.3} = \frac{10.13 \cdot 10^3}{r} \text{ [Па]}$$

Чутливість в режимі випромінювання:

$$\alpha = \frac{p \times r}{U} = \frac{10.13 \cdot 10^3}{21.82} = 464.2 \left[\frac{\text{Па} \cdot \text{м}}{\text{В}} \right]$$

Косинус кута між електричним струмом I і напругою U на резонансній частоті:

$$\cos \varphi = \frac{|Z|}{R_0} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{R_0}{X_0}\right)^2 + 1}}$$

$$\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{155}{1007}\right)^2 + 1}} = 0.988$$

Коливальна швидкість v_0 та зміщення ξ_0 центру приведення на резонансній частоті у воді:

$$v_0 = \frac{U \times n}{r_M}$$

$$\frac{21.8221.548}{4858.8} = 0.097_{(м/с)}$$

$$\xi_0 = \frac{v_0}{\omega_0} = \frac{0.095}{2\pi * 31000} = 0.48 * 10^{-6} \text{ м.}$$

3.2. Розробка конструкції УЗ ванни.

Зважаючи на те, що метою розробки є створення малогабаритної ультразвукової ванни, основним критерієм буде її компактність. Пропоную таку концептуальну модель:

Розміри: внутрішній об'єм бака – 200 мл.

Матеріали: корпус виготовлений з дерева, внутрішній бак - з нержавіючої сталі.

Ультразвукова система: потужність ультразвукової системи - не менше 50 Вт, частота коливань - від 20 до 40 кГц.

Управління: простий та зручний інтерфейс управління для встановлення необхідної температури та часу очищення.

Безпека: ванна має бути оснащена системою автоматичного відключення ультразвукової системи в разі перевищення максимальної температури або відсутності води в баці.

Нержавіюча ванна, об'ємом 200 мл, виконана з високоякісної нержавіючої сталі, що забезпечує її довговічність і стійкість до корозії. Об'єм ванни становить 200 мл, що дозволяє розміщувати в ній зразки та реактиви зручним способом.

Ванна з'єднана з генератором за допомогою епоксидного клею, (рис. 13) який забезпечує міцне та надійне з'єднання між компонентами. Це гарантує стійкість системи до руйнування через коливання під час роботи.



Рис. 13 Ванна під'єднана до генератора

Дерев'яний корпус, розмірами 23*23*11 сантиметрів, виконаний з високоякісного дерева і встановлений під ванною. Він забезпечує стійкість, захист та зручну робочу площадку для використання ультразвукової ванни. Також ванна з генератором посаджена в отвір на резинову прокладку, для зменшення вібрації при роботі. (рис. 14)



Рис. 14 Прототип УЗ ванни

Розроблена конструкція ультразвукової ванни є компактною, функціональною та стійкою до експлуатації. Вона може бути використана для різних лабораторних досліджень.

3.3. Експериментальні дослідження

Обладнання для проведення експерименту:

- Цифровий генератор сигналів: SIGLENT SDG1032X (рис. 15) [14]
- Цифровий двоканальний осцилограф RIGOL DS1052E (рис. 16) [15]
- Перетворювач (рис. 13)



Рис. 15 Цифровий генератор сигналів

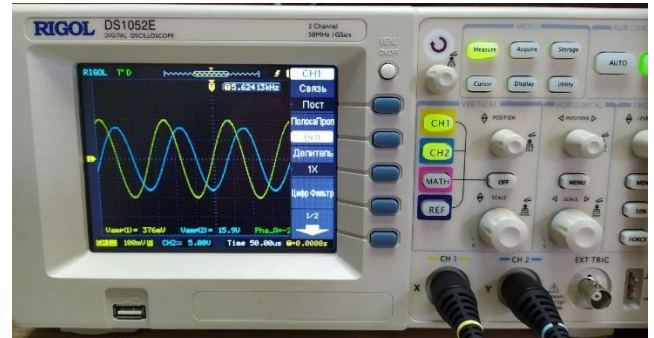


Рис. 16 Цифровий двоканальний осцилограф

Відповідно до теоретичних розрахунків, досліджуваний перетворювач має резонансну частоту 28 кГц. Тому вимірювання будемо проводити в діапазоні 20-40 кГц. Опір $R=100$ Ом. Вихідна напруга генератора $U_{p-p}=8$ В (подвійна амплітуда).

Вимірювання проводимо за схемою (рис. 19), при чому як вимірювальний прилад використаємо осцилограф, який має функції вимірювання напруги першого та другого каналів, а також фазового зсуву між сигналами в цих каналах (рис. 17):



Рис. 17 Повна схема вимірювань

Вимірювання частотної характеристики модуля повного опору ПЕП

Відповідно до ОСТ 5.8361-86 [13], вимірювання модуля повного електричного опору та провідності, а також їх частотних характеристик проводиться за такою схемою (рис. 18):

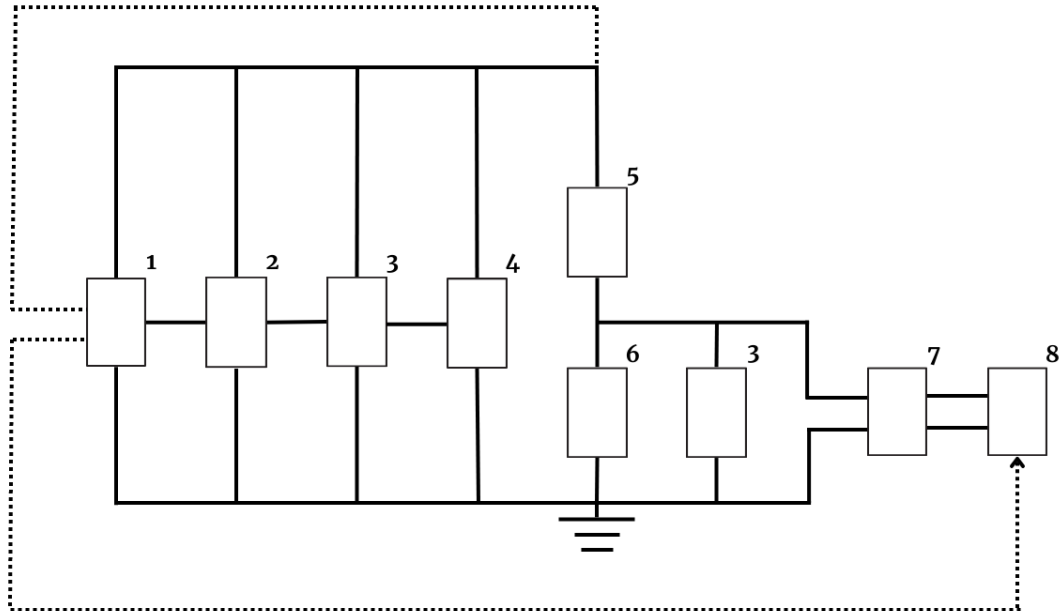


Рис. 18 Схема вимірювання

Вимірювання частотних характеристик модулів повного електричного опору і провідності виконуються в заданому діапазоні частот.

Спрощений вигляд схеми, за якою були проведені вимірювання для відпрацювання роботи стенду наведено на рис. 19.

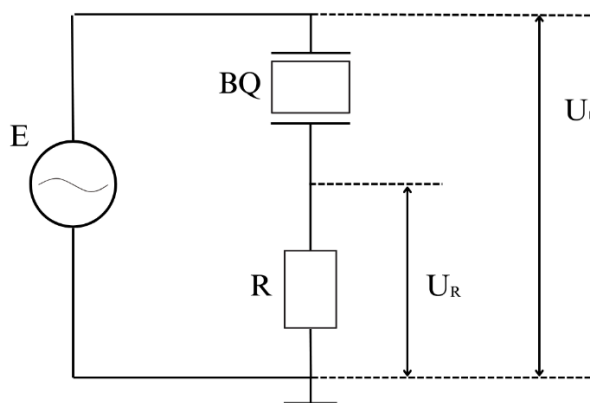


Рис. 19 Спрощений вигляд схеми

Експериментальним шляхом встановлено, що задовільні результати вимірювань, можуть бути отримані при значеннях додаткового резистора $R_d = (10-100)$ Ом. При цьому модуль повного електричного опору знайдемо за

формулою:
$$Z = \frac{(U_F - U_R) \cdot R}{U_R}$$

Результати експерименту.



Рис. 20 На частоті до резонансної



Рис. 21 На резонансній частоті

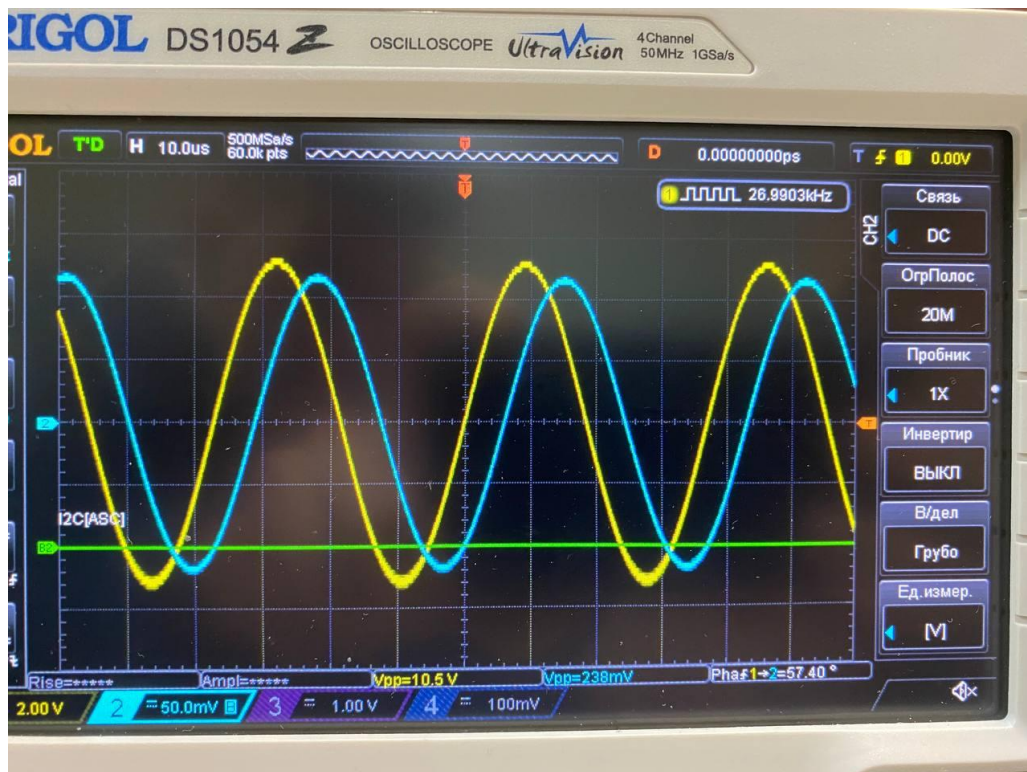


Рис. 22 Після резонансної частоти



Рис. 23 На частоті антирезонансу



Рис. 24 На частоті після антирезонансу

За результатами вимірювань (табл.3) та обчислення за формулою (*) отримуємо графік модуля повного електричного опору та зсуву фаз між

струмом та напругою (рис. 25). Зеленим кольором позначено частоту при якій відбувся резонанс, а червоним антирезонанс. На частоті резонансу $U_{\text{ген}}$ приймає мінімальне значення, а U_R максимальне. В той час як на частоті антирезонансу $U_{\text{ген}}$ приймає максимальне значення, а U_R мінімальне.

Табл. 3 результати вимірів без води

без води			
f, кГц	$U_{\text{ген}}$, В	U_R , мВ	φ
20	14	106	-90
23	13,9	134	-89
25	13,4	162	-82
26	12,6	194	-75
27	10,1	296	-69
27,2	7,9	338	-54
27,39	6,8	310	0
27,43	9,4	222	25
27,5	11,4	154	-40
27,78	5	380	0
28	9,5	300	63
28,2	12,1	200	68
28,4	13,4	114	68
28,6	14,2	58	77
28,8	14	46	60
29,1	14	5,5	0
29,3	14	25	-90
29,5	14	38	-87
30	14	54	-87
31	14	84	-88
35	13,8	130	-84
40	13,3	164	-82

$$Z_i := \frac{(U_{g_i} - U_{r_1}) \cdot R}{U_{r_1}} \quad (*)$$

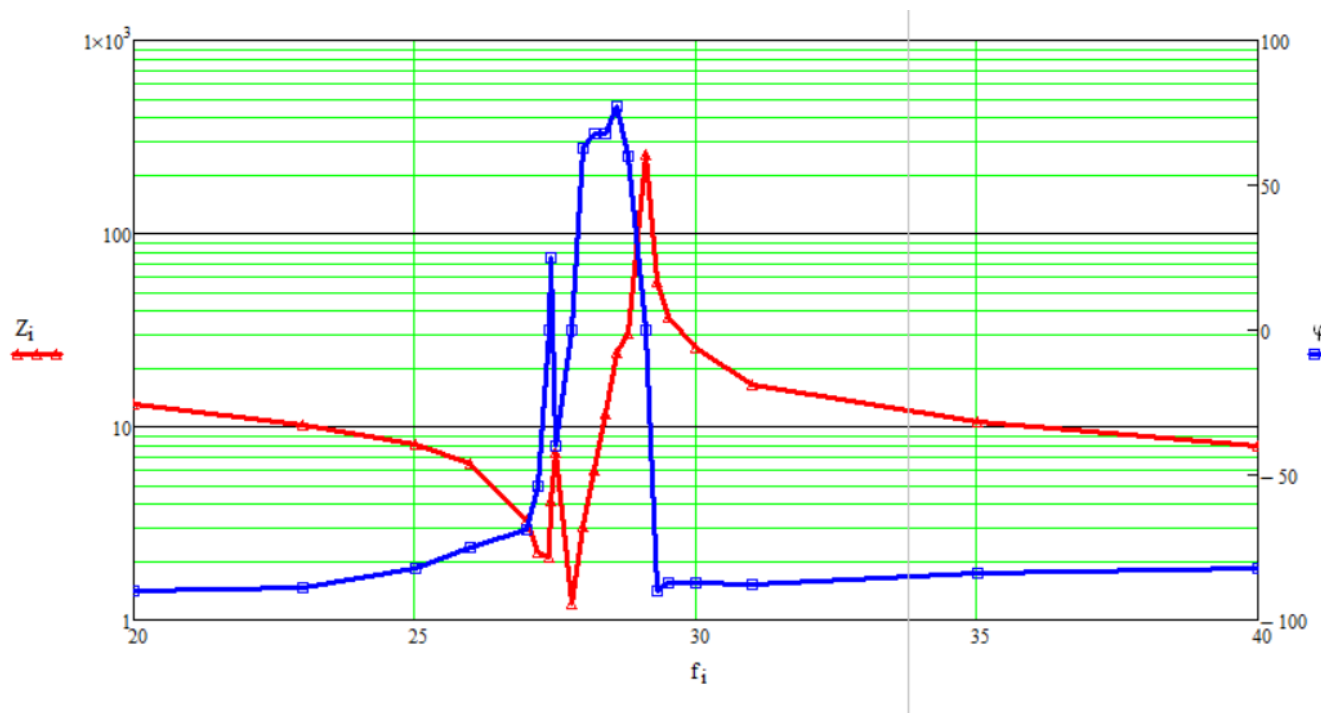


Рис. 25 АЧХ та ФЧХ перетворювача без води

Проводимо виміри додаючи 50 мл води, щоб дослідити вплив об'єму рідини на зміну резонансної частоти та зміну добротності ПЕП при різних об'ємах рідини (50 мл, 100мл, 150 мл, 200мл).

Табл. 4 Результати вимірювань з 50 мл води

50 мл			
f , кГц	$U_{\text{ген}}$, В	U_R , мВ	φ
20	14	106	-87
23	13,6	134	-85
25	12,6	184	-75
26	9,5	230	-40
26,1	12,1	104	-18
26,5	9,5	276	-58
26,72	7,6	280	0
27	12	194	63
27,2	13,2	86	51
27,5	14	26	0
27,8	14	26	-45
28	14	20	-67
28,5	14	63	-83
29	14	68	-90
30	14	90	-86
31	14	106	-84
35	13,7	138	-84
40	13,1	178	-82

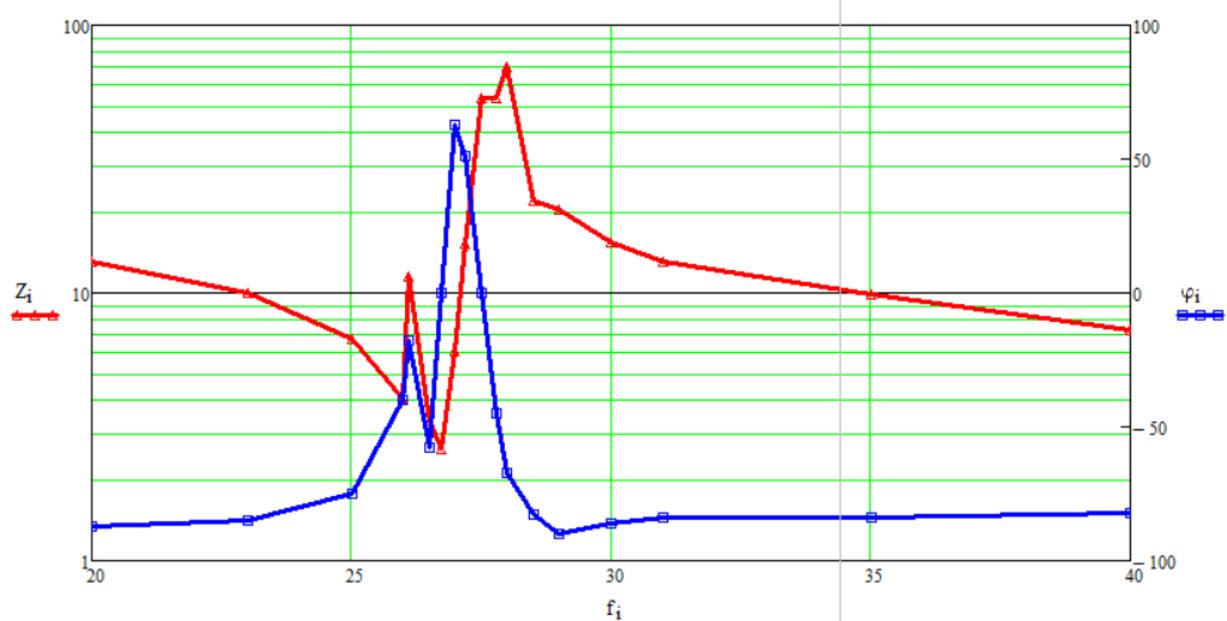


Рис. 26 АЧХ та ФЧХ перетворювача з 50 мл води

Табл. 5 Результати вимірювань з 100 мл води

100 мл			
f, кГц	U _{ген} , В	U _Р , мВ	φ
20	14	110	-87
23	12,6	162	-70
25	13,9	98	-83
25,5	13,9	112	-83
26	13,9	118	-83
26,5	13,9	126	-85
27	13,6	134	-80
27,5	13,6	140	-82
28	13,6	154	-84
28,5	13,4	166	-80
29	13,1	182	-82
29,5	12,4	210	-80
30	10,8	276	-70
30,4	5,8	358	0
30,6	9,2	278	50
30,8	12,2	182	65
31	13,9	96	77
31,35	14	15	0
32	14	56	-81
35	13,9	122	-84
40	13,4	162	-82

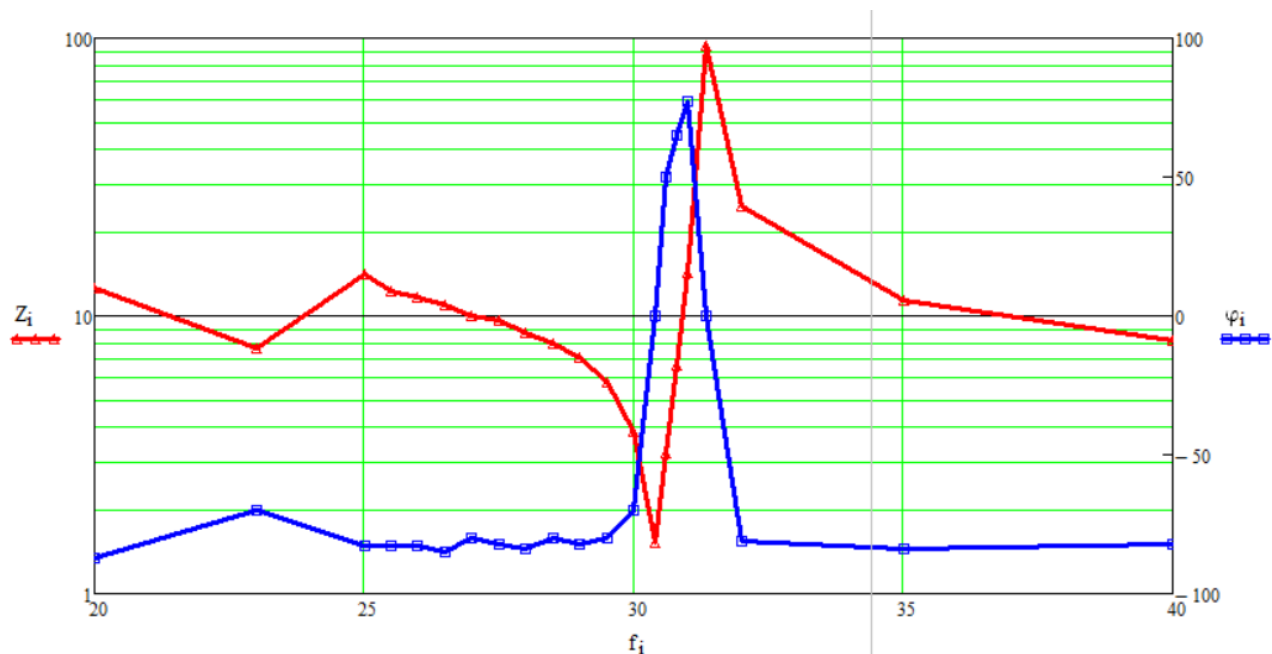


Рис. 27 АЧХ та ФЧХ перетворювача з 100 мл води

Табл. 6 Результати вимірювань з 150 мл води

150 мл			
f_i , кГц	$U_{ген}$, В	U_R , мВ	φ
20	13,7	106	-80
23	13,9	122	-90
25	13,6	148	-83
26	13,1	168	-77
27	12,3	218	-80
27,5	10,5	258	-62
28,12	7,4	288	0
28,5	11,6	182	58
28,8	13,6	76	75
29,16	14	12	0
29,5	14	20	-65
30	14	58	-80
31	14	86	-83
32	14	103	-85
35	13,6	134	-84
40	13,1	174	-70

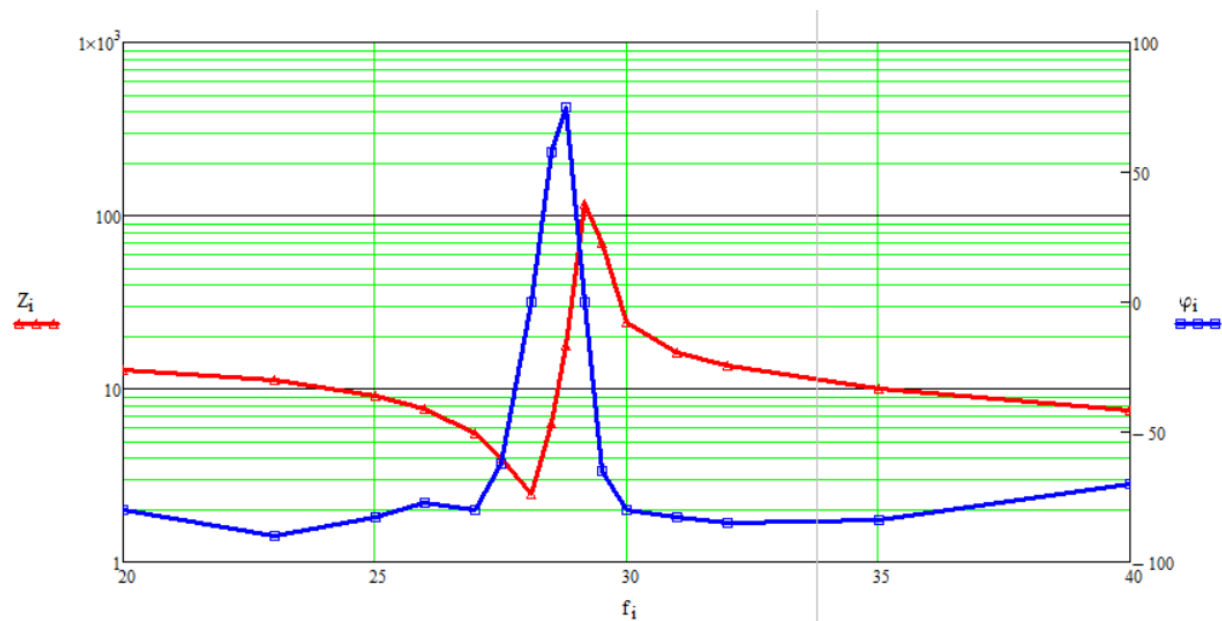


Рис. 28 АЧХ та ФЧХ перетворювача з 150 мл води

Табл. 7 Результати вимірювань з 200 мл води

200 мл			
f_i , кГц	$U_{ген}$, В	U_R , мВ	φ
20	14	102	-87
23	13,9	132	-88
25	13,4	162	-85
25,5	12,6	200	-78
26	12,6	202	-79
26,5	9	310	-60
27	9,2	240	-37
27,21	7,9	278	0
27,5	11	174	40
28	14	23	3
28,1	14	12	0
28,5	14	45	-80
29	14	56	-74
30	14	96	-87
31	13,9	111	-86
32	13,9	126	-84
35	10,5	228	-58
40	13,4	162	-82

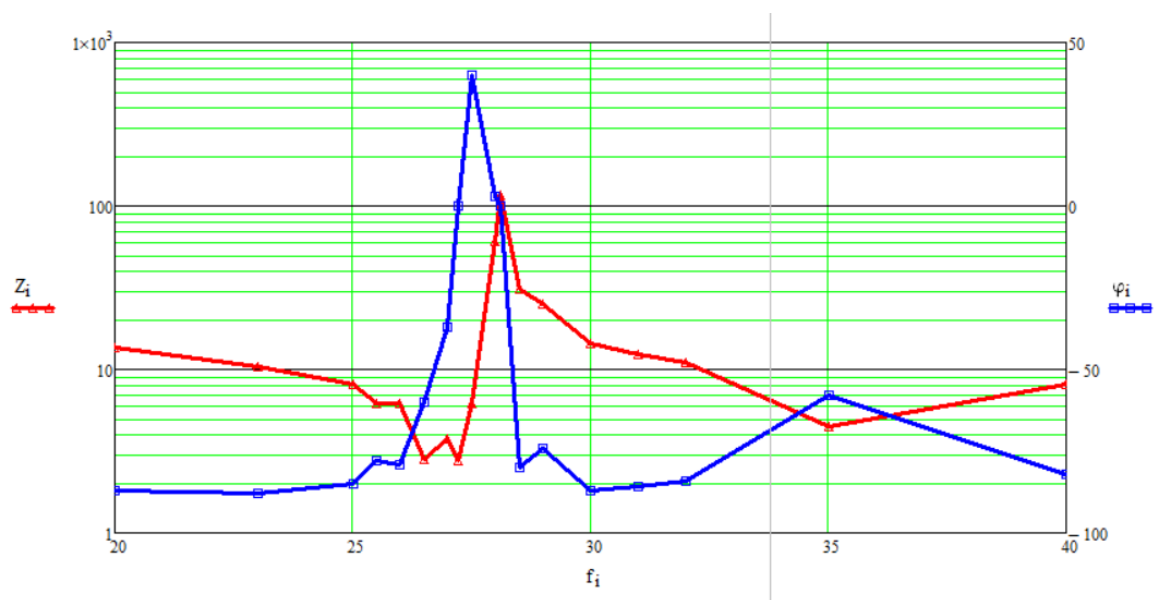


Рис. 29 АЧХ та ФЧХ перетворювача з 200 мл води

3.4. Висновок до розділу 3

За отриманими результатами можна зробити висновок, що зі збільшенням об'єму рідини відбувається зміна резонансної частоти ультразвукових коливань.

Результати експерименту показали, що найвища виміряна частота при якій відбувся резонанс – 30,4 кГц при об'ємі води 100 мл, а найнижча – 26,72 кГц при об'ємі води 50 мл. Збільшення об'єму рідини призводить до збільшення маси системи, що зменшує резонансну частоту.

Однак, зміна об'єму рідини може виникати при різних умовах експлуатації ванни. Це може бути пов'язано з очищенням різних типів предметів або потребою в зміні обсягу робочої рідини. Тому, для забезпечення оптимальних умов роботи ультразвукової ванни, рекомендується встановити автоматичне настроювання резонансу.

Автоматичне настроювання резонансу дозволить динамічно регулювати частоту генератора ультразвукових коливань таким чином, щоб вона відповідала резонансній частоті системи з урахуванням поточного об'єму рідини. Це забезпечить максимальну ефективність очищення та запобігас виникненню небажаних коливань або пошкоджень системи.

ВИСНОВКИ

У рамках даної дипломної роботи була розроблена малогабаритна ультразвукова ванна для лабораторних дослідів. Основними цілями роботи було створення компактного пристрою з високою ефективністю очищення речей, забезпечення автоматичного настроювання резонансу та зменшення витрат на реактиви.

В процесі аналітичного огляду були досліджені існуючі ультразвукові ванни на ринку України. Виявлено, що багато з них мають значні розміри та об'єми, що обмежує їхнє застосування у лабораторних умовах. Також виявлено високі витрати на реактиви та складність настроювання процесу.

Розроблена малогабаритна ультразвукова ванна відповідає вимогам компактності та ефективності. Вона має структурну схему з ключовими блоками, такими як мережеве джерело живлення, підсилювач потужності, фазове автопідлаштування частоти, п'єзокерамічний перетворювач, блок узгодження та датчик струму. Кожен з цих блоків виконує свою функцію, сприяючи стабільному та ефективному роботі ванни.

Застосування малогабаритної ультразвукової ванни має ряд переваг, зокрема економію реактивів, зниження часу проведення експериментів та забезпечення високої якості очищення речей. Функція автоматичного настроювання резонансу дозволяє самостійно регулювати робочу частоту відповідно до змін у навантаженні або умовах роботи, що покращує стабільність та точність процесу.

Отже, розроблена малогабаритна ультразвукова ванна є цінним внеском у розвиток області ультразвукових технологій та їх застосування. Вона може знайти широке застосування у, лабораторних дослідженнях та промисловості, сприяючи покращенню ефективності, точності та економії ресурсів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

1. <https://kvintal.com.ua/ultrazvukovaya-vanna-dlya-chistki-na-7-litrov/>
2. Бистров Ю.М., Голубев А.С. (1984) «Коливальні системи ультразвукових технологічних установок, що працюють на ультразвуку»
3. APC International, Ltd. Physical and Piezoelectric Properties of APC Materials
4. <https://rigol.com.ua/uk/products/digital-oscilloscope-rigol-ds1052e/>
5. Дідковський В.С. та ін. Практикум з технічної акустики: Навчальний посібник / За редакцією В.С. Дідковського. – Київ: 2003
6. <https://titan-ultrasonic.com.ua/poleznye-stati/printsip-raboty-ultrazvukovyh-vann-i-moek.html>
7. <https://mash-xxl.info/info/504043/>
8. <https://www.svarog-uv.ru/uvkavitatsiya.htm>
9. ОСТ 5.8361-86. Апаратура гідроакустична. Антени та перетворювачі. Методи вимірювання електроакустичних параметрів у вимірювальних басейнах.
10. <https://www.siglent.eu/product/1136898/siglent-sdg1032x-30mhz-function-arbitrary-waveform-generator>
11. Розенберг Л.Д. (1970) «Фізика і техніка потужного ультразвуку»
12. Агранат Б.А. (1974) «Ультразвукові технології»
13. Голяміна І.П. (1979) «Ультразвук. Маленька енциклопедія»
14. <http://usonic.ru/science/pubs/povyshenie-kachestva-raboty-uz-tekhnologicheskikhapparatov-na-primere-protsesta-svarki-tonkikh/>
15. В.Н. Ляснікова Ультразвукові процеси і апарати в біології та медицині. / СГТУ – Саратов, 2005 г.
16. <https://medmetr.ru/articles/Osnovnye-svedeniia-pri-vybore-laboratornykh-uzvann/>
17. <https://www.protehnology.ru/news/ultrazvukovaya-otmyvka.-voprosy-i-otvety-faq>
18. Mahvi A.H. Application of Ultrasonic Technology for Water and Wastewater Treatment / Mahvi. // J. Public Health. – 2009. – №38. – С. 16.
19. Ken Yamamoto. Inactivation of Algae and Plankton by Ultrasonic Cavitation / Ken Yamamoto. // Sustainability. – 2021. – №6769. – С. 12.

20.Reza Mohammadi. Transesterification of waste edible oils to biodiesel using calcium oxide@magnesium oxide nanocatalyst / Reza Mohammadi, Hossein Esmaili. // Waste Management. – 2020. – №105. – C. 11.