

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КРАВЧЕНКО ОЛЬГА МИХАЙЛІВНА

УДК 621.7.022.6

ДИСЕРТАЦІЯ
Адаптивне просторове керування ультразвуковим очищенням виробів
складної конфігурації

151 – Автоматизація і комп'ютерно інтегровані технології
15 Автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ О.М. Кравченко

Науковий керівник – **Моркун Володимир Станіславович**, доктор технічних наук, професор

Кривий Ріг - 2023

АНОТАЦІЯ

Кравченко О.М. Адаптивне просторове керування ультразвуковим очищенням виробів складної конфігурації. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація і комп'ютерно інтегровані технології». – Криворізький національний університет МОН України, Кривий Ріг, 2023.

Представлена робота присвячена вирішенню наукової задачі розроблення й дослідження на математичних моделях та у лабораторних умовах системи автоматизованого керування ультразвуковим очищенням (УО) виробів складної конфігурації з метою підвищення його енергоефективності та якості кінцевого результату.

Метою виконаних досліджень є підвищення енергоефективності ультразвукового очищення виробів складної конфігурації за рахунок формування просторового керування на основі тримимірної нечіткої логіки із використанням оцінки перебігу процесу у заданих ділянках за лінійної та нелінійною складовими спектрального розкладу відбитого сигналу.

Об'єктом дослідження є процеси керування структурою ультразвукових випромінювачів, що розташовані у визначених позиціях, для досягнення ефективного впливу на забруднені ділянки виробу під час ультразвукового очищення.

Предмет дослідження - методи, моделі, принципи, закономірності енергоефективного керування модульною системою ультразвукових випромінювачів при ультразвуковому очищенні для перерозподілу ультразвукового тиску у ділянки із найбільшим забрудненням на базі тривимірної нечіткої моделі процесу ультразвукового очищення із спектральною оцінкою стану перебігу очищення.

При виконанні досліджень враховано відсутність адекватних математичних моделей процесу очищення, відсутність даних про конфігурацію обладнання та характеристик щодо ступеню та рівномірності його забрудненості та хімічних властивостей частинок забруднення після відшаровування знаходиться у рідині у зваженому стані. За таких умов розроблено комплекс науково-технічних рішень, який дозволяє знизити витрати енергії за рахунок цілеспрямованої обробки ділянок, які є найбільш забрудненими.

У *першому розділі* на основі огляду літературних джерел проаналізовано процес ультразвукового очищення та визначені невирішені питання в цій сфері.

Проаналізовано вплив різних факторів, що дозволяють оптимізувати процес очищення та виявлено, що автоматизація процесу є одним з напрямів підвищення його ефективності. Найбільш критичним є відсутність засобів, що дозволяють формувати керування ультразвуковим очищенням за станом очищуваного виробу.

Для подальшої роботи щодо розробки методу оцінювання стану перебігу очищення проаналізовано системи моделювання та розповсюдження ультразвукових хвиль у гетерогенному середовищі. Враховуючи масштабність обчислень при ультразвуковому очищенні обрано систему із достатньою точністю за прийнятних часових інтервалів.

Відсутність математичної моделі процесу очищення та опису його основної рушійної сили та необхідність врахування просторової розподіленості процесу, як запоруки його майбутньої якості (відсутність повторної обробки вже чистих ділянок є однією із складових зменшення енерговитрат) стали викликом для побудови ефективної системи керування. Різноманітність форм очищуваних виробів обмежила використання машинного навчання. Вирішенням цієї проблеми стало застосування тривимірної нечіткої логіки, яка за своєю суттю створена для контролю за просторово розподіленими процесами.

Досліджено методи оцінювання механічних властивостей обладнання із використанням аналізу ультразвукових відгуків. Виявлено, що, окрім лінійної складової, значну роль для визначення щільності, наявності пошкоджень, відіграють коефіцієнти нелінійності другого та третього порядків.

Досліджено можливості застосування спрямованого ультразвукового впливу із використанням технології фазованої решітки, як керуючої дії автоматизованої системи.

У *другому розділі* розглянуто побудову моделей ультразвукового очищення для різних за фізичною суттю випадків (очищення із зменшенням густини забруднення та зменшенням його товщини) та для виробів різної конфігурації з метою визначення основних закономірностей зміни ультразвукового відгуку при зменшенні забруднення виробу. Виявлено, що при очищенні виробу спостерігається змінення часу надходження сигналу, а також максимальної амплітуди та кількості значних амплітудних відхилень. Так, для випадку моделювання очищення шляхом зменшення товщини забруднення простежується стабільне зростання часу надходження сигналу. Змінення максимальної та мінімальної амплітуд не мають постійно зростаючого характеру, але найбільше значення набувають саме для очищеного виробу. Подібна ситуація із кількістю значних амплітудних відхилень, їхня кількість для повністю очищеного виробу мінімальна, але зменшення відбувається стрибкоподібно. Для очищення шляхом зменшення густини забруднення час зростає лише для повністю очищеного виробу, ситуація з амплітудою сигналу подібна до очищення із зменшенням товщини забруднення. При дослідженні впливу конфігурації виробу на ультразвукові відгуки в процесі виявлено, що наявність отворів може змінити загальну тенденцію щодо максимізації амплітуди та зменшення значних дисперсійних відхилень сигналу. Також було змодельовано очищення у просторі та доведено максимальний вплив зменшення забруднення ділянки на ультразвукові відгуки найближчого до неї датчика.

Розроблено метод формування оцінки стану перебігу ультразвукового очищення заданої ділянки із використанням спектрального розкладу за допомогою швидкого перетворення Фур'є.

Згідно аналітичних розрахунків інтенсивність, що буде відбита виробом та повернеться на датчик, із врахуванням наявності зважених частинок у рідині буде істотно залежати від товщини забруднення, концентрації забруднення в рідині та

розподілу частинок за розмірами. Для формування ефективного керування ультразвуковим очищенням із оцінкою стану на основі ультразвукових відгуків було визначено два параметра: ступінь очищення виробу, тобто наскільки процес наближено до фінальної стадії, та інтенсивність відшаровування бруду на заданій ділянці. Першим параметром стала зміна у часі надходження граничного значення сигналу, а другим – зміна у коефіцієнті нелінійності другого порядку.

Проведене моделювання для виробів різної конфігурації із аналізом зміни даних параметрів в процесі очищення продемонструвало ефективність запропонованого методу.

Третій розділ присвячено розробці системи ефективного просторового керування на основі нечіткої логіки. Для поєднання переваг таких розширень нечіткої логіки як тривимірна (дозволяє обробляти просторову інформацію) та інтервальна (добре працює з інформацією, яка не має чіткої експертної оцінки) був розроблений контролер на базі тривимірної нечіткої інтервальної логіки. В його основі знаходиться нечітка множина, що має інтервальну функцію приналежності та додаткову просторову координату.

Алгоритм роботи контролера складається з традиційних операцій фазифікацій, формування виводу та дефазифікації шляхом розширення на другому етапі за рахунок просторового об'єднання інформації та зменшення розмірності.

Для збільшення можливостей цілеспрямованого формування керуючої дії у заданому напрямку було виконано дослідження та розроблено систему очищення із використанням в якості виконуючих механізмів модульних структур, побудованих за технологією ультразвукової фазованої решітки. Були виявлені оптимальні інтервали для керуючих параметрів ультразвукової фазованої решітки перетворювачів, досліджені взаємозалежності азимутного та зенітних кутів, визначено вплив кількості комірок та їх розташування на формування променя. Також був розроблений алгоритм визначення керуючих параметрів для технологічної ємності за співвідношенням значень інтенсивностей

ультразвукових випромінювачів, що отримані за допомогою тривимірного нечіткого інтервального контролера.

В *четвертому розділі* розроблено алгоритм формування ефективного просторового керування процесом УО із використанням ультразвукових сенсорів для визначення ефективності перебігу очищення на окремих ділянках. На основі цього алгоритму розроблено програмне забезпечення, за допомогою якого змодельовано процес очищення із використанням різних методів обробки вхідної інформації та реалізації вихідного керуючого впливу.

Проведене моделювання ультразвукового очищення із використанням зазначеного контролера спочатку шляхом повної фіксації зміни сигналу ультразвукових відгуків через певні проміжки часу та за допомогою описаного у третьому розділі методу оцінювання стану перебігу очищення. В першому випадку економія енергії за рахунок зменшення обробки лише тих ділянок, що потребують очищення, склала 41 %, а у другому була збільшена ще на 6 %. Це свідчить, як про ефективність запропонованої системи керування ультразвуковим очищення, так і про доцільність використання методу оцінювання стану перебігу процесу очищення за аналізом ультразвукових відгуків. Також проведено моделювання із використанням ультразвукових фазованої решітки в якості виконуючих елементів. Збільшення сумарного акустичного тиску в зоні забруднення склало 40 % порівняно із використанням звичайних ультразвукових випромінювачів. При розробці тестового зразка визначено залежність для функції належності вхідних даних та фізичних параметрів ультразвукової ванни експериментальним шляхом. Програмне забезпечення розроблено із використанням пакетів прикладних програм MATLAB та k-Wave .

Розроблені в дисертації методи ультразвукового контролю та автоматизованого просторового керування процесом очищення виробів складної конфігурації використовуються у навчальному процесі для студентів спеціальності «Автоматизація та компютерно-інтегровані технології» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, для студентів технічних спеціальностей Львівського національного університету імені

Івана Франка та для студентів спеціальності 174 «Автоматизація, компютерно-інтегровані технології та робототехніка» Криворізького національного університету.

Ключові слова: ультразвук, системи керування, ультразвукові вимірювання, просторове керування, нечітка логіка, моделювання, фазована решітка, ультразвукове очищення, просторово розподілені системи.

Список публікацій здобувача: Основні положення та результати дисертації опубліковано в таких працях:

Статті в наукових періодичних виданнях інших держав або України, які включені в міжнародні наукометричні бази:

1. Morkun V., Kravchenko O. Evaluation of ultrasonic cleaning process. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. Vol. 3. P. 117-123. (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази Scopus). DOI: 10.33271/nvngu/2021-3/117.

2. Morkun V., Kravchenko O. Three-Dimensional Fuzzy Control of Ultrasonic Cleaning. *Acta Mechanica et Automatic*. 2021. Vol. 15(3), P. 169-176. DOI: 10.2478/ama-2021-0022. (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази Scopus та Web of Science).

3. Morkun V., Kravchenko O. Spatial control over ultrasonic cleaning of mining equipment using a phased array technology. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2022. Vol. 2. P. 31-36. DOI: 10.33271/nvngu/2021-3/117. (Входить до переліку міжнародної наукометричної бази Scopus).

Статті в наукових фахових виданнях

4. Моркун В. С., Кравченко О.М. Основні напрямки вдосконалення керування процесом ультразвукового очищення. – *Кривий Ріг: Вісник Криворізького національного університету*. 2019. Вип.49. С. 3-9. DOI: 10.31721/2306-5451-2019-1-49-3-9.

5. Моркун В.С., Кравченко О.М. Моделювання процесу очищення виробів складної конфігурації високоенергетичним ультразвуком, – *Кривий Ріг:*

Вісник Криворізького національного університету. 2020. Вип. 50. С. 62-68. DOI: 10.31721/2306-5451-2020-1-50-62-68.

6. Моркун В.С., Кравченко О.М. Моделювання параметрів ультразвукового поля в процесі очищення виробів складної конфігурації, – *Кривий Ріг: Гірничий вісник*. 2020. Вип. 107. С. 3-10. DOI: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-3-11.

7. Кравченко О.М. Дослідження параметрів функцій належності тривимірного інтервального нечіткого контролера для ультразвукового очищення, – *Кривий Ріг: Вісник Криворізького національного університету*. 2022. Вип. 54. С. 173-179. DOI: 10.31721/2306-5451-2022-1-54-173-178.

Статті та тези в виданнях конференцій

8. Kravchenko O.M., Morkun V.S., Holiver N.O. *Enhancement of the ultrasonic cleaning process control*. Widening our horizons. The 15th International Forum for Students and Young Researchers. Dnipro. 2020. P. 167-171.

9. Моркун В.С., Кравченко О.М. Оптимізація керування процесом ультразвукового очищення гірничого обладнання. *Матеріали XIV міжнародної науково-практичної конференції «Українська школа гірничої інженерії»*. Бердянськ. 2020. С. 3-4.

10. Morkun V., Kravchenko O. Adaptive control over ultrasonic cleaning of mining equipment. *Ukrainian School of Mining Engineering – 2020. E3S Web of Conferences* 201.2020. 01005. DOI: 10.1051/e3sconf/202020101005. (Scopus-конференція)

11. Моркун В.С., Кравченко О.М. Моделювання процесу очищення виробів складної конфігурації високоенергетичним ультразвуком. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток промисловості та суспільства»*. *Кривий Ріг*. 2020. С. 231.

12. Morkun, V., Kravchenko, O. Spatial ultrasonic cleaning process control based on its current state evaluation. Second International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2021), (280),2021.07016. DOI: 10.1051/e3sconf/202128007016 (Scopus-конференція)

ABSTRACT

Olha Kravchenko. Adaptive spatial control of ultrasonic cleaning of products of complex configuration. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Thesis for a Doctor of Philosophy degree (Specialty 151 Automation and computer-integrated technologies). – Kryvyi Rih National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kryvyi Rih, 2023.

The presented work is dedicated to the solution of the scientific problem of development and research on mathematical models and in the laboratory of the system of automated control of ultrasonic cleaning (UC) of products of complex configuration in order to increase its energy efficiency and the quality of the final result.

The purpose of the performed research is to increase the energy efficiency of ultrasonic cleaning of products with a complex configuration due to the formation of spatial control based on three-dimensional fuzzy logic using the assessment of the course of the process in the given areas according to the linear and non-linear components of the spectral distribution of the reflected signal.

The object of the study is the process of controlling the structure of ultrasonic emitters, located in certain positions, in order to achieve an effective impact on the contamination of the product area during ultrasonic cleaning.

The subject of the research is methods, models, principles, regularities of energy-efficient control of a modular system of ultrasonic emitters during ultrasonic cleaning to redistribute ultrasonic pressure to areas with the greatest contamination based on a three-dimensional fuzzy model of the ultrasonic cleaning process with a spectral assessment of the cleaning progress.

The lack of adequate mathematical models of the cleaning process, the lack of data on the configuration of the equipment and characteristics regarding the degree and uniformity of its contamination and the chemical properties of the particles of contamination after exfoliation are taken into account when performing the research. Under such conditions, a complex of scientific and technical solutions has been

developed, which allows to reduce energy consumption due to targeted treatment of the areas that are the most polluted.

In the *first section*, based on a review of literary sources, the process of ultrasonic cleaning is analyzed and unresolved issues in this area are identified.

The influence of various factors allowing to optimize the cleaning process was analyzed and it was found that the automation of the process is one of the ways to increase its efficiency. The most critical thing is the lack of means that allow shaping control of ultrasonic cleaning according to the condition of the cleaned product.

For further work on the development of a method for assessing the state of the cleaning process, the systems of modeling and propagation of ultrasonic waves in a heterogeneous environment were analyzed. Taking into account the scale of calculations during ultrasonic cleaning, a system with sufficient accuracy at acceptable time intervals was chosen.

The lack of a mathematical model of the cleaning process and a description of its main driving force and the need to take into account the spatial distribution of the process as a guarantee of its future quality (the lack of reprocessing of already clean areas is one of the components of reducing energy consumption) became a challenge for building an effective control system. The variety of shapes of cleaned products has limited the use of machine learning. The solution to this problem was the use of three-dimensional fuzzy logic, which is inherently designed to control spatially distributed processes.

The methods of evaluating the mechanical properties of the equipment using the analysis of ultrasonic responses were studied. It was found that, in addition to the linear component, nonlinearity coefficients of the second and third orders play a significant role in determining the density and the presence of damage.

The possibility of applying directional ultrasonic impact using phased array technology as a control action of an automated system has been studied.

In the *second section*, the construction of ultrasonic cleaning models for different physical cases (cleaning with a decrease in the density of pollution and a decrease in its thickness) and for products of different configurations is considered in order to

determine the main patterns of changes in the ultrasonic response when the pollution of the product is reduced. It was found that when the product is cleaned, there is a change in the signal arrival time, as well as the maximum amplitude and the number of significant amplitude deviations. Thus, for the case of simulation of cleaning by reducing the thickness of contamination, a stable increase in the signal arrival time can be observed. Changes in the maximum and minimum amplitudes do not have a constantly increasing character, but they acquire the greatest importance precisely for the cleaned product. The situation is similar with the number of significant amplitude deviations, their number for a completely cleaned product is minimal, but the decrease occurs in leaps and bounds. For cleaning by reducing the thickness of contamination, the time increases only for a completely cleaned product, the situation with the signal amplitude is similar to cleaning with a reduction in the thickness of the contamination. When investigating the effect of the product configuration on the ultrasonic responses in the process, it was found that the presence of holes can change the general tendency to maximize the amplitude and reduce significant dispersion deviations of the signal. It was also possible cleaning in space was carried out and the maximum effect of reducing the pollution of the area on the ultrasonic responses of the sensor closest to it was proved.

A method of forming an assessment of the state of the course of ultrasonic cleaning of a given area using a spectral decomposition by means of a fast Fourier transformation has been developed.

According to analytical calculations, the intensity that will be reflected by the product and returned to the sensor, taking into account the presence of suspended particles in the liquid, will significantly depend on the thickness of the pollution, the concentration of pollution in the liquid and the size distribution of the particles. In order to form effective management of ultrasonic cleaning with condition assessment based on ultrasonic responses, two parameters were determined: the degree of cleaning of the product, i.e. how close the process is to the final stage, and the intensity of dirt removal in a given area. The first parameter was the change in the arrival time of the limit value of the signal, and the second was the change in the coefficient of nonlinearity of the

second order.

The conducted modeling for products of different configurations with the analysis of changes in these parameters during the cleaning process demonstrated the effectiveness of the proposed method.

The *third section* is devoted to the development of an efficient spatial control system based on fuzzy logic. To combine the advantages of such extensions of fuzzy logic as three-dimensional (allows to process spatial information) and interval (works well with information that does not have a clear expert evaluation), a controller based on three-dimensional fuzzy interval logic was developed. It is based on a fuzzy set that has an interval membership function and an additional spatial coordinate.

The controller's work algorithm consists of traditional operations of fuzzification, output formation and defuzzification through expansion at the second stage due to spatial unification of information and dimensionality reduction.

In order to increase the possibilities of purposeful formation of control action in a given direction, a study was carried out and a cleaning system was developed, using modular structures built according to the technology of ultrasonic phased array as executive mechanisms. The optimal intervals for the control parameters of the ultrasonic phased array of transducers were identified, the interdependencies of the azimuth and zenith angles were investigated, and the influence of the number of cells and their location on beam formation was determined. An algorithm was also developed to determine the control parameters for the technological capacity based on the ratio of the values of the intensities of the ultrasonic emitters obtained with the help of a three-dimensional fuzzy interval controller.

In the *fourth section*, an algorithm for the formation of effective spatial control of the UC process was developed using ultrasonic sensors to determine the efficiency of the cleaning process in individual areas. On the basis of this algorithm, software was developed, with the help of which the cleaning process was simulated using various methods of processing input information and implementing the output control influence.

Simulation of ultrasonic cleaning was carried out using the specified controller, first by completely fixing the change in the signal of ultrasonic responses after certain

time intervals and using the method of evaluating the state of the cleaning progress described in the third section. In the first case, the energy savings due to the reduction of processing of only those areas that need cleaning amounted to 41 %, and in the second it was increased by another 6 %. This testifies both to the effectiveness of the proposed ultrasonic cleaning control system and to the expediency of using the method of evaluating the state of the cleaning process by analyzing ultrasonic responses. Simulations were also carried out using ultrasonic phased arrays as performing elements. The increase in the total acoustic pressure in the pollution zone was 40 % compared to the use of conventional ultrasonic emitters. During the development of the test sample, the dependency for the function of belongingness of the input data and the physical parameters of the ultrasonic bath was determined experimentally. The software was developed using the MATLAB and k-Wave application packages.

The methods of ultrasonic control and automated spatial control of the cleaning process of products of complex configuration, developed in the dissertation, are used in the educational process for students of the "Automation and computer-integrated technologies" specialty of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, for students of technical specialties of the Ivan Franko Lviv National University and for students of specialty 174 Automation, computer-integrated technologies and robotics of Kryvyi Rih National University.

Keywords: ultrasound, control system, ultrasonic measurements, spatial control, fuzzy logic, model, ultrasonic phased array, ultrasonic cleaning, spatially distributed systems.

List of publications of the applicant: The main provisions and results of the dissertation are published in the following works:

Articles in scientific periodicals of other states or Ukraine, which are included in international scientometric databases

1. Morkun V., Kravchenko O. Evaluation of ultrasonic cleaning process. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. Vol. 3. P. 117-123. (Included in the list of international scientometric database Scopus). DOI: 10.33271/nvngu/2021-3/117.

2. Morkun V., Kravchenko O. Three-Dimensional Fuzzy Control of Ultrasonic Cleaning. *Acta Mechanica et Automatica*. 2021. Vol. 15(3), P. 169-176. DOI: 10.2478/ama-2021-0022. (Included in the list of international scientometric database Scopus and Web of Science).

3. Morkun V., Kravchenko O. Spatial control over ultrasonic cleaning of mining equipment using a phased array technology. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2022. Vol. 2. P. 31-36. DOI: 10.33271/nvngu/2021-3/117. (Included in the list of international scientometric database Scopus).

Articles in scientific professional publications

4. Morkun V., Kravchenko O. The main directions of improvement of control of the ultrasonic cleaning process. Bulletin of Kryvyi Rig National University: coll. Sciences. work. Kriviy Rig, 2019. Issue 49. P. 3-9. DOI: 10.31721/2306-5451-2019-1-49-3-9.

5. Morkun V., Kravchenko O. Modeling the process of cleaning products of complex configuration with high-energy ultrasound. Bulletin of Kryvyi Rig National University: coll. Sciences. work. Kriviy Rig, 2020. Issue 50. P. 62-68. DOI: 10.31721/2306-5451-2020-1-50-62-68.

6. Morkun V., Kravchenko O. Simulation of ultrasonic field parameters in the process of cleaning products of complex configuration. Mining journal of Kryvyi Rig National University. 2020. Issue. 107. P. 3-10. DOI: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-3-11.

7. Kravchenko O. Study of membership function parameters of three-dimensional interval fuzzy controller for ultrasonic cleaning. Bulletin of Kryvyi Rig National University: coll. Sciences. work. Kriviy Rig, 2022. Issue 54. P. 173-179. DOI: 10.31721/2306-5451-2022-1-54-173-178.

Articles and abstracts in conference publications

8. Kravchenko O.M., Morkun V.S., Holiver N.O. *Enhancement of the ultrasonic cleaning process control*. Widening our horizons. The 15th International Forum for Students and Young Researchers. Dnipro. 2020. P. 167-171.

9. Morkun V., Kravchenko O. Optimization of control of the process of ultrasonic cleaning of mining equipment. Materials of the International Scientific and Practical Conference "Ukrainian School of Mining Engineering". Berdyansk. 2020. P. 3-4.

10. Morkun V., Kravchenko O. Adaptive control over ultrasonic cleaning of mining equipment. *Ukrainian School of Mining Engineering – 2020. E3S Web of Conferences* 201.2020. 01005. DOI: 10.1051/e3sconf/202020101005

11. Morkun V., Kravchenko O. Modeling the process of cleaning products of complex configuration with high-energy ultrasound. Materials of the International Scientific and Technical Conference "Development of Industry and Society". Kryvyi Rih. 2020. P. 231.

12. Morkun, V., Kravchenko, O. Spatial ultrasonic cleaning process control based on its current state evaluation. Second International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2021), (280),2021.07016. DOI: 10.1051/e3sconf/202128007016.

ЗМІСТ

Вступ	19
Розділ 1. Дослідження проблеми підвищення ефективності ультразвукового очищення з позиції енергозбереження	27
1.1 Основні напрямки удосконалення керування і підвищення ефективності ультразвукового очищення.....	27
1.2 Огляд наявних систем моделювання розповсюдження ультразвукових хвиль в гетерогенному середовищі та аналіз можливості їхнього застосування при симуляції ультразвукового очищення	35
1.3 Аналіз наявних методів оцінювання перебігу процесу очищення	45
1.4 Аналіз застосування немодельних методів керування до просторово розподілених процесів	50
1.5 Огляд та аналіз наявних ультразвукових технологій для формування спрямованого впливу	53
Висновки до розділу 1	57
Розділ 2. Дослідження і моделювання процесу ультразвукового очищення виробів складної конфігурації	59
2.1 Основні задачі моделювання ультразвукового очищення та засоби, що дозволяють їх досягти.....	59
2.2 Розповсюдження ультразвукових хвиль у гетерогенному середовищі при ультразвуковому очищенні	64
2.3 Дослідження параметрів ультразвукових відгуків при різних характеристиках забруднення та очищуваного виробу в процесі ультразвукового очищення	68
2.4 Дослідження наявності впливу зважених частинок забруднення у рідині на процес очищення.....	83

2.5	Формування методики оцінювання перебігу процесу ультразвукового очищення із урахуванням стану забрудненого об'єкта та очищувальної рідини	89
	Висновок до розділу 2.....	101
	Розділ 3. Просторове нечітке керування процесом ультразвукового очищення	103
3.1	Особливості тривимірної нечіткої логіки та нечіткої інтервальної логіки типу 2	103
3.2	Тривимірна інтервальна нечітка множина типу 2 та визначення основних операцій на ній.....	107
3.3	Розробка контролера на базі тривимірної інтервальної нечіткої множини типу 2 для системи ультразвукового очищення.....	110
3.4	Дослідження параметрів ультразвукових фазованих решіток для формування просторового керування процесом ультразвукового очищення.....	117
3.5	Методика керування ультразвуковим очищенням із використанням фазованої решітки	124
	Висновки до розділу 3.....	131
	Розділ 4. Розробка та апробація ефективної системи просторового керування ультразвуковим очищенням на базі тривимірної нечіткої логіки.....	133
4.1	Структура автоматизованої системи просторового керування ультразвуковим очищенням.....	133
4.2	Формування керування ультразвуковим очищенням на основі тривимірного нечіткого інтервального контролера.....	136
4.3	Аналіз використання оцінювання стану перебігу ультразвукового очищення у системі керування	144
4.4	Оцінка використання ультразвукових фазованих решіток для формування виконуючих впливів.....	149

4.5	Визначення впливу параметрів функції належності на ефективність процесу очищення	153
4.6	Узагальнений аналіз адекватності моделі ультразвукового очищення на основі тривимірної нечіткої логіки.....	156
	Висновок до розділу 4.....	160
	Висновки.....	162
	Список використаних джерел	164
	Додаток А	178
	Додаток Б.....	187
	Додаток В	192
	Додаток Д	206
	Додаток Е.....	207
	Додаток Ж.....	208
	Додаток З	209

ВСТУП

Обґрунтування напряду досліджень. Проблема раціонального використання енергоресурсів особливо важлива в умовах останніх тенденції підвищення цін на пальне та електроенергію. Для видобувної промисловості характерна підвищена забрудненість технологічних процесів. Це має негативний вплив не лише на здоров'я працівників, але й на експлуатацію виробничого устаткування. Своєчасне якісне очищення таких конструктивних елементів, як складові двигунів спецтранспорту для кар'єра, фільтри багаторазового використання, насоси, гальмівні механізми тощо не лише надає змогу проводити поточні ремонти, але й подовжує термін їхньої експлуатації та знижує час простоїв. У промисловості використовуються різні способи очищення в залежності від поставлених вимог. Серед них хімічне очищення, недоліком якого є використання шкідливих розчинників, механічне та ручне очищення, для яких характерна важка людська праця. Ультразвукове очищення (УО), на відміну від вищезгаданих методів, не має цих недоліків, до того ж демонструє високу якість, тому є одним із найперспективніших видів очищення. Так при простому прополіскуванні на поверхні деталі залишається до 80 % забруднення, при вібраційному очищенні – 50 %, при ручному – до 20 %, а при ультразвуковому – 0,5 %. До того ж ультразвукове очищення ефективно для виробів складної конфігурації, що мають внутрішні колектори, отвори тощо. Ультразвукове очищення добре зарекомендувало себе у машинобудуванні, приладобудуванні, ювелірній промисловості, полімерній галузі, медицині. Постійно відбувається застосування ультразвукового очищення: від тонкого бактеріального очищення до очищення великогабаритних деталей.

Але керування процесом ультразвукового очищення на сьогодні у більшості випадків обмежене лише часовим показником, який визначається експертною оцінкою оператора. Це призводить до того, що тривалість обробки виробу ультразвуком може бути завищена та не пов'язана із його реальним забрудненням, що, в свою чергу, призводить до перевитрат енергії та збільшення

часових витрат. Окрім цього зайвий час обробки ультразвуком виробів може призвести до корозійних пошкоджень.

Отже, ультразвукове очищення має потенціал для підвищення енергоефективності та якості кінцевого результату шляхом впровадження автоматизованої системи керування із врахуванням інтенсивності очищення на заданих ділянках.

Для ґрунтовного аналізу та з'ясування питань щодо ефективності наявних систем керування ультразвуковим очищенням уже традиційно вивчаються праці вітчизняних і зарубіжних учених щодо застосування ультразвуку у промисловості в цілому та у процесі очищення: Abedib E., Ando K., Busayaporn W., Gan T.P., Habiba L. P., Hashemi S. M., Lowe S., Marszałek K., Saalbach K.A., Tangsopha W., Thongsri, J., Twiefel J.L., Roohia R., Wrobel C., Wallasche J., Yamashita T., Агранат Б.А., Колос А.А., Моркун В.С., Розенберг Л.Д., та інших.

Керування ультразвуковим очищенням ускладнюється тим, що процес має просторово розподілений характер з основною рушійною силою – кавітацією, яка на даний момент не має точного математичного опису і визначається аналітично через хвильове рівняння акустичного тиску. Тому для формування ефективного управління необхідно використовувати сучасні немодельні методи, що дозволяють ефективно обробляти просторову інформацію.

Таким чином, наукова задача дисертації полягає в дослідженні і розробці принципів, структури та системи енергоефективного адаптивного керування ультразвуковим очищенням з урахуванням просторової розподіленості процесу з використанням оцінювання стану перебігу на заданих ділянках з метою підвищення енергоефективності та якості кінцевого результату.

Зв'язок роботи з науковими програмами та планами. Робота виконана у Криворізькому національному університеті та є складовою держбюджетних НДР 30-108-18 «Визначення закономірностей поширення високоенергетичного ультразвуку у неоднорідних середовищах для оптимізації процесів збагачення залізної руди» (держреєстрація № 0118U000119).

Результати дисертаційної роботи спрямовані на вирішення головних завдань, поставлених в «Енергетична стратегія України на період до 2030 року», розпорядження Кабінету Міністрів України від 15 березня 2006 р. No 145, і в галузевих програмах, направлених на зниження енергоємності продукції за рахунок розробки і впровадження прогресивних енергозберігаючих технологій та устаткування, підвищення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів, оптимізації структури споживання, збільшення використання альтернативних видів палива, зокрема вторинних енергоресурсів, нетрадиційних джерел енергії.

Мета та завдання дослідження. *Метою виконаних досліджень є підвищення енергоефективності ультразвукового очищення виробів складної конфігурації за рахунок формування просторового керування на основі тривимірної нечіткої логіки із використанням оцінки перебігу процесу у заданих ділянках за лінійної та нелінійною складовими спектрального розкладу відбитого сигналу.*

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно розв'язати наступні основні завдання:

- виконати аналіз наукових джерел з питання шляхів підвищення ефективності ультразвукового очищенням та проаналізувати особливості методів оцінювання перебігу очищення для подальшої побудови ефективної просторової системи керування процесом ультразвукового очищення;
- виявити і формалізувати основні закономірності процесу ультразвукового очищення шляхом моделювання для формування основних принципів як оцінювання інтенсивності перебігу процесу очищення, так і формування розподіленого керування та розробити метод оцінювання перебігу процесу ультразвукового очищення шляхом аналізу ультразвукових відгуків із застосуванням спектрального аналізу та виокремлення лінійної і нелінійної складових із наступним формуванням нечіткої бази правил;

- розробити принципи формування енергоефективного адаптивного тривимірного нечіткого керування з використанням інтервальної функції належності вхідних параметрів для врахування просторових особливостей процесу очищення із використанням методу оцінювання перебігу процесу ультразвукового очищення із застосуванням спектрального аналізу та виокремлення лінійної і нелінійної складових;

- розробити автоматизовану систему ефективного керування процесом ультразвукового очищення із використанням виконаних досліджень та практичні заходи з її реалізації.

Об'єктом дослідження є процеси керування структурою ультразвукових випромінювачів, що розташовані у визначених позиціях, для досягнення ефективного впливу на забрудненні ділянки виробу під час ультразвукового очищення.

Предметом дослідження є методи, моделі, принципи, закономірності енергоефективного керування модульною системою ультразвукових випромінювачів при ультразвуковому очищенні для перерозподілу ультразвукового тиску у ділянки із найбільшим забрудненням на базі тривимірної нечіткої моделі процесу ультразвукового очищення із спектральною оцінкою стану перебігу очищення.

Методи дослідження:

- аналіз вітчизняного та закордонного досвіду, систематизація існуючих підходів та методів до оптимізації керування ультразвуковим очищенням за критерієм енергоефективності для обґрунтування актуальності мети та завдань дослідження;

- елементи математичного апарату нечіткої логіки для підвищення ефективності керування ультразвуковим очищенням;

- методи чисельного моделювання для синтезу та моделювання математичної моделі ефективної системи просторового керування;

- комп'ютерні інформаційні та програмні технології для реалізації розробленого алгоритму ефективного керування у вигляді програмного забезпечення;

- аналітичні геометричні методи для розробки методу спрямування ультразвукового променя.

Обґрунтування і достовірність отриманих результатів, наукових положень і висновків підтверджується тим, що в роботі використовуються апробовані фундаментальні положення теорії автоматичного оптимального керування, математичної теорії нечіткої логіки та фізики очищувальних процесів, а також задовільної відповідності результатів аналітичних та експериментальних досліджень, позитивними результатами апробації розроблених засобів оцінювання та керування. Аналіз адекватності моделі ультразвукового очищення підтверджується за критерієм Фішера, який показав однорідність оцінок дисперсії відтворюваності, де розрахункове значення критерію Фішера для 5 проведених дослідів в середньому $F_{\text{розрах}}=4,223$ більше ніж табличне $F_{\text{табл}} = 2,8$, що свідчить про надійність обчислення кореляційної матриці, чисельного моделювання на ЕОМ і експериментальних випробувань на лабораторному апаратно-програмному комплексі при виконанні розрахунків і досліджень із використанням загальновизнаних пакетів прикладних програм.

Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше розроблено метод оцінювання перебігу процесу ультразвукового очищення, а саме зміни стану виробів складної конфігурації шляхом аналізу зміни часу досягнення граничного значення інтенсивності та визначеного на основі спектрального розкладу коефіцієнту нелінійності другого порядку відзеркаленого від поверхні виробу зондуючого ультразвукового сигналу, який на відміну від відомих, дозволяє сформулювати оцінку якості очищення не опосередковано за станом рідини в якій занурено очищуваний виріб, а безпосередньо на відповідних ділянках його поверхні для цілеспрямованого перерозподілу інтенсивності

очищувальних впливів у зону із максимальним відшаровуванням забруднення та за рахунок цього забезпечує зменшення енерговитрат на 6 %.

2. Отримав подальший розвиток підхід щодо керування просторово розподіленими процесами ультразвукового очищення в умовах неповної та нечіткої вхідної інформації шляхом розширення базової тривимірної нечіткої множини до тривимірної нечіткої інтервальної множини другого типу, що надало змогу при формуванні параметрів ультразвукових впливів врахувати просторову розподіленість процесу, незалежно від геометрії очищуваної поверхні.

3. Вперше розроблено метод керування просторово розподіленими випромінювачами ультразвуку в процесі очищення виробів, який включає аналіз перебігу цього процесу на визначених ділянках їх поверхні із застосуванням оцінки лінійних та нелінійних параметрів відбитого від поверхні виробу зонduючого ультразвукового сигналу та використання тривимірного нечіткого інтервального контролера другого типу для формування інтенсивності впливу кожного випромінювача, який дозволяє узгодити дії усіх випромінювачів і таким чином зменшити енерговитрати на 41 %.

4. Удосконалено метод формування параметрів впливу випромінювача ультразвуку в процесі очищення виробів із застосуванням технології ультразвукової фазованої решітки із амплітудно-фазовим керуванням її елементами, що дозволило шляхом змінення кута введення, фокусної відстані та розміру фокусної плями на поверхні очищуваних виробів динамічно корегувати інтенсивність впливу залежно від інтенсивності перебігу ультразвукового очищення відповідної ділянки поверхні.

Наукове значення роботи полягає в розробці методів енергоефективного адаптивного просторово розподіленого керування ультразвуковим очищенням з урахуванням оцінки перебігу стану процесу у визначених точках із попереднім синтезом інформації за допомогою нечіткої логіки.

Практичне значення дисертаційної роботи.

Практична цінність отриманих результатів полягає у розробці:

- алгоритмів та програм визначення оцінки перебігу процесу очищення у заданих точках;
- алгоритмічних та програмних засобів, що забезпечують формування та функціонування тривимірного нечіткого контролера на основі інтервальної множини типу 2;
- алгоритмів та програм формування енергоефективного просторово розподіленого керування процесом ультразвукового очищення.

Особистий внесок здобувача. Усі сформульовані у дисертації ідеї, наукові положення та висновки є результатом особистих досліджень автора. Здобувачем самостійно здійснено аналіз стану автоматизації ультразвукового очищення, побудована тривимірна модель процесу очищення з метою виявлення залежності між зменшенням шару забруднення та параметрами зафіксованих датчиками ультразвукових відгуків, розроблено методику оцінювання стану перебігу ультразвукового очищення на основі лінійної та нелінійної складової відгуків, розширено алгоритм тривимірного нечіткого керування для можливості обробки інформації із нечіткою інтервальною оцінкою, описано та змодельовано застосування цього алгоритму для керування ультразвуковим очищенням, вдосконалено керування шляхом переспрямування акустичного тиску із застосуванням технології ультразвукової фазованої решітки.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися на засіданнях наукового семінару кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій Криворізького національного університету (Кривий Ріг, 2019-2022 рр.), на міжнародній науково-практичній конференції «Українська школа гірничої інженерії». (Бердянськ, 2020 р.), на міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток промисловості та суспільства» (Кривий Ріг, 2020) та на Second International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2021).

Публікації. Основні положення та результати дисертації знайшли відображення у 3 статтях у періодичних наукових журналах, що індексуються у

наукометричній базі Scopus, у 4 наукових фахових виданнях та у 5 матеріалах конференцій (дві з них проіндексовані у наукометричній базі Scopus).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел зі 137 найменувань на 14 сторінках, 7 додатків на 32 сторінках. Загальний обсяг дисертації викладено на 209 сторінках друкованого тексту, з яких 137 — основний текст, містить 72 рисунки та 12 таблиць.

РОЗДІЛ 1.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОЧИЩЕННЯ З ПОЗИЦІЇ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

1.1 Основні напрямки удосконалення керування і підвищення ефективності ультразвукового очищення

Для видобувної промисловості характерна підвищена забрудненість технологічних процесів. Це має негативний вплив не лише на здоров'я працівників, але й на експлуатацію устаткування. Своєчасне якісне очищення таких конструктивних елементів, як складові двигунів спецтранспорту для кар'єра, фільтри багаторазового використання, насоси, гальмівні механізми тощо не лише надає змогу проводити поточні ремонти, але й подовжує термін їхньої експлуатації та знижує час простоїв. У промисловості використовуються різні способи очищення в залежності від поставлених вимог. Серед них хімічне очищення, недоліком якого є використання шкідливих розчинників, механічне та ручне очищення, для яких характерна важка людська праця. Ультразвукове, на відміну від вищезгаданих методів, не має цих недоліків, до того ж демонструє високу якість, тому є одним із найперспективніших видів очищення. Воно ефективно застосовується проти такого забруднення, як пил, сажа, вугілля, кокс, мінеральні та металеві частинки, тому має високу конкурентоздатність саме у видобувній галузі. Але значні розміри очищуваного обладнання та його складна конфігурація вимагають високої потужності та енерговитрат, тому підвищення ефективності ультразвукового очищення є одним із способів скоротити загальні витрати на виробництво.

З моменту відкриття ультразвукового очищення [1] його популярність лише зростає. Це, насамперед, пов'язано із високою якістю результату порівнянно із іншими методами – при простому прополіскуванні на поверхні деталі залишається до 80 % забруднення, при вібраційному очищенні – 50 %, при ручному – до 20 %,

а при ультразвуковому – 0,5 % [2]. Зараз такий тип очищення використовуються від авіа та космічної промисловості [3] до ювелірної справи [4]. Постійно пропонуються нові галузі застосування ультразвукового очищення та дослідження щодо вже існуючих. У роботі [5] досліджується методика розробки та маринізації випромінювачів для ультразвукового очищення трубопроводів на значній глибині. У праці [6] розглянуто ультразвукове очищення керамічної мембрани, що використовується для очищення стічних вод. Патент [7] пропонує очищення значних, які неможливо занурити в ультразвукову ванну. Також шириться застосування такого виду очищення і в медицині, для якої використання ультразвуку в цілому стало революційним, забезпечивши рівень чистоти, який є необхідним для цієї галузі. Стоматологічна імплантація вимагає підвищеного рівня чистоти, який краще всього і забезпечує ультразвук [8]. Для очищення титану також оптимальним вибором є ультразвук [9]. Отже, ультразвукове очищення широко застосовується у різних галузях промисловості, забезпечуючи якісний результат за прийнятний час.

Для розуміння того, як можна вдосконалити енергоефективність УО розглянемо його фізичну природу. УО забезпечується множиною фізичних явищ, що виникають під час обробки рідини ультразвуковими хвилями.

Серед них радіаційний тиск, акустичні течії та кавітація [10, 11]. При цьому найефективнішою є саме акустична кавітація [12], яка пояснюється місцевим тиском у рідині, що опускається нижче критичного тиску, який приводить в рух присутні завжди в рідині нано- та мікробульбашки, що швидко збільшуються у розмірах. Коли тиск повертається до високого значення, відбувається скорочення бульбашок, що генерує імпульси високого тиску і ударні хвилі (рис. 1.1).

При цьому внутрішня температура бульбашок досягає 3000 К, а викид ударної хвилі тиску - 6 ГПа [10]. Одним з основних параметрів, що визначає характер кавітації є частота ультразвуку, яка має суттєвий вплив на розмір бульбашки та кількість скорочень. Так при пониженні робочої частоти (20–25 кГц), бульбашка стає більшою та буде виділяти більше енергії, але при цьому зменшується кількість бульбашок [13]. Таке очищення є більш агресивним та

небезпечним і може призводити до пошкодження очищуваного виробу, але водночас є оптимальним для видалення значних за розміром частинок забруднення. На більш високих частотах (40–80 кГц) спостерігаються менші бульбашки, що здатні скорочуватися, але у більшій кількості, створюється ефект дрібного «наждачного» паперу. Очищення у такому режимі стає більш однорідним та безпечним [14].

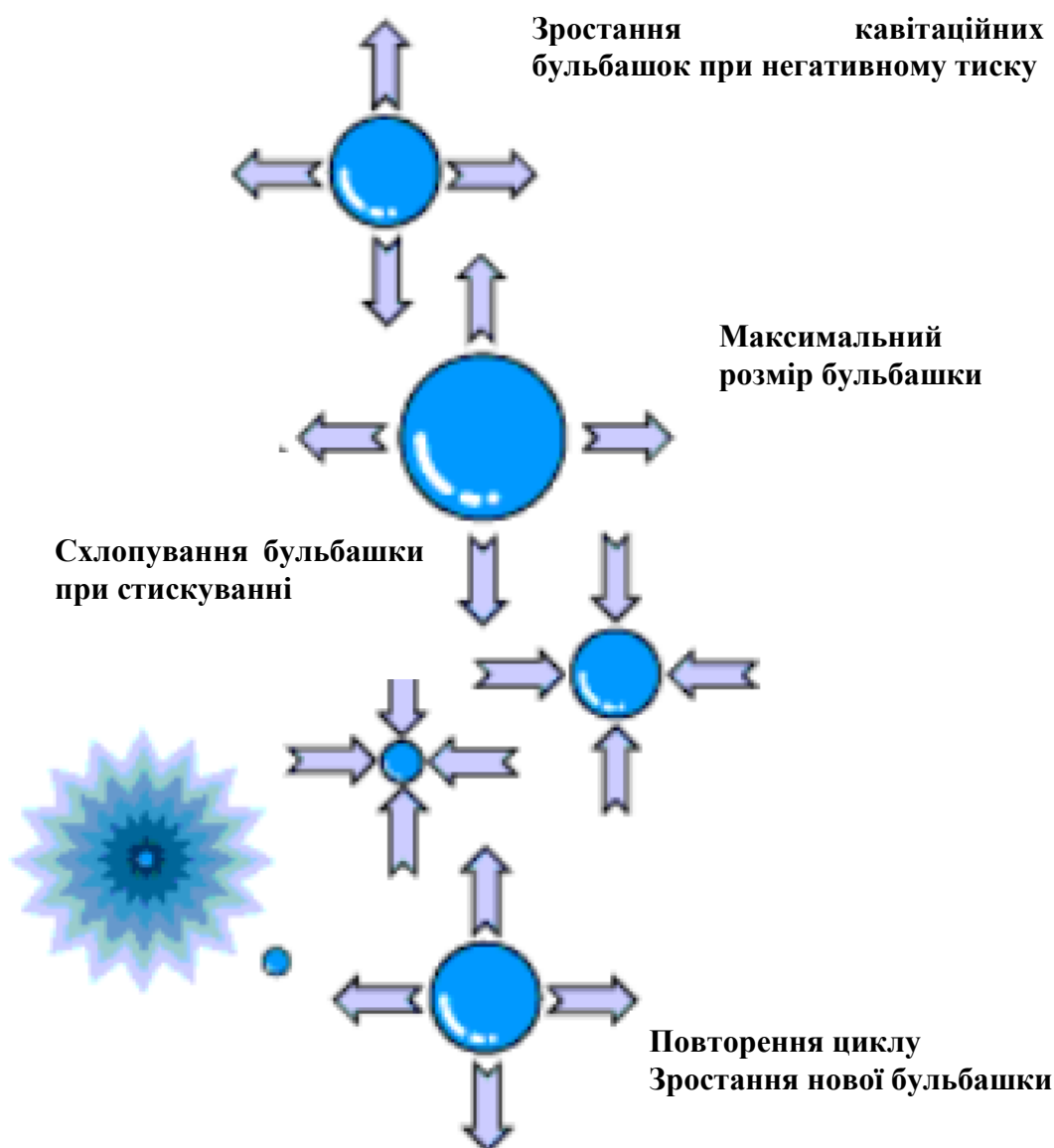


Рис. 1.1. Схематичне зображення кавітаційної бульбашки [9]

На формування кавітації, а відповідно і перебіг очищення, окрім частоти, також впливають і інші фактори: склад рідини, фізичні параметри баку,

потужність випромінення, температура рідини [15, 16]. Розглянемо більш докладно залежність ефективності очищення від кожного з них.

Склад рідини є одним з найбільш важливих факторів процесу очищення і залежить від забруднення. Також рідина повинна мати гарні кавітаційні властивості та виконувати не лише очищувальні функції, але й бути передавальним середовищем між випромінювачем та виробом [17].

Збільшення потужності випромінення не має прямого впливу на підвищення ефективності, оскільки потужність після досягнення пікового значення може викликати руйнування випромінювача або викликати кавітаційну екранізацію бульбашок, зменшуючи кількість колапсів [18].

Температура рідини впливає на кількість кавітаційних колапсів, інтенсивність та хімічну очищувальну дію. Оптимальна температура ультразвукового очищення визначається складом рідини [14].

Кавітація за своєю фізичною природою має просторовий розподіл у ємності очищення із виділенням зон високої та низької кавітаційної активності [19], тому значний вплив на очищення матимуть і геометричні показники ультразвукової ванни. У праці [4] за допомогою аналізу параметрів баку, таких як ширина, довжина та розташування випромінювачів, вдається досягти значного покращення якості процесу очищення. Отже, геометрія баку та взаємодія випромінювачів мають потенціал для підвищення ефективності УО.

Таким чином, ультразвукове очищення є складним процесом, який залежить від багатьох фізико-хімічних показників. Велика кількість впливаючих факторів обумовлює проведення досліджень щодо підвищення ефективності у різних напрямках [20].

Перший – це аналіз впливу вище розглянутих показників та знаходження їхнього оптимального значення. Так, у праці [21] проведено аналіз кількості кавітаційних бульбашок при ультразвуковому очищенні з різною концентрацією розчиненого кисню у воді та виявлено, що існує оптимальна перенасиченість газу для максимальної ефективності видалення забруднення. Ультразвукова обробка із низькою інтенсивністю при оптимальній перенасиченості газу в очищувальній

рідині дозволяє отримувати легку динаміку бульбашок без значних скорочень та очищати поверхні без кавітаційної ерозії. Таким чином підвищується ефективність та безпечність процесу очищення. В праці [22] розглянуто питання утворення різних максимумів кавітації за різних температур під час охолодження дегазованої води. В результаті дослідження зв'язку між названим явищем, частотою та потужністю ультразвуку, виявилось, що наявність декількох екстремумів кавітації пояснюється вторинним насиченням води повітрям.

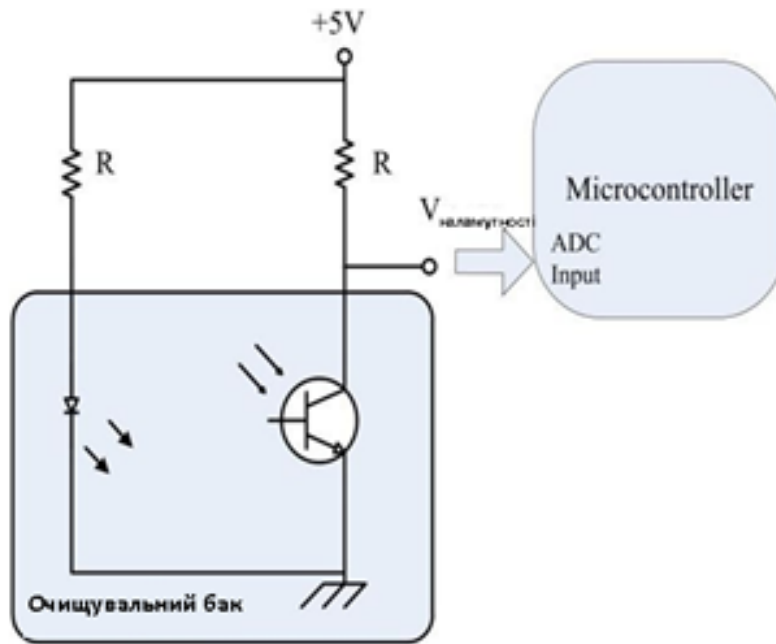
Інший напрямок досліджень стосується нових підходів до визначення ефективності ультразвукового очищення та на основі них виявлення впливу різних параметрів на його перебіг. Методи, що при цьому застосовуються, відрізняються за своєю складністю в залежності від очищуваного об'єкта. Використовується візуальний огляд, гравіметричний аналіз та вимірювання кавітаційної активності, як основного явища, що забезпечує процес ультразвукового очищення. В праці [23] розглянуто новий метод визначення присутності і рівня кавітації, який можна використовувати в умовах важкодоступності або непрозорості. На основі цього методу був виявлений тісний зв'язок розподілу кавітаційних та геометричного розташування випромінювачів. В дослідженні [24] пропонується новий метод дослідження кавітаційної активності, що базується на аналізі спектру, що продукується коливальною хвилею. За допомогою нього виявлено наступні залежності: кавітація втрачає стабільність при тривалому часі інсонації; що є більш вираженим при значній потужності; зростання вмісту газу, потужності, та додавання очищувального засобу збільшує кавітацію, але при досягненні цими параметрами певних максимумів кавітаційна діяльність знижується; при відносно великій потужності кавітаційна активність зростає зі збільшенням температури, досягає піку, а потім падає; окрім того, що ці параметри мають вплив на кавітацію, вони ще взаємозалежними: вміст газу та температура залежать від тривалості інсонації та потужності, до того ж на вміст газу впливає значення температури.

І останній підхід до підвищення ефективності ультразвукового очищення – це вдосконалення керування цим процесом та зміна технології опромінення очищуваного об'єкта.

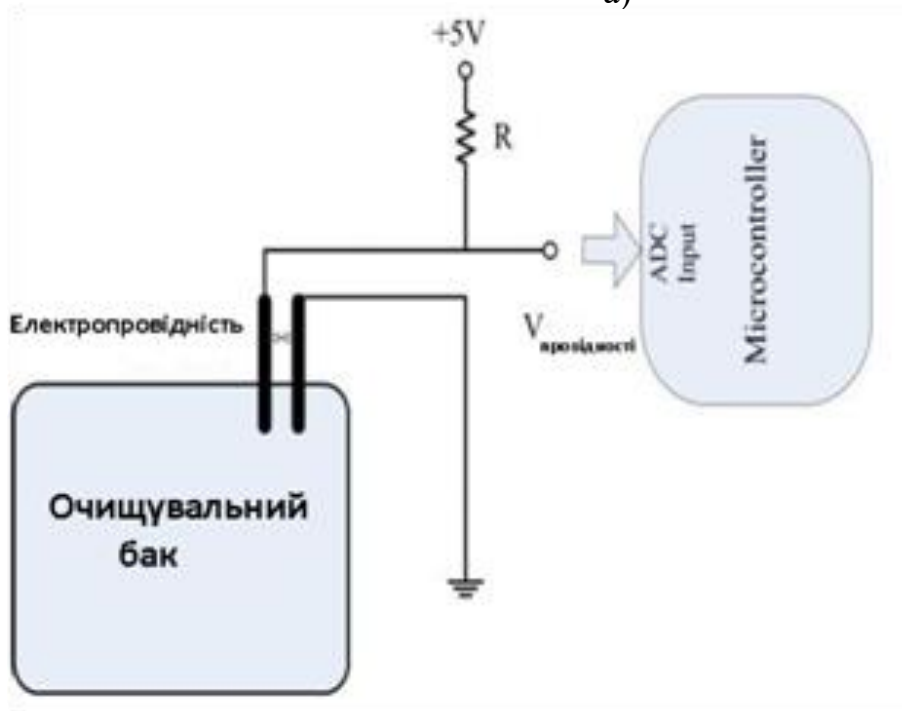
Важливим питанням залишаються вимірювання, на основі яких можна буде здійснювати керування ультразвуковим очищенням. В праці [25] пропонується оцінювати завершеність процесу очищення за допомогою ультразвукових віддзеркалень, що генеруються в середині теплообмінника або труби. Важкість у цьому випадку, пов'язана із необхідністю використовувати неінвазивне ультразвукове вимірювання. Оскільки важко у таких умовах отримати експертні оцінки, на основі яких відбудеться оцінка вимірювань, використовується згортова нейронна мережа, навчання якої засновано на основній фізичній властивості процесу: під час очищування кількість забруднення може лише зменшуватись. В лабораторних умовах підтверджено зменшення часу на ультразвукове очищення, а відповідно і енергозатрат. Такий підхід досить ефективний, якщо відбувається очищення виробів певної форми, але не придатний у загальному випадку, коли ультразвукова ванна має слугувати для виробів різноманітної конфігурації.

Більш універсальний підхід застосовано у праці [26]. Тривалість процесу очищення оцінюється за зміною електропровідності та каламутності очищувальної рідини. Розроблений та виконаний пристрій ультразвукового очищення, керування в якому базується на інформації датчиків опору очищувальної рідини, що вимірювали за допомогою металевих стрижнів (рис. 1.2 а), занурених у рідину, та оптичного датчику каламутності, інтерпретація даних якого проводилась через кількість світла, що отримана від приймача до передавача (рис. 1.2 б).

Під час експериментів отримані графіки залежності, що вказують про існуючий зв'язок між вимірюваними параметрами та процесом очищення. Процес очищення припиняється при відсутності змін каламутності та провідності (рис. 1.3).



а)



б)

Рис. 1.2. Вимірювання провідності (а) та каламутності (б) очищувальної рідини

Такий підхід значно підвищує якість керування ультразвуковим очищенням, але водночас базується на опосередкованій оцінці стану рідини, а не на стані виробу.

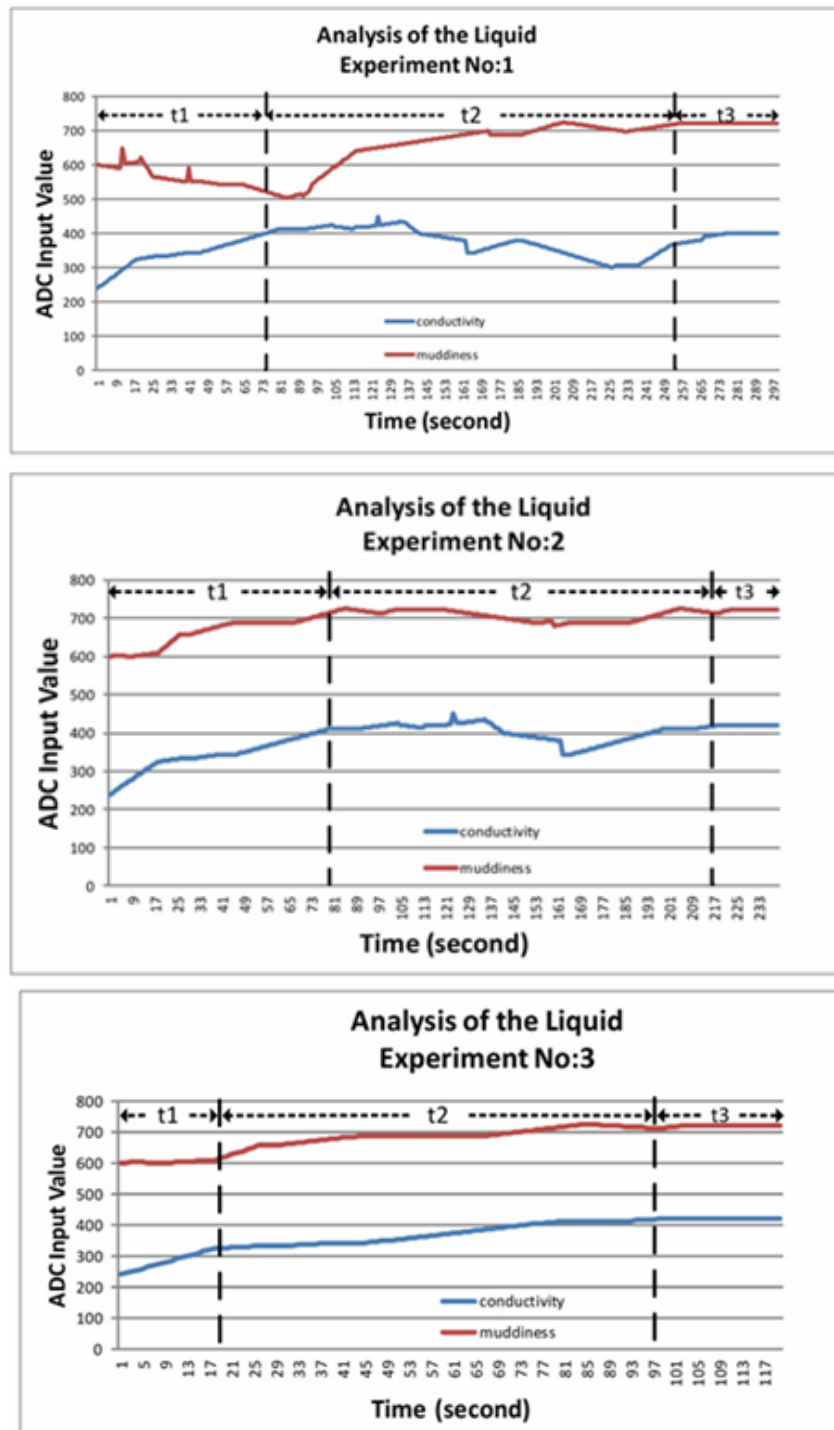


Рис. 1.3. Змінення значень каламутності та провідності

Вдосконалюється формування керуючої дії шляхом врахування просторової розподіленості кавітації. У праці [19] пропонується кавітаційні скупчення кульок, що не скоротилися, за допомогою додаткового ультразвукового джерела низької частоти провокувати до скорочення. Це дозволяє збільшити та ефективно використовувати енергію кавітаційних скупчень.

Отже, ультразвукове очищення є одним з найперспективніших видів очищення та використовується у багатьох галузях, тому постійно проводяться дослідження щодо підвищення його ефективності, як шляхом виявлення нових фізико-хімічних особливостей, так і за рахунок розробки нових методів автоматизації цього процесу.

Наявні на даний час методи керування процесом ультразвукового очищення не враховують просторове розподілення кавітації, обмежуючись лише підбором оптимальних геометричних параметрів у кожному конкретному випадку. Також не існує методики оцінювання перебігу процесу очищення, яке у своїй основі передбачало аналіз стану саме очищуваного виробу. Такі підходи призводять до обробки ультразвуком вже чистих ділянок, що в свою чергу вимагає непотрібних енергетичних витрат та підвищує собівартість кінцевої продукції. Тому у даній роботі буде розглянуто підхід, при якому оцінювання перебігу процесу очищення буде відбуватися саме за зміною стану виробу, а ультразвукова обробка буде найбільш активно проводитись у найближчих за цією оцінкою зонах.

1.2 Огляд наявних систем моделювання розповсюдження ультразвукових хвиль в гетерогенному середовищі та аналіз можливості їхнього застосування при симуляції ультразвукового очищення

Для розробки методики оцінювання та для визначення ефективності алгоритму керування ультразвуковим очищенням необхідно провести моделювання цього процесу. Існує велика кількість програмних засобів, що створені для моделювання процесу поширення ультразвукових хвиль у гетерогенному середовищах. Детальний аналіз таких програмних оболонок було проведено у праці [27], основні результати якої викладено у поточному підрозділі. Це і програми загального призначення, можливості яких використовуються у широкому спектрі моделювання фізичних, хімічних, інженерних процесів, яке є можливим за рахунок значної кількості реалізованих методів розв'язування диференціальних рівнянь та їхніх систем. Серед них можна виокремити - Comsol

[28], за допомогою якого можна провести моделювання майже всіх фізичних процесів. Перевагою подібних систем є універсальність, у велика кількість методів розв'язку та зручний інтерфейс, серед недоліків є закритий код, що не завжди відповідає останнім розробкам. Більш спеціалізовані програмні засоби мають у своїй основі обмежену кількість використаних методів і призначені для вирішення конкретного завдання. Оскільки, в основі моделювання будь-яких процесів знаходиться певний закон, за якою будується модель та методи, які дозволяють розв'язати еквівалентності, що є основою цих законів, то за цими параметрами і була проведена класифікація програмних засобів моделювання розповсюдження ультразвукових хвиль з урахуванням можливостей інтерфейсу та рівнем візуалізації отриманих результатів.

Основним законом, що описує процес розповсюдження ультразвукових хвиль є рівняння Гельмгольца [29]

$$\nabla \cdot -\frac{1}{\rho} (\nabla p) - \frac{\omega^2 p}{c^2 \rho} = 0, \quad (1.1)$$

де $p = p_0 \exp(i\omega t)$ – акустичний тиск, Па;

ω – кутова частота хвилі, рад·с⁻¹.

Константи ρ (кг/м³) та c (м/с) – густина рідини та швидкість хвилі відповідно.

До програм, основою яких є це рівняння, належить Bem++ (boundary element method) [30]. Для розв'язку еквівалентностей в цій програмі використано метод граничних елементів. Для застосування природної сильної постановки граничних інтегральних задач Bem++ використовує поняття просторів, подвійних просторів, операторів та функцій сітки. Згідно праці [31] головна особливість Bem++ – це використання об'єднаних інтегральних рівнянь поля, що у порівнянні з більш простими формулами має більшу стабільність на резонансних частотах.

На основі інших законормірностей створено програмний пакет Clawpack [32], що був створений для пошуку розв'язку елінійних гіперболічних диференціальних рівнянь у часткових похідних на основі методу кінцевого обсягу

високої роздільної здатності, базованого на розв'язках та обмеженнях Рімана. Clawpack було створено для моделювання нелінійних законів збереження, балансу та інших гіперболічних часткових диференціальних рівнянь першого порядку. Основні модулі мають у своїй основі алгоритми розповсюдження хвиль, описаних LeVeque в [33], і розроблені для декартової рівномірної або картографічної сітки або адаптивної ієрархії таких сіток. Для одновимірного простора гіперболічні системи Clawpack мають форму закону збереження [33]

$$q_t(x, t) + f(q(x, t))_x = 0, \quad (1.2)$$

та неконсервативної лінійної системи [28]

$$q_t(x, t) + A(X)q(x, t)_x = 0, \quad (1.3)$$

де індекси позначають часткові похідні, а $q(x, t)$ – вектор з $m \geq 1$ компонентами. Матриця коефіцієнтів A в (1.3) або якобіанська матриця $f'(q)$ в (1.2) вважаються діагоналізованими з дійсними власними значеннями для всіх відповідних значень q , x і t . Власні вектори системи визначають співвідношення між різними компонентами системи або хвилі, а власні значення визначають швидкості, з якими ці хвилі розповсюджуються.

Field II використовується для моделювання всіх видів ультразвукових перетворювачів та пов'язаних з ними зображень полів. Основою програмного продукту Field є концепція просторових імпульсних характеристик, яка була розроблена Turholme та Stepanishen [34, 35, 36]. Підхід базується на теорії лінійних систем для знаходження поля ультразвуку для імпульсної або неперервної хвилі. Це відбувається за рахунок використання просторової імпульсної характеристики, що дозволяє визначити випромінюване ультразвукове поле у певній точці простору як функцію часу. Поле для будь-якого типу збудження знаходиться шляхом згортання просторового імпульсу з функцією збудження. Імпульсна відповідь змінюється в залежності від розташування щодо

перетворювача. Особливістю програми є можливість моделювання ультразвукового перетворювача вільної, моделювання якого відбувається шляхом цього дискретизації на квадратні випромінювачі визначеного розміру (рис.1.4).

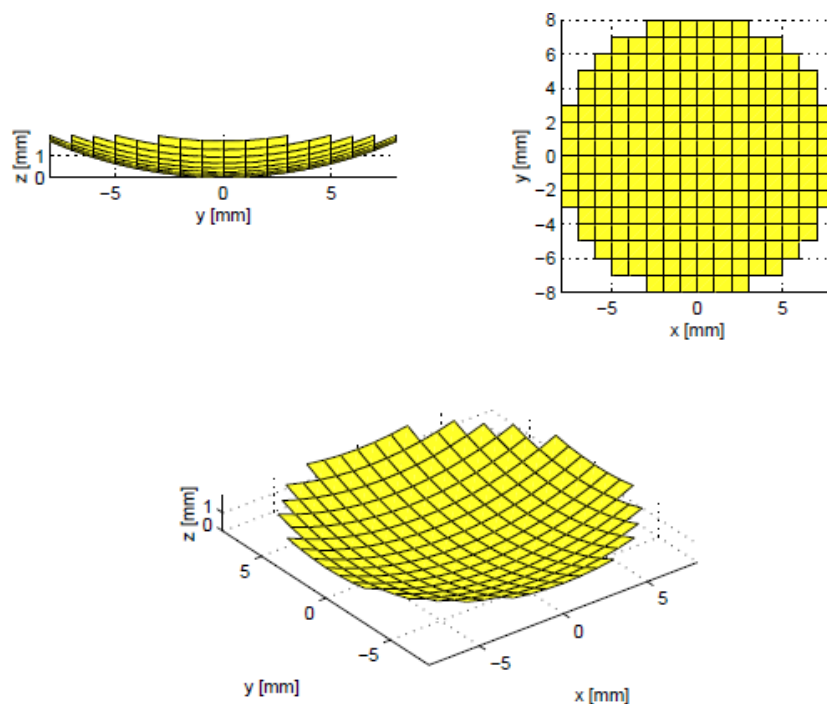


Рис. 1.4. Приклад увігнутого, круглого перетворювача з радіусом 8 мм, дискретизованого на математичні елементи розміром 1x1 мм.

μ -diff [37] – це модуль Matlab, що має відкритий код для вирішення задач багаторазового розсіювання із використанням циліндричних кластерів [38]. Строге математичне формулювання побудовано на основі формул інтегральних рівнянь. Основою побудови рішення є метод наближення кінцевої розмірності – це спектральний метод Фур'є в поєднанні з лінійними методами алгебри.

Ultrasm є програмним засобом для моделювання ультразвукового поля від заданих ультразвукових перетворювачів [39]. Основним законом, що використовує цей програмний засіб, є інтеграл Релея [40]

$$\varphi = \frac{1}{2\pi} \int \int \frac{u_n(r_0, t - \frac{r}{c})}{r} dS \quad (1.4)$$

де потенціал швидкості ϕ задається нормальною швидкістю u_n , інтегрованою над активною поверхнею перетворювача. Джерело приймається площинним, а саме, бічні розміри і радіус кривизни є великими в порівнянні з довжиною хвилі.

Інтеграл Релея знаходиться за допомогою дискретизації випромінюючої поверхні, із використанням припущення вібрації площинного джерела в одному режимі (режим товщини), і з розділенням поверхневої швидкості просторову та часову частини [40]

$$u_n(r, t) = O(r) \cdot u(t). \quad (1.5)$$

Площина спостереження також дискретизована, а інтеграція виконується за рахунок знаходження відстані, затримка часу квантована від кожної точки джерела до кожної з точок спостереження.

На основі розв'язку еластодинамічних рівнянь методом кінцевих різниць в часовій області (FDTD) розроблено Еммануелем Боссі програмну оболонку SimSonic, яка застосовується переважно для дослідження поширення ультразвуку в кістній тканині. Також може бути використана для моделювання поширення , ультразвуку у рідинах та/або твердих виробів [41].

FOCUS використовується для імітації ультразвукових хвиль як в гомогенних, так і в гетерогенних середовищах. В основі FOCUS знаходяться два основні методи моделювання: швидкий ближній метод (FNM) (використовується для визначення поля тиску біля грані перетворювача та кутовий спектральний підхід (ASA) (використовується для визначення поля тиску на дальній ділянці) [42].

Ще однією панелі інструментів Matlab із відкритим кодом є DREAM (Discrete Representation Array Modeling). Він дозволяє аналізувати керування, фокусування та аподизацію ультразвукового променя для широкосмугового (імпульсного) збудження [43]. В основі DREAM знаходиться числова процедура, що використовує обчислювальну концепцію дискретного представлення і має в

основі загальний підхід просторових імпульсних реакцій. Має розвинений графічний інтерфейс, що спрощує її використання [44].

Рівняння Хохлова-Заболоцької-Кузнецова або KZK (Khokhlov-Zabolotskaya-Kuznetsov) лежить в основі цілого ряду програмних оболонок моделювання поширення ультразвукових хвиль. Воно описує розповсюдження звукового пучка в нелінійному середовищі з дисипацією [45, 46]

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z \partial \tau} - \frac{c_0}{2} \nabla_{\perp}^2 p - \frac{\delta}{2c_0^3} \frac{\partial^3 p}{\partial \tau^3} = \frac{\beta}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p^2}{\partial \tau^2} \quad (1.6)$$

де p – тиск;

z - основний напрямок поширення звуку;

$\tau = t - z/c_0$ - затримка часу;

c_0 – мала сигнальна швидкість звуку;

$\nabla_{\perp}^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ - лапласіан, що діє в площині, перпендикулярній осі z ;

β – коефіцієнт нелінійності;

ρ_0 – густина;

d – дифузивність звуку, $\text{м}^2/\text{с}$.

Це рівняння є основою, таких програм, як KZKTexas та HIFU_Simulator. KZKTexas використовується для моделювання осесиметричних звукових променів у рідинах. Одна з версій коду створена для моделювання нефокусованих джерел (KZKTexas1), а інша – для орієнтованих джерел (KZKTexas2). Інше розширення KZKTexas – BurgersTX використовує подібний алгоритм, але для одновимірного розповсюдження ультразвуку (без дифракції) в неоднорідній рідині [47].

HIFU_Simulator створено для моделювання високоінтенсивного терапевтичного ультразвуку (HIFU) та його нагрівальної дії [48]. Це досягається

за рахунок інтеграції параболічного наближення високого порядку осесиметричного рівняння Вестервельта (інша назва - ширококутне рівняння Хохлова-Заболоцької-Кузнецова (КЗК)) за частотною областю. Існує можливість моделювання широкого діапазону осесиметричних полів із визначенням потнібної кількості шарів тканин. Перевагою системи є також гнучкий графічний вихід. HIFU_Simulator було розроблено для моделювання використання HIFU для неінвазивних методів лікування раку. пакетові належать два модулі, які вирішують рівняння КЗК [35] та рівняння біопереносу тепла Пеннеса (the Pennes' Bio-Heat Transfer - ВНТ) [49]

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{k}{\rho c_p} \nabla^2 T - \frac{w}{\rho} T + \frac{H}{\rho c_p} \quad (1.7)$$

де k – теплопровідність;

c_p - питома теплоємність;

w - швидкість перфузії крові.

КЗК розв'язуються із використанням різних числових схем із застосуванням оператора розщеплення умови [50]. Лінійний член визначається в частотній області двома методами другого порядку: за допомогою діагональної неявної схеми Рунге-Кутта в області біля поверхні перетворювача, де рішення швидко коливається, і схеми Кранка-Ніколсона за межами цього регіону. Нелінійний термін вирішується у часовій області методом "висхідного / нисхідного". Рівняння ВНТ, має в основі свого вирішення неявну схему Рунге-Кутта другого порядку.

Основою розглянутих програмних засобів для моделювання поширення ультразвукових коливань є диференціальні рівняння в частинних похідних

другого та вищих порядків, що робить їх досить вибагливими до обчислювальної техніки та вимагає значних проміжків часу для моделювання.

На відміну від них програмний засіб k-Wave дозволяє моделювати широкомасштабні акустичні процеси за прийнятний час, використовуючи псевдоспектральні методи та метод k-space для знаходження розв'язку системи рівнянь першого порядку для опису моделі. Розглянуті методи є вільними від дисперсії незалежно від дисперсії для гомогенного середовища навіть у випадку масштабних акустичних моделювань та прийнятним при наявності нелінійності та неоднорідності параметрів середовища [51].

Хоча початковою галуззю застосування k-Wave було моделювання поширення ультразвукових хвиль в живих тканинах [52, 53], цей програмний засіб використовується і в інших сферах застосування ультразвуку, наприклад, для визначення характеристик рудних матеріалів [54].

Відсутність графічного інтерфейсу у k-Wave, подібного до TAC (Transducer Array Calculation) GUI [55] (рис.1.5) та Dream [56] (рис. 1.6), компенсується досить простим завданням ініціалізуючих даних щодо середовища розповсюдження, випромінювачів та приймачів, достатньою кількістю форм випромінювачів, підтримкою ультразвукових променів, великою кількістю вихідних даних та графічних ілюстрацій (рис.1.7).

Можливість моделювання декількох випромінювачів водночас стала вирішальною при виборі засобу симуляції ультразвукового очищення як просторово розподіленого процесу. Також серед переваг є сенс згадати високу якість документації та ілюстрацій можливостей програмного засобу [57].

Отже, аналіз наявних програмних засобів для моделювання розповсюдження ультразвуку у гетерогенному просторі продемонстрував відмінність систем як за критерієм галузей застосування, так і за математичними моделями, що лежать у їх основі.

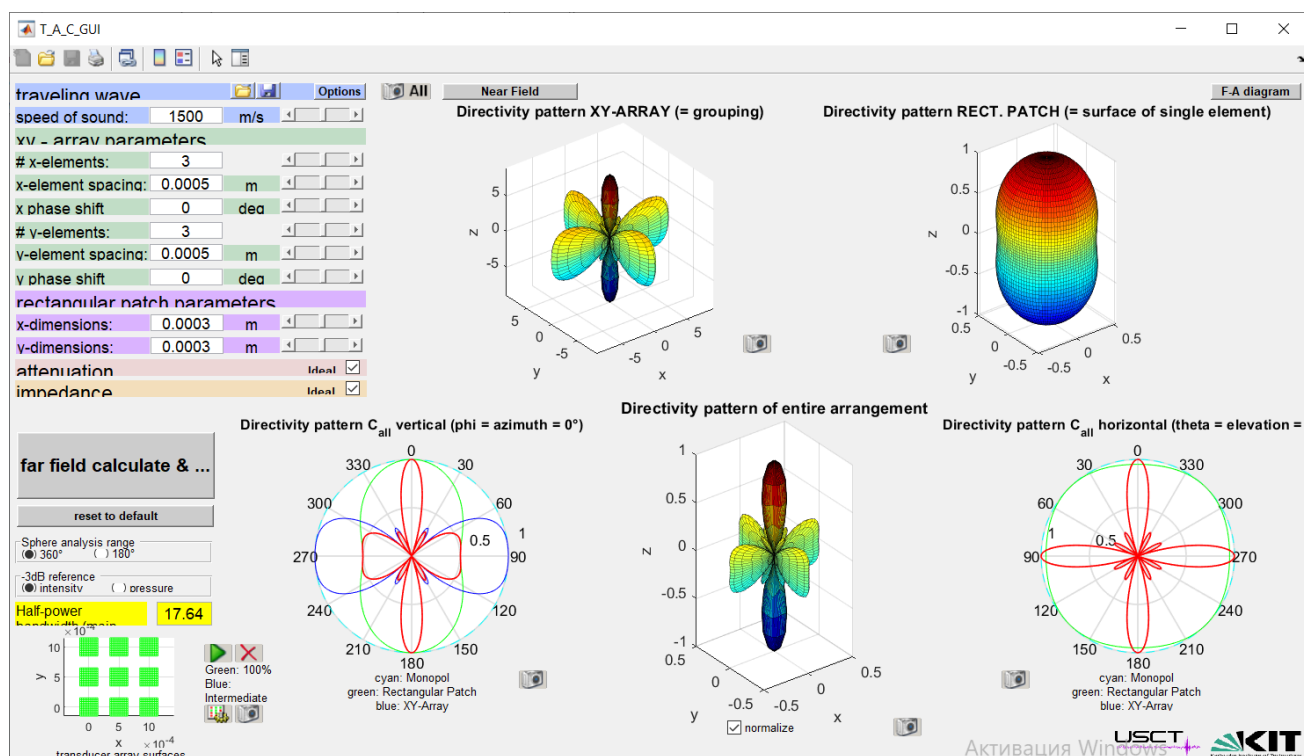


Рис. 1.5. Головне вікно програмного засобу TAC GUI

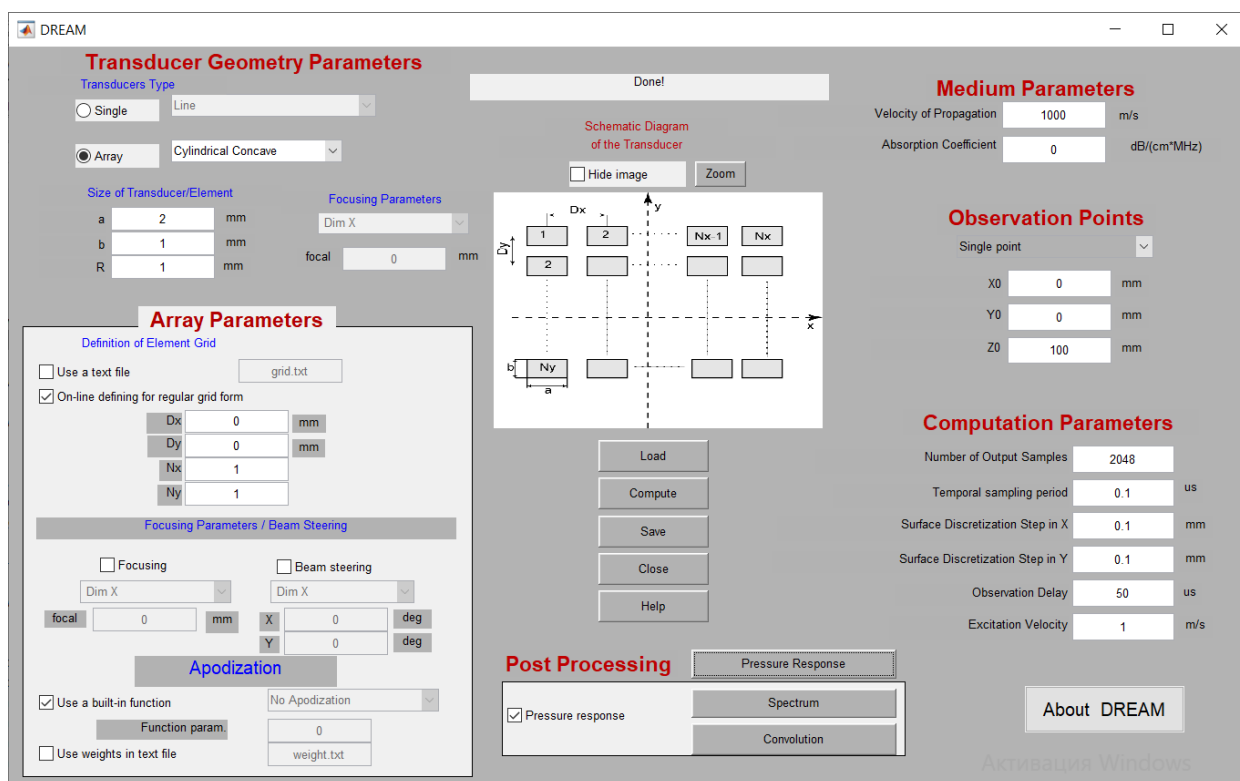


Рис. 1.6. Головне вікно програмного засобу Dream

За критеріями точності, тривалості та підтримуваного функціоналу для побудови просторової моделі ультразвукового очищення виробів складної конфігурації обрано k-Wave. Але враховуючи обмеження цього програмного

пакету для моделювання керування ультразвуковою двовимірною фазованою решіткою у процесі ультразвукового очищення, було використано спеціалізований програмний засіб для фазованих решіток - Transducer Array Calculation (TAC) [55].

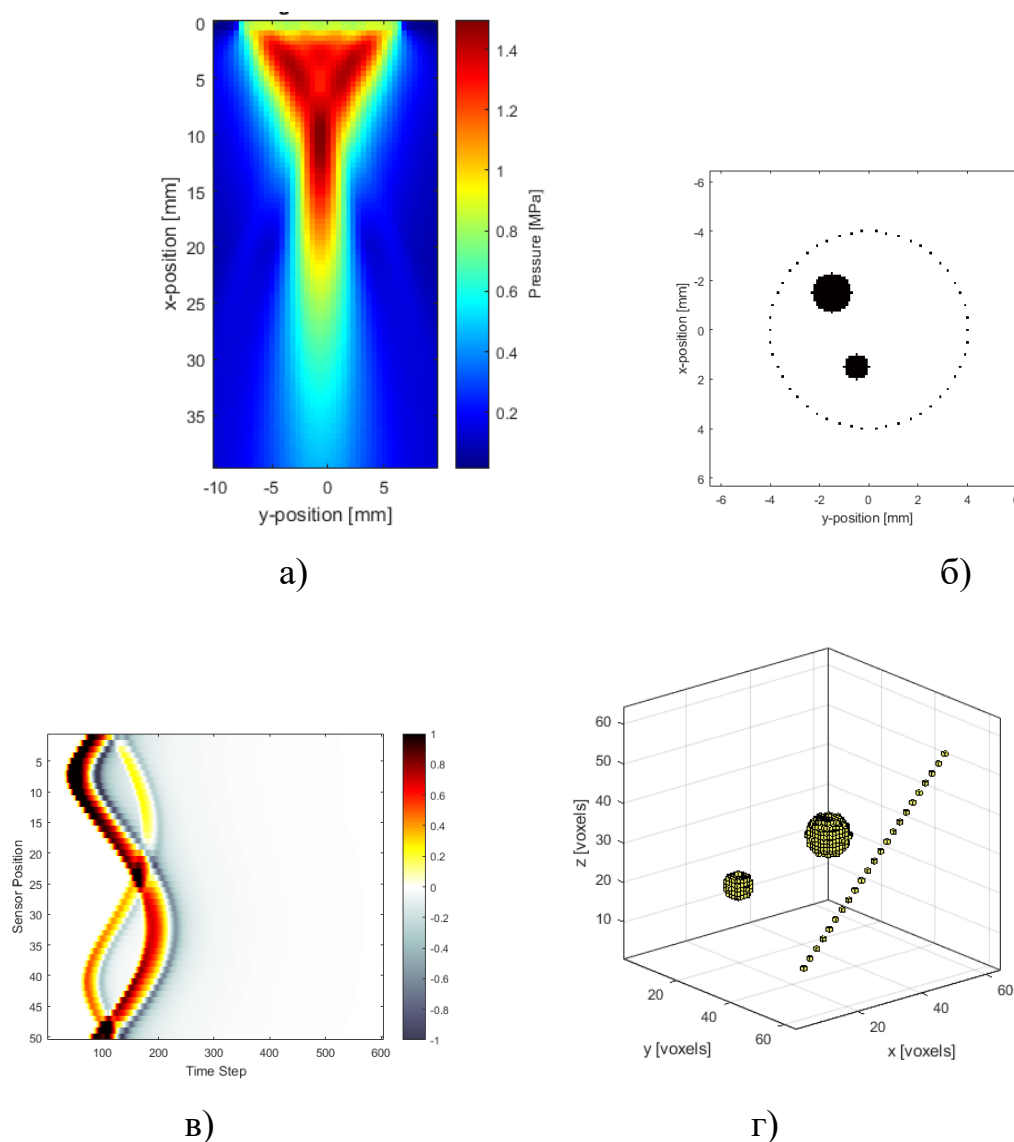


Рис. 1.7 Приклади графічних зображень вхідних та вихідних даних у k-Wave

а) поле ультразвукового променя; б) два дискових випромінювача та коло сенсорів у двовимірному просторі; в) візуалізація даних приймачів; г) два кульових випромінювача та лінія сенсорів у тривимірному просторі

TAC поєднав у собі великий спектр підходів до моделювання ультразвукових фазованих решіток, включаючи метод кутового спектру, метод мультигаусового пучка, метод трасування променів, метод кінцевих елементів,

метод кінцевих різниць і метод розподіленого точкового джерела. Крім того, використано широкий набір візуалізації даних, а саме метод повного фокусування, зображення з датчиком стиснення і зображення акустичної нелінійності (рис. 1.5).

Отже, для дослідження та моделювання процесу ультразвукового очищення обрано наступні програмні засоби: k-Wave та Transducer Array Calculation. Більшість дій виконується за допомогою k-Wave, а дослідження параметрів ультразвукових фазованих решіток для ультразвукового очищення за допомогою Transducer Array Calculation.

1.3 Аналіз наявних методів оцінювання перебігу процесу очищення

Довгий час тривалість процесу ультразвукового очищення обмежувалась лише часовим значенням, заданим оператором. Це вимагає постійного контролю з боку оператора та призводить до нераціонального використання ультразвукової енергії, оскільки може бути заданий завищений час виконання процесу. Але дослідження щодо моніторингу процесів інших типів очищення мають довгу історію розвитку. Більшість дослідницьких зусиль спрямовані на моніторинг властивостей рідини для чищення, щоб визначити, як змінюються її параметри, що залежать від наявності відшарованого забруднення. Контроль властивостей рідини в системі виконуються електричними та оптичними методами [58, 59, 26]. Використання цих методів забезпечує автоматизацію процесу очищення цінною інформацією, але вони не чутливі до забруднень, які все ще не відокремилися з поверхні виробу, тому часто можуть надавати недостовірні результати щодо дійсної чистоти обладнання. Так, у праці [26] було поєднано електричний та оптичний метод моніторингу процесу саме для ультразвукового очищення, а саме оцінювання шляхом аналізу електропровідності та каламутності рідини. Недолік такого підходу – це опосередкованість оцінки, що не враховує стан виробу, який очищується, та не дає змоги ефективно формувати просторово розподілену керуючу дію.

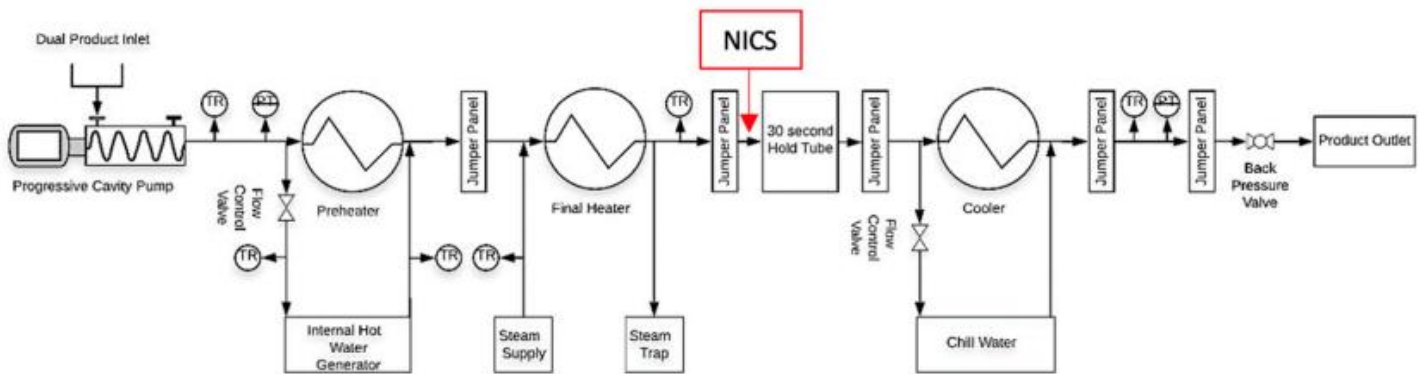


Рис. 1.8. Технологічна схема системи надвисокої температури (УНТ), яка використовується для визначення товщини забруднення

Для контролю за наявністю забруднення на поверхні використовувалися різні методи, основними з яких є електричні [60, 61, 26], оптичні [62, 63, 26], акустичні [64, 65] та ультразвукові методи [66, 67, 25]. Електричні методи базуються на вимірюванні таких електричних властивостей, як опір і провідність між парами зондів, так у роботі [68] забрудненість труб у молочній промисловості оцінювалась через фіксацію зміни теплопровідності (рис.1.8).

Такий підхід досить ефективний, але вимагає інформації про фізичні параметри забруднення. Оптичні методи із використанням будь-якої флуоресценції [69] або волоконно-оптичні [70] методи були використані для моніторингу видалення поверхневих забруднень. Оптичні методики забезпечують просторову інформацію про розташування та ступінь забруднення проте вимагають освітлення та мають певні труднощі для застосування при очищенні виробів складної конфігурації. Акустичні методи використовують механічні інструменти для збудження вібрації в забрудненому обладнанні. Ці вібрації згодом виявляються перетворювачем (зазвичай п'єзоелектричним). Загалом, наявність забруднень послаблює вібрації, виявлені перетворювачами. Однак подібний підхід важко реалізується в умовах ультразвукової ванни. Ультразвукові сенсорні технології використовують високочастотні механічні хвилі, які поширюються в системі, що перевіряється. Переваги ультразвукових датчиків у тому, що вони часто значно дешевші ніж інші методи і можуть виконувати

неруйнівні вимірювання в режимі реального часу для різноманітних застосувань у промисловості. У працях [25, 71] шляхом навчання нейромережі визначається стан очищення шляхом спостереження за ультразвуковими відгуками. Машинне навчання вимагає типової конфігурації очищуваного виробу та не може застосовуватись у загальному випадку, бо вимагають кожного разу нового навчання мережі, що не доцільно. Але водночас дослідження [25, 71] демонструють можливість оцінювати перебіг процесу очищення шляхом аналізу ультразвукових відгуків.

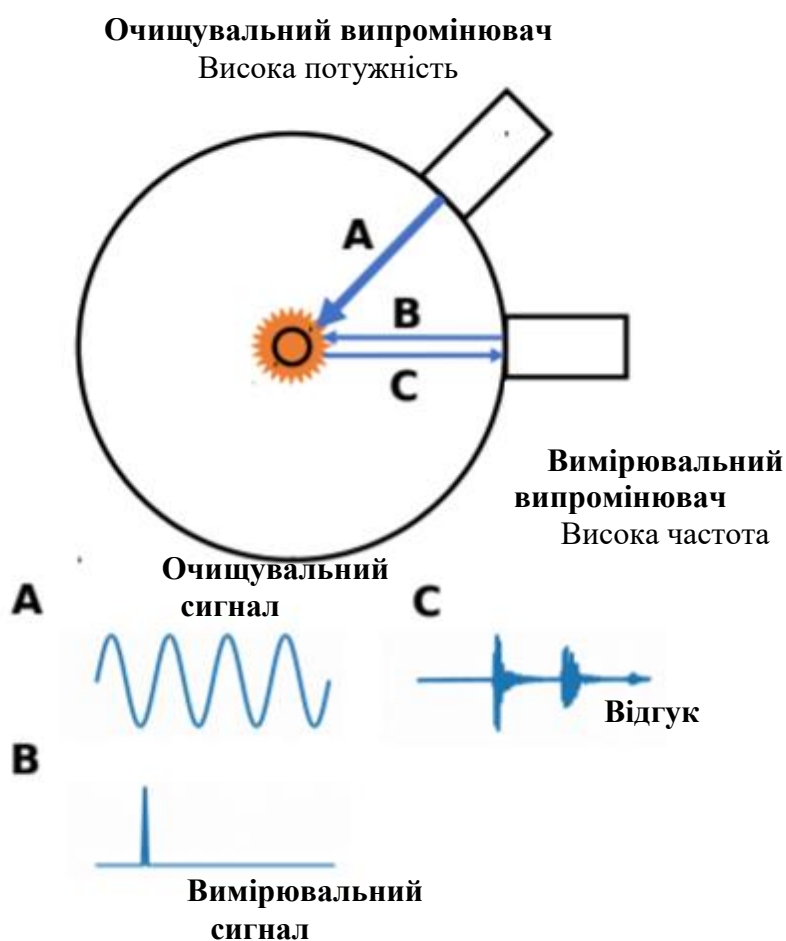


Рис. 1.9. Очищення від помаранчевого забруднення у трубі ультразвуком високої потужності (A) та періодичне зондування поточного стану за допомогою високочастотного вимірювального імпульсу (B) та його відлуння (C)

Так у роботі [25] під час ультразвукового очищення теплообмінника та труб використовується синусоїдний сигнал високої потужності безпосередньо для самого очищення та високочастотний пульсуючий сигнал для формування оцінки

стану об'єкта (рис. 1.9). Було проведене машинне навчання для розділення чистих та забруднених структур за допомогою згорткової нейронної мережі, яка застосовувалась до сигналів від неінвазивного ультразвукового зондування. В основі навчання використовувалось основна фізична властивість монотонності процесу очищення, тобто відсутності повторного забруднення.

У роботі [71] очищення обладнання харчової промисловості відбувається із використанням різних механізмів, для неінвазивного оцінювання чистоти обладнання застосовуються ультразвукові та оптичні датчики. Вимірювання, що отримані з ультразвукових датчиків використовуються для розробки регресійної моделі нейронної мережі, яка може передбачити кількість наявних забруднень і використовуватись для визначення завершення процесу очищення. Паралельно проводився моніторинг процесу очищення і за допомогою оптичних датчиків. Кращий результат залишився за оптичними датчиками, але різниця була не суттєвою, до того ж ультразвукові мають меншу вартість та їх зручніше використовувати, оскільки оптика вимагає додаткового освітлення, що не завжди можливо.

Ультразвукові неруйнівні вимірювання також широко застосовуються для кількісної оцінки великої кількості механічних та структурних властивостей твердих речовин [72, 73] і можуть бути використані для оцінювання стану об'єкта ультразвукового очищення. Формування оцінки механічних властивостей виробів за допомогою ультразвукових вимірювань ефективно використовується протягом тривалого часу у різних галузях промисловості та продовжує розвиватися і в наш час [74, 75], що свідчить про високу ефективність та точність. Але складність фізичної інтерпретації результатів ультразвукових вимірювань є одним з основних обмежуючих факторів їхнього застосування.

Найбільш розповсюдженим показником, на основі якого оцінка параметру ультразвуковим методом є час надходження імпульсу. Так у роботі [76] за допомогою аналізу часу надходження імпульсу вимірюється в'язкість рідини, у [77] оцінюється відстань між транспортними засобами, у [78] знаходиться шлях переміщення, аналіз швидкості ультразвуку дозволяє також визначити ранні

характеристики цементної пасти [79]. Але існують і більш нові підходи до інтерпретації отриманих даних, які можуть бути застосовані і у випадку з оцінюванням стану перебігу очищення. Забруднений виріб є об'єктом, у якого спотворені механічні властивості, тобто наявні ділянки з іншою густиною. В процесі очищення густина поверхні виробу стає більш однорідною. Оцінювання забрудненості виробу за своєю фізичною сутністю подібне до визначення наявності пошкоджень та мікротріщин, оскільки для обох випадків характерна неоднорідність структури поверхні. Через матеріальну нелінійність ультразвуковий відгук може спотворюватись, створюючи супутні гармоніки, множення хвиль різної частоти. У ряді дослідів [80, 81] доведено, що саме нелінійна складова ультразвукових відгуків є найбільш значущим параметром, що надає змогу оцінити ступінь неоднорідності виробу, наявності мікротріщин та пошкоджень. Чутливість нелінійних методів до виявлення ознак неоднорідності виробу набагато більша, ніж у лінійних акустичних методів (вимірювання швидкості хвилі та дисипації хвилі). Типовим нелінійним явищем є формування гармонік вищого порядку, тобто формування гармонічних частот, що перевищують частоту основної вхідної частоти в результаті спотворення форми сигналу у часовій області. Для оцінювання мікротріщин використовуються аналіз змінення співвідношення амплітуд першої та квадрату другої гармоніки [80] або співвідношення коефіцієнтів, що залежать від амплітуд гармонік другого та третього порядку [81]. Але якщо в цих роботах спостерігалось збільшення нелінійних складових в процесі втоми матеріали, тобто погіршення його механічних властивостей, то для ультразвукового очищення спостерігається зворотній ефект: зменшення нелінійної складової у процесі очищення як індикатор покращення механічних властивостей виробу.

Для визначення параметрів ефективного оцінювання перебігу процесу ультразвукового очищення необхідно розглянути, як аналіз лінійних показників (часу надходження імпульсу), так і нелінійних (коефіцієнтів нелінійності другого та третього порядків), сформувавши таким чином вхідну інформаційну базу для тривимірного нечіткого контролера.

1.4 Аналіз застосування немодельних методів керування до просторово розподілених процесів

Для ультразвукового очищення, як і для багатьох інших фізичних процесів, характерна наявність сильних просторових варіацій. Це пов'язано з зональністю основної рушійної сили такого виду очищення – кавітації та із нерівномірністю забруднення, а, відповідно, і відшаровування бруду виробу. Такі системи називаються системами із розподіленими параметрами (СРП). Існують різні підходи до керування подібними системами. Один з найбільш популярних - приведення до системи із розподіленими параметрами шляхом дискретизації загального об'єкта управління на етапі проектування управління – так зване «раннє зосередження параметрів». У такому випадку керування систем можна будувати, спираючись на традиційні методи, але втрачаються основні теоретичні властивості управління - керованість, спостережливість та стабільність [82, 83]. Це приводить до розробки контролерів, які складно реалізувати [82]. Інший підхід «пізнє зосередження» передбачає, що спрощення відбувається на етапі реалізації контролера. Це дозволяє уникнути втрати розподіленої природи СРП та повністю використати їх природні властивості. Однак безпосереднє поводження з СРП викликає труднощі, бо математичні моделі таких систем є досить складними та мають в своїй основі диференціальні рівняння у частинних похідних, інтегральні рівняння, інтегродиференціальні рівняння або системи рівнянь різної природи.

Окрім класичних підходів до СРП успішним виявився геометричний контроль [84, 85]. Розробка закону управління на основі геометричної теорії управління дає перевагу в тому, що модель в часткових диференційних рівняннях може бути використана в конструкції управління без наближення. Це дозволяє зберегти основні теоретичні властивості управління з урахуванням розподіленої природи системи [83, 82]. Крім того, управління на основі геометричного управління не вимагає складних розрахунків [86]. Але все це модельні методи, тобто основна їхня вимога – це наявність точної математичної моделі. Значна кількість систем реального світу, в тому числі і ультразвукове очищення, мають

невідомі параметри або дуже складні та нелінійні характеристики. Точні моделі для таких систем важко отримати або вони призводять до дуже складних контролерів, які викликають труднощі у застосуванні. Ультразвукове очищення не має чіткої математичної моделі, оскільки основне фізичне явище, що його продукує – кавітація досі аналітично не описано. Тому, для таких випадків доцільно використовувати більш сучасні методи управління за допомогою нечіткої логіки або нейромереж. Методика керування із використанням технології навчання згорткових нейромереж уже розроблена для ультразвукового очищення трубопроводів [25, 71]. Навчання таких мереж відбувається за основним принципом незворотності процесу очищення, тобто будь-які зміни у показниках датчиків є свідченням, що відбувалося очищення об'єкту. При цьому геометрична форма виробу, що очищується, лишалась постійною. Такий підхід продемонстрував ефективність у випадку очищення трубопроводів, але у загальному випадку при роботі з різним обладнанням є недоцільним, оскільки вимагає охоплювати навчання для всіх конфігурацій виробів, що очищуються. Нечітка логіка вільна від цих недоліків, до того ж демонструє ефективність застосування у різних галузях промисловості.

Для багатьох систем реального світу, які є дуже складними і за своєю суттю нелінійними, традиційні підходи моделювання часто не застосовуються, тоді як нечіткий підхід може бути єдиним життєздатним варіантом. З моменту розробки методології використання нечіткої логіки Заде [87] постійно розширюється її застосування. Так, нечіткі контролери гарно зарекомендували себе у керуванні магнітною підвіскою потягів [88], синхронізації системи енергоресурсів [89], сегментації зображень [90], управлінні системою вітрових турбін PMSG [91], системою ізоляції активних вібрацій плаваючого плоту [92], компенсації несправності та стабілізації системи [93], роботі робота, що перевіряє злив [94], системі перекачування води на сонячній енергетиці [95], керуванні умовами інжирних теплиць [96], управлінні колісними мобільними роботами [97], контролі вібрації підвісних систем автомобіля [98], контролі подачі інсуліну у кров [99] тощо. Але для більш складних нелінійних систем в умовах непевної експертної

оцінки параметрів Заде [100] запропонував розширення функції належності до лінгвістичної змінної із власними ймовірностями. Такий підхід виявився досить складним для практичного використання та у реальних застосунках відбулося спрощено до інтервальних множин типу 2 [101], контролери на основі яких стали розповсюдженими не лише у системах прийняття рішень [102], попередній обробці даних [103], оцінці якості послуг [104], але й у промисловості та господарстві. Так інтервальний нечіткий контролер типу 2 застосовується для виявлення несправності короткого замикання та активний контроль відмов безщіткового двигуна постійного струму [105], контролі енергозбереження в Smart будинках [106], управління приводом пам'яті форм [107], системі вимірювання струму навантаження набору тягових батарей за допомогою силової системи електронного приводу електромобіля [108] тощо. Але для врахування особливої природи систем із розподіленими параметрами нечітка логіка вимагала їхньої дискретизації та спрощення, що значно обмежувало її ефективність. Рішенням цієї проблеми стало просторове розширення нечіткої множини до тривимірної у серії робіт [109, 110] для врахування природніх особливостей систем із просторово розподіленими параметрами.

Для складних процесів з великою кількістю невизначених параметрів, щодо того ж є розподіленими у просторі, як ультразвукове очищення, об'єднання тривимірної та інтервальної нечіткої логіки дозволить сформуванню керування, яке буде враховувати природні особливості процесу. Додаткові операції, що забезпечують роботу тривимірного та інтервального нечітких контролерів, виконуються на різних етапах, тому для загального контролера достатньо буде розробити алгоритм, що буде композицією всіх операцій. Новий контролер, отриманий шляхом синтезу вже існуючих дозволить об'єднати їхні переваги та сформуванню керування для просторово розподілених процесів в умовах відсутності чіткої експертної оцінки.

1.5 Огляд та аналіз наявних ультразвукових технологій для формування спрямованого впливу

В якості керуючих механізмів при ультразвуковому очищенні переважно застосовуються магнітострикційні випромінювачі у вигляді пластин та стержнів, погрузні п'єзоелектричні перетворювачі та п'єзоелектричні пакетні перетворювачі Ланжевена. Всі вони мають довгу історію ефективного використання в ультразвуковій очистці, але не надають можливості організувати спрямоване керування.

Для формування просторового керування ультразвуковим очищенням необхідна технологія, що дозволяє спрямувати ультразвуковий промінь у напрямі ділянки з найбільшим забрудненням. Також накладення ультразвукових променів від різних перетворювачів дозволяє збільшити кількість кавітаційних колапсів за рахунок колапсування тих кавітаційних кластерів, що знаходяться у віддаленій зоні кавітаційної активності. Подібний підхід вже застосовано у праці [19], де за допомогою додаткового низькоамплітудного випромінювача вдалося викликати додаткові кавітаційні вибухи у віддалених зонах, що багаті на неколапсуючі кластери. Технологія, що дозволяє це зробити у межах алгоритму просторового керування – це ультразвукова фазована решітка, що надає можливість формувати промінь за заданими параметрами. Ультразвукові фазовані решітки тривалий час широко застосовується у неруйнівній оцінці різних механічних параметрів [111, 112] та медичних показників [113, 114], але цим не обмежуються їхні можливості. Також вони використовуються у випадках, коли необхідно впливати ультразвуковим сфокусованим пучком у потрібному напрямку. Серед таких застосувань технології можна виділити управління левітацією частинок [115], нейростимуляцію [116], лікування пухлин [117]. Тобто коли необхідна спрямована дія ультразвуком у обраній точці, то використовується саме ультразвукова фазована решітка. Для визначення оптимальних параметрів такої решітки розглянемо, як відбувається формування ультразвукового променя та особливості впливу на цей промінь різних характеристик решітки.

Ультразвукові фазовані решітки складаються з кількох елементів, що збуджуються через певні затримки часу, формуючи таким чином спрямований вплив у заданому напрямку. Характеристики променя ультразвукової фазованої решітки змінюються відповідно до таких параметрів перетворювача, як частота, розмір діафрагми, кількість елементів, крок (міжелементний інтервал), ширина елемента, розміри елемента тощо. Якщо ці параметри вибрані не належним чином, то можуть з'являтися помилкові пелюстки решітки або бічні пелюстки з високою амплітудою.

Ультразвукові фазовані решітки класифікуються як одновимірні або лінійні (складаються з одного ряду елементів) та двовимірні (прямокутні, кільцеві тощо). Лінійні дозволяють керувати променем лише в площині, в той час як двовимірні забезпечують керування у просторі. Розглянемо як впливають геометричні особливості фазованих решіток на результуючий промінь.

Оскільки основним рушійним феноменом ультразвукового очищення є кавітація, а не безпосередній вплив випромінення, то спочатку проаналізуємо можливості лінійної ультразвукової фазованої решітки. За схематичним зображенням такої решітки (рис. 1.10) можна зробити висновок, що основними конструктивними параметрами, які можуть впливати на формування променя є крок елементів p , кількість елементів N , апертура перетворювача A , зазори між елементами g і ширина елементів W .

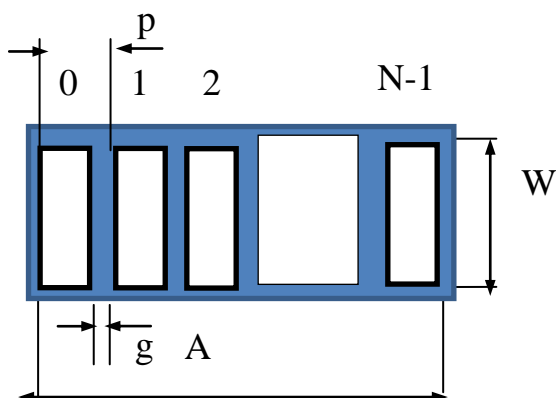


Рис. 1.10. Лінійна ультразвукова фазована решітка

Можливості керування променем для такої решітки обмежуються двома параметрами - відстанню до точки фокусування та кутом нахилу променю (рис. 1.11)

Закон затримки при цьому для кожного n-ого елементу решітки буде [118]

$$\Delta\tau_n(x, R, \varphi) = R \left[1 - \sqrt{\left(\sin\varphi - \frac{x_n}{R} \right)^2 + \cos^2 \varphi} \right] \quad (1.8)$$

де x_n – значення координати центру поточного перетворювача;

R – відстань від середини ультразвукової решітки до точки фокусування;

φ – кут для точки фокусування.

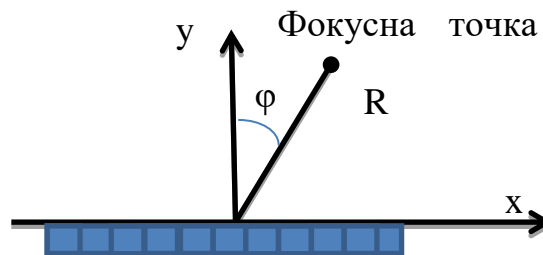


Рис. 1.11. Параметри променю для лінійної ультразвукової фазованої решітки

Недоліком лінійних фазованих решіток є можливість формувати промінь лише у площині, що значно обмежує можливості просторового керування процесом ультразвукового очищення. Для того, щоб мати змогу задавати просторову спрямованість кута, то необхідно використовувати двовимірну фазовану решітку (рис.1.12).

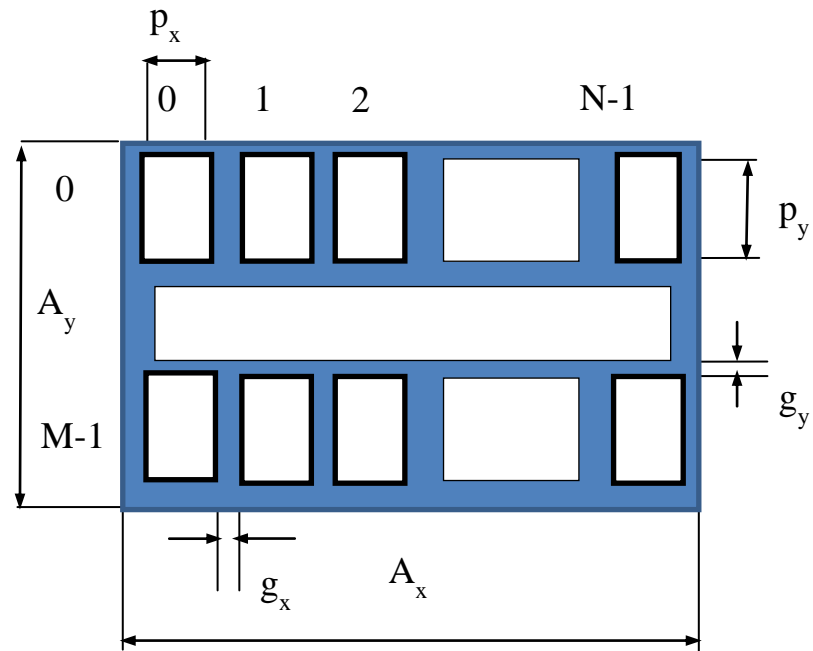


Рис. 1.12. Двовимірна ультразвукова фазована решітка

Закон часової затримки для кожного елементу nm -ого елементу такої решітки буде [118]

$$\Delta\tau_{nm}(x, F) = \frac{R \left[1 - \sqrt{\frac{(\sin\theta\cos\varphi - x_n/R)^2 + (\sin\theta\sin\varphi - y_m/R)^2 + \cos^2\theta}{R^2}} \right]}{c} \quad (1.9)$$

де $F = (F_1, F_2, F_3) = (R\sin\theta\cos\varphi, R\sin\theta\sin\varphi, R\cos\theta)$ спрямування променя, відповідно до рис. 1.13.

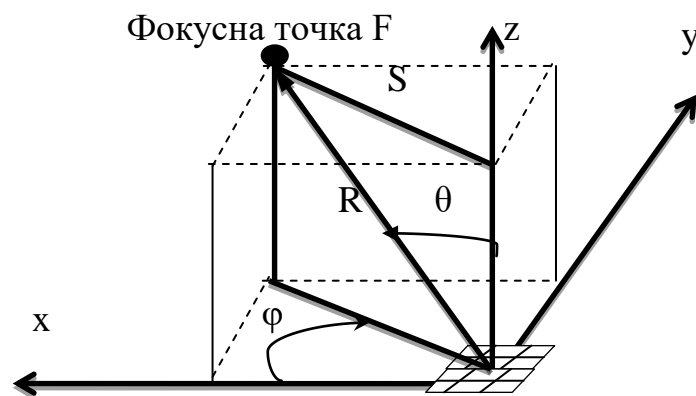


Рис. 1.13. Параметри ультразвукового променя для двовимірної фазованої решітки

Отже, фазовані ультразвукові решітки дозволяють створити просторово спрямований ультразвуковий промінь, для визначення якого використовується відстань до фокусної точки та зенітний і азимутний кути. Використання такого променя дозволить перерозподілити ультразвуковий тиск у напрямку найбільш інтенсивного перебігу очищення.

Висновки до розділу 1

На основі проведеного аналізу вітчизняних та зарубіжних досліджень для визначення шляхів вирішення проблеми підвищення енергоефективності ультразвукового очищення виявлено значний потенціал у покращенні методів керування процесом ультразвукового очищення, оскільки на даний момент відсутні розробки з управління ультразвуковим очищенням з урахуванням його просторової розподіленості. Це призводить до перевитрат енергії внаслідок надлишкового опромінення ультразвуком вже очищених частин обладнання. Для уникнення цього необхідно, щоб керування відбувалося на основі оцінювання перебігу ультразвукового очищення не опосередковано за станом рідини, як це відбувалося раніше, а безпосередньо за інтенсивністю очищення на заданих ділянках. Враховуючи складність математичного опису просторово розподілених систем та застосування до них традиційних методів керування з урахуванням їх особливостей, запропоновано використовувати тривимірну нечітку логіку, яка за своєю суттю була розроблена для подібних процесів. Непевність експертної думки щодо формування оцінки перебігу очищення пропонується компенсувати через інтервальну функцію приналежності. Вперше запропонований симбіоз цих двох розширень традиційної логіки має на меті сформулювати керування просторово розподіленим процесом в умовах відсутності чіткої оцінки вхідної інформації.

Було також розглянуто наявні можливості щодо формування спрямованого ультразвукового впливу під час ультразвукового очищення та вперше запропоновано використовувати з цією метою технологію ультразвукової

фазованої решітки для забезпечення збільшення ультразвукового тиску в зоні забруднення.

На основі проведеного аналізу для реалізації розробки більш ефективного керування процесом ультразвукового очищення були сформульовано наступні задачі:

- виявити і формалізувати основні закономірності процесу ультразвукового очищення шляхом моделювання для формування основних принципів як оцінювання інтенсивності перебігу процесу очищення, так і формування розподіленого керування та розробити метод оцінювання перебігу процесу ультразвукового очищення шляхом аналізу ультразвукових відгуків із застосуванням спектрального аналізу та виокремлення лінійної і нелінійної складових із наступним формуванням нечіткої бази правил;

- розробити принципи формування енергоефективного адаптивного тривимірного нечіткого керування з використанням інтервальної функції належності вхідних параметрів для врахування просторових особливостей процесу очищення із використанням методу оцінювання перебігу процесу ультразвукового очищення із застосуванням спектрального аналізу та виокремлення лінійної і нелінійної складових;

- розробити автоматизовану систему ефективного керування процесом ультразвукового очищення із використанням виконаних досліджень та практичні заходи з її реалізації.

РОЗДІЛ 2.

ДОСЛІДЖЕННЯ І МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОЧИЩЕННЯ ВИРОБІВ СКЛАДНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ

2.1 Основні задачі моделювання ультразвукового очищення та засоби, що дозволяють їх досягти

Для формування ефективного керування процесом ультразвукового очищення згідно проведеного аналізу, насамперед, було визначено залежність перебігу процесу очищення та параметрів ультразвукових відгуків датчиків. Виявлення подібної залежності дозволило сформувавши оцінку, за якою і має визначатися характер керуючого впливу. Були розглянуті різні випадки забруднення та конфігурації виробів. Це пов'язано з тим, що на ультразвукові віддзеркалення впливають як властивості забруднення, так і особливості поверхні, що очищується. Також розглянуто вплив забрудненості рідини.

Оскільки моделювання ультразвукового очищення за відсутності аналітичного виразу для кавітаційних процесів [119] зводиться до моделювання акустичного поля, то у програмному засобі k-Wave [53] змодельовано зміну акустичного поля протягом процесу очищення. З цією метою було визначено характеристики забрудненої ділянки обладнання (на кожному етапі очищення відбувалося корегування цих характеристик у напрямку зменшення густини або товщини забруднення), далі проводилась симуляція опромінення виробу та фіксувався зворотній сигнал. Надалі за допомогою візуального аналізу було визначено спільні риси зміни ультразвукових відгуків для ділянок обладнання різної конфігурації із різним характером забрудненості [51]. На останньому етапі проведено дослідження залежності ультразвукових відгуків під час очищення та просторових позицій датчиків, що їх фіксують [27].

Програмний засіб k-Wave було обрано за можливість високоточного моделювання масштабних акустичних процесів за прийнятний час. Це

досягається шляхом побудови моделі із використання системи диференціальних рівнянь у частинних похідних першого порядку та комбінації псевдоспектрального методу та методу k-space для її вирішення. Система диференціальних рівнянь у частинних похідних першого порядку, для визначення акустичних процесів, має вигляд [53]

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho_0} \nabla p, \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= -\rho_0 \nabla \cdot u - u \cdot \nabla \rho_0, \\ p &= c_0^2 (\rho + d \cdot \nabla \rho_0 - L\rho) \end{aligned} \quad (2.1)$$

де u – акустична швидкість частинки, м/с;

d – зміщення акустичної частинки, м;

p – акустичний тиск, Па;

ρ – акустична густина, кг/м³;

ρ_0 – навколишня (або рівноважна) густина, кг/м³;

c_0 – ізотропна швидкість звуку, м/с;

L – лінійно інтегро-диференціальним оператор.

L визначає акустичне поглинання та дисперсію наступним чином [53]

$$L = \tau \frac{\partial}{\partial t} (-\nabla^2)^{\frac{y}{2}-1} + \eta \frac{\partial}{\partial t} (-\nabla^2)^{\frac{y+1}{2}-1} \quad (2.2)$$

де τ і η – коефіцієнти пропорційності поглинання та дисперсії [53]

$$\tau = -2\alpha_0 c_0^{y-1}, \quad \eta = 2\alpha_0 c_0^y \tan\left(\frac{\pi y}{2}\right), \quad (2.3)$$

де α_0 – префактор закону про потужність;

y – показник закону потужності.

Методи кінцевих або граничних елементів, що переважно використовують в акустиці для числового розв'язання диференціальних рівнянь в часткових похідних, є громіздкими та повільними для моделювання високочастотних хвиль при ультразвуковому очищенні. Це пов'язано з тим, що вони вимагають великої кількості точок та використовують малі часові кроки для мінімізації дисперсії. Для вирішення першої проблеми у k-Wave застосовують псевдоспектральний метод, а для вирішення другої – метод k-space [53]. Відбувається поєднання спектрального обчислення просторових похідних (в даному випадку метод колокації Фур'є) та часового поширювача, що представлений методом k-space.

Стандартний метод кінцевих різниць використовує локальне обчислення градієнтів за значеннями в сусідніх точках сітки, для отримання більш точного значення застосовується поліном вищого порядку до більшої кількості точок. Спектральний метод Фур'є має в своїй основі подібну ідею, але з певними перевагами: амплітуди компонентів Фур'є можна швидко обчислюються із застосуванням швидкого перетворення Фур'є, основні функції є синусоїдальними, це робить можливим використовувати дві точки на довжину хвилі [51].

Хоча спектральний метод Фур'є колокації підвищує ефективність у просторовій області, для обчислення градієнтів у часовій області використовуються звичайні схеми кінцевих різниць. Наприклад, для хвильового рівняння другого порядку для однорідного середовища без втрат [53]

$$\nabla^2 p(x, t) - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (2.4)$$

отримується просте псевдоспектральне рішення на основі просторового перетворення Фур'є з дискретизацією похідної часу, використовуючи точну центральну різницю другого порядку [53]

$$\frac{p(k, t + \Delta t) - 2p(k, t) + p(k, t - \Delta t)}{\Delta t^2} = -(c_0 k)^2 p(k, t), \quad (2.5)$$

де k – хвильовий тривимірний вектор;

Δt – відстань між часовими точками.

Для зменшення помилок в числовому рішенні при кінцевому наближенні різниці тимчасової похідної можна використовувати лише зменшення кроку обчислення. Методи, що відомі, як k -space методи намагаються послабити це обмеження для застосовування більші часові кроки без шкоди для точності. Із точного рішення гомогенного рівняння хвилі без втрат для початкового розподілу тиску [120]

$$\frac{p(k,t+\Delta t)-2p(k,t)+p(k,t-\Delta t)}{\Delta t^2} = -(c_0 k)^2 p(k,t), \quad (2.6)$$

псевдоспектральну схему для співвідношення для перетворення Фур'є похідної обмеженої функції [121]

$$F \left\{ \frac{\partial}{\partial x} f(x) \right\} = -\frac{1}{2\pi} \int f(x) (-ik_x) e^{-ik_x x} dx = ik_x F\{f(x)\} \quad (2.7)$$

можна отримати, зробивши у (1.13) заміну на кінцеву різницю $p(k,t + \Delta t) - 2p(k,t) + p(k,t - \Delta t)$.

Після виконання необхідних перетворень, маємо[120]

$$\frac{p(k,t+\Delta t)-2p(k,t)+p(k,t-\Delta t)}{\Delta t^2 \text{sinc}^2(c_0 k \Delta t/2)} = -(c_0 k)^2 p(k,t) \quad (2.8)$$

При порівнянні псевдо спектральних схем (2.4) та (2.6) отримуємо, що Δt^2 (2.4) можна замінити на $\Delta t^2 \text{sinc}^2(c_0 k \Delta t/2)$ (2.6) для достатньо малих Δt можна

використовувати це наближення, але для більших часових кроків додаткова складова sinc забезпечує отримання точного рішення без чисельної дисперсії.

За допомогою розширення точної псевдоспектральної схеми розв'язування акустичних рівнянь, виражених сполученими частковими диференціальними рівняннями першого порядку, можна отримати шляхом заміни Δt на $\Delta t^2 \text{sinc}^2(c_0 k \Delta t / 2)$ [120]. Оператор

$$k = \text{sinc}(c_{ref} k \Delta t / 2) \quad (2.9)$$

є оператором k -space, де c_{ref} – скаляр швидкості звуку, м/с.

Для масштабних акустичних моделювань, де хвилі можуть поширюватись на відстані сотень або тисяч довжин хвиль, ця, корекція є критично важливою [53]. Без цієї поправки кінцеві наближення різниці часової похідної накопичують фазові помилки, що знижує якість масштабних моделювань. Метод k -space є вільним від дисперсії незалежно від розміру моделювання. Але коли нелінійність, неоднорідні параметри матеріалу або акустичне поглинання включаються до керуючих рівнянь, тимчасова дискретизація за допомогою оператора k -space вже не є точною, однак все одно зменшує чисельну дисперсію [51].

Використання методу Фур'є в k -Wave обумовлене наступними причинами [53]: простота обчислення оператору k -space, коли градієнти обчислюються з використанням основи Фур'є; необхідний часовий крок, для стабільності $N - 1$ для методу Фур'є, де N – кількість точок сітки в кожному декартовому напрямку, заданому розміром домену. Це робить спектральний метод Фур'є менш вибагливим до обчислювальних ресурсів, особливо для масштабних проблем, серед яких і є моделювання ультразвукового очищення, яке вимагає симуляцію на значні відстані порівняно із довжиною хвилі [51].

Отже, для забезпечення точного моделювання за прийнятний час було обрано програмний засіб k -Wave, який дозволяє побудувати складний процес розповсюдження ультразвукової хвилі у гетерогеному середовищі у двовимірних

ти тривимірних координатах із гнучкою можливістю визначення вхідних параметрів моделі, для аналізу поведінки ультразвукової відбитої хвилі для різних типів забруднення, для різних типів поверхні, із врахуванням впливу зважених частинок забруднення у рідині для подальшого формування методу оцінювання перебігу процесу ультразвукового очищення.

2.2 Розповсюдження ультразвукових хвиль у гетерогенному середовищі при ультразвуковому очищенні

Метою моделювання процесу УО є спостереження за зміною ультразвукових відгуків в залежності від перебігу процесу очищення, а саме зміни характеристик забруднення (товщини, густини) та рідини (рівня забрудненості). Проведемо аналітичний аналіз впливу параметрів забруднення та рідини на параметри ультразвукових відгуків.

Очищення в більшості випадків вимагає, щоб забруднення було розчинено (для розчинного забруднення), заміщене (для нерозчинного забруднення) або водночас розчинене і заміщене (для нерозчинних частинок, які утримуються розчинною в'язкою речовиною, такою як олія або жир). Механічний вплив ультразвуку може бути корисним як для прискорення розчинення, так і для витіснення частинок. При видаленні забруднення шляхом розчинення необхідно, щоб розчинник вступив у контакт із забрудненням. Але при цьому процес очищення відбувається лише на межі між рідиною та забрудненням (рис. 2.1, а) та при досягненні насиченого шару між ними припиняється (рис. 2.1, б). Використання ультразвуку дозволяє ефективно витіснити насичений шар, щоб забезпечити новий контакт рідини із забрудненням, яке залишилося видалити (рис. 2.1, в). Це особливо вигідно, коли потрібно очистити нерівні поверхні або внутрішні проходи. Деякі забруднювачі складаються з нерозчинних частинок, що утримуються завдяки іонним силам (рис. 2.1, г). Ультразвукові сили зміщують ці частинки настільки, щоб розірвати існуючі сили (рис. 2.1, д).

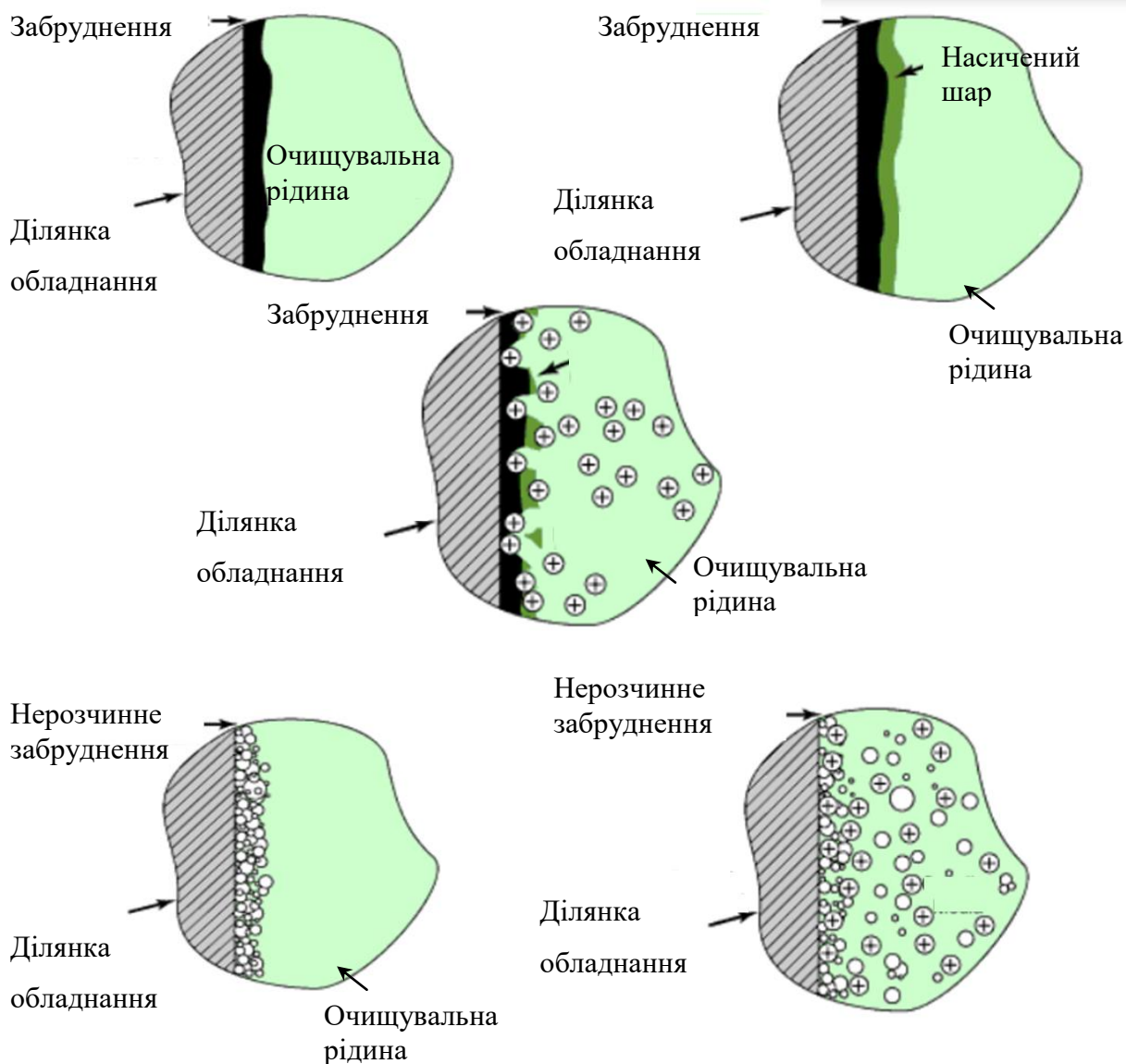


Рис. 2.1. Схематичне зображення ультразвукового очищення шляхом розчинення (а)–(в) та заміщення (г)–(д) бруду [11]

Тому, надалі будемо розглядати процеси моделювання очищення із зменшенням товщини забруднення (розчинення) та зменшенням його густини (заміщення).

Розглянемо ділянку забрудненого обладнання та поглинання і відбиття ультразвукових хвиль на ній (рис. 2.2). Умовно позначимо рідину – Р, забруднення – З та очищуване обладнання – О. Надалі приймаємо, що розглядається обладнання виготовлене з металу зі швидкістю розповсюдження ультразвукової хвилі $c_T = 5900$ м/с та густиною $\rho_T = 7800$ кг/м³, забруднення зі швидкістю розповсюдження ультразвукової хвилі $c_3 = 2500$ м/с та густиною $\rho_3 =$

3100 кг/м³ та рідина зі швидкістю розповсюдження ультразвукової хвилі $c_p = 1500$ м/с та густиною $\rho_p = 1000$ кг/м³.

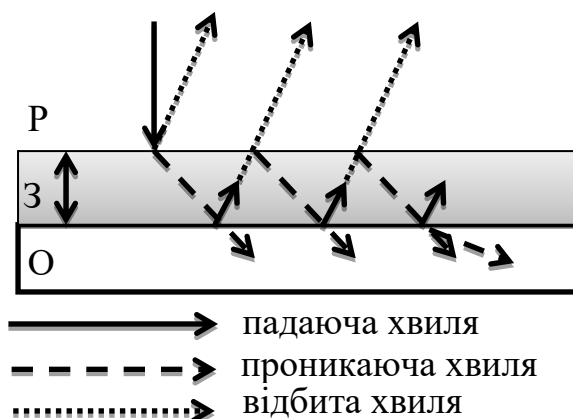


Рис. 2.2. Ділянка забрудненого виробу та заломлення ультразвукових хвиль на ній

Якщо товщина забруднення значна, то ультразвукові хвилі падають на межу з подвійною поверхнею. На межі «Р-З» частина хвилі буде відбиватися в шар «Р», а частина потрапляє в шар «З». Проходячи шар «З» промінь частково потрапляє в шар «О», а частково відбивається. Цей процес відбувається послідовно. В результаті між «Р» та «О» виникають відбиті хвилі, що рухаються в обох напрямках. До того ж є ймовірність інтерференції між проникаючими та відбитими хвилями, що буде визначатися різницею фаз. При цьому при товщині шару «З» кратного половині довжині хвилі, отримуємо максимальну передачу ультразвукової енергії, при товщині кратній чвертині хвилі - передача ультразвукової енергії буде мінімальна.

Оскільки товщина «З» постійно зменшується довільним способом, то в наслідку інтерференції можливі стрибкоподібні зміни амплітуди відбитого сигналу, що буде зафіксована датчиком. В загальному ж випадку втрата інтенсивності сигналу визначається показниковою залежністю [122]

$$I(x) = I_0 e^{-2\alpha x} \quad (2.10)$$

де I_0 – інтенсивність звукової хвилі на вході у матеріал, Вт/м²;

α – значення коефіцієнта ослаблення, 1/м;

x – відстань, м.

Значення коефіцієнта ослаблення α істотно залежить від частоти ультразвукової хвилі. Тобто на фінальних стадіях очищення буде спостерігатися більш значна зміна інтенсивності сигналу, ніж на початкових, оскільки буде відбуватися зміна властивостей меж.

Отже, при падінні частина енергії відбивається, а частина проходить в інший шар. Кути падіння та відбиття однакові, а кут проникаючої хвилі залежить від швидкості звука в обох середовищах. Співвідношення інтенсивності відбитої та проникаючої хвилі розраховується за співвідношенням Релея для ідеального випадку (плоскої границі, що не має нерівностей), але оскільки для ультразвукового очищення це не характерно, то розглянемо випадок нормального падіння хвилі на межу розділу середовищ. Значення коефіцієнта відбиття за амплітудою визначається наступним виразом [122]

$$\Gamma_{12} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}, \quad (2.11)$$

де ρ_1, c_1, ρ_2, c_2 – відповідно, густина виробу (кг/м^3) та швидкість ультразвуку (м/с) для 1 та 2 середовища.

Для різних переходів при ультразвуковому очищенні $\Gamma_{pz} = 0,68, \Gamma_{zo} = 0,71, \Gamma_{po} = 0,94$. Тобто для чистого виробу спостерігається відбиття 0,94 частини початкової хвилі, для забрудненого 0,68 (відбиття від очищуваного виробу при наявному забрудненні визначається з урахуванням того, що відбувається проникнення замість відбиття на межі «Р-З» та «З-О», $(1-0,68) \cdot 0,71 \cdot (1-0,68) = 0,072$ – менше на порядок).

Тоді, значення коефіцієнта відбиття за інтенсивністю визначається наступним виразом [122]

$$\Gamma_I = \left(\frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \right)^2, \quad (2.12)$$

Таким чином, з (2.10) маємо значення для інтенсивності відбитого сигналу

$$I(x) = I_0 e^{-2\alpha x} \left(\frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \right)^2, \quad (2.13)$$

Отже, інтенсивність відбитого сигналу буде істотно залежати від товщини забруднення x , оскільки параметр α є постійною, що залежить від середовища, а початкова інтенсивність I_0 має також постійне значення. Іншим вагомим чинником буде мати співвідношення густин забруднення та очищуваного виробу та швидкостей розповсюдження ультразвуку в них (складова $\left(\frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \right)^2$). Враховуючи, що значення забруднення наведена залежність є експоненційною, то товщина забруднення x , що входить до ступеня експоненти буде мати більший вплив, ніж співвідношення густин забруднення та очищуваного виробу. Повне очищення буде призводити до значної зміни показників датчиків, оскільки змінюється співвідношення меж (на цій стадії буде лише межа рідини та очищуваного виробу).

2.3 Дослідження параметрів ультразвукових відгуків при різних характеристиках забруднення та очищуваного виробу в процесі ультразвукового очищення

На початковому етапі розглянемо, як змінюються ультразвукові відгуки для випадку зменшення високощільного забруднення через поетапне зменшенням товщини забруднення. Початкові умови експерименту наступні:

- двовимірне поле розмірністю 216x216 із розміром комірок $50 \cdot 10^{-3}$ м в обох напрямках;

- очищувальне середовище визначається наступними параметрами: густина та швидкість розповсюдження ультразвуку, відповідно, $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ та $c = 1500 \text{ м/с}$, що відповідає значенням параметрів води;
- очищуваний виріб також визначається за допомогою густини та швидкості розповсюдження ультразвуку, відповідно, $\rho_T = 7800 \text{ кг/м}^3$ та $c_T = 5900 \text{ м/с}$, що є параметрами заліза;
- густина та швидкості розповсюдження ультразвуку для забруднення, відповідно, $\rho_3 = 3100 \text{ кг/м}^3$ та $c_3 = 2500 \text{ м/с}$, що відповідає корозії металу;
- розташування обладнання, забруднення, випромінювача та датчика продемонстровано на рис. 2.3.

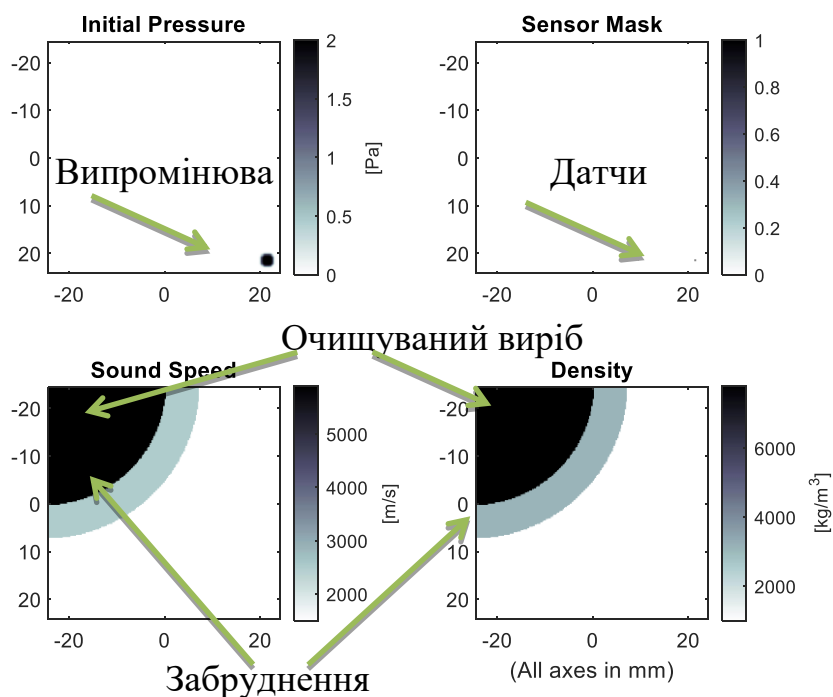


Рис. 2.3. Початкові умови експерименту

Всі параметри в пакеті k-Wave задаємо за допомогою відповідних змінних та викликаємо функцію `kspaceFirstOrder2D` (`kgrid`, `medium`, `source`, `sensor`, `input_args{:}`) (Додаток А), яка симулює поширення часових областей компресійних хвиль через двовимірне гомогенне або гетерогенне акустичне середовище, що задається чотирма вхідними структурами: параметри обчислювальної сітки, параметри середовища, характеристики джерела випромінювання та датчиків. Розрахунок базується на методі k-space першої ланки,

який враховує закон поглинання потужності та неоднорідну швидкість та густину звуку [53]. На кожному часовому кроці параметри акустичного поля у положеннях, визначених структурою датчика, записуються та зберігаються. Нізотропний поглинаючий прикордонний шар, який називається ідеально узгодженим шаром (PML), реалізований для запобігання повторному введенню хвиль, які залишають одну сторону домену з протилежного боку. Це дозволяє обчислювати нескінченне моделювання домену за допомогою невеликих обчислювальних сіток.

Моделювання задавалось у циклі із поступовим зменшенням товщини забруднення (рис. 2.4).

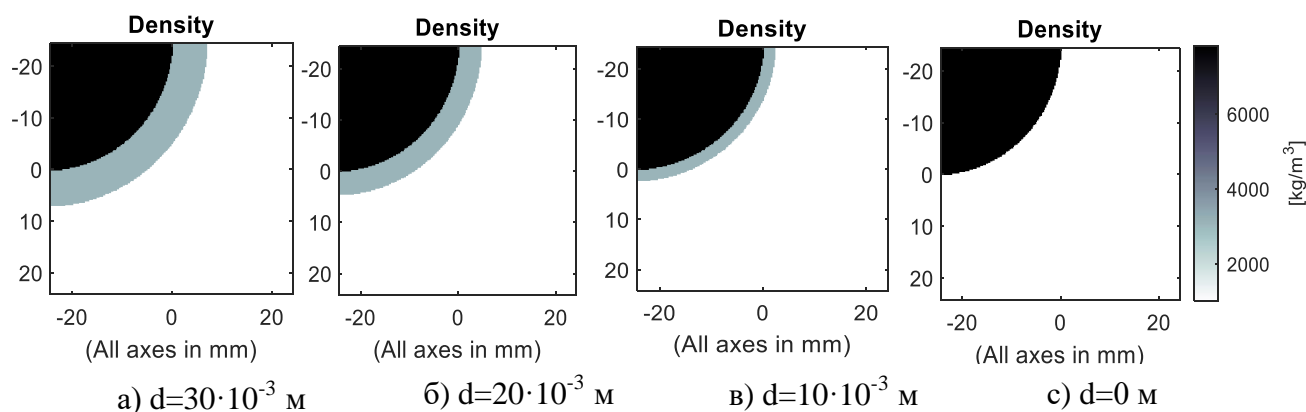


Рис. 2.4. Демонстрація зменшення товщини забруднення

Графічна ілюстрація процесу розповсюдження хвилі показує, що окрім основної хвилі, що продукується джерелом, відбувається часткове відзеркалення у двох місцях: спочатку від забруднення, а потім вже від обладнання (рис. 2.5).

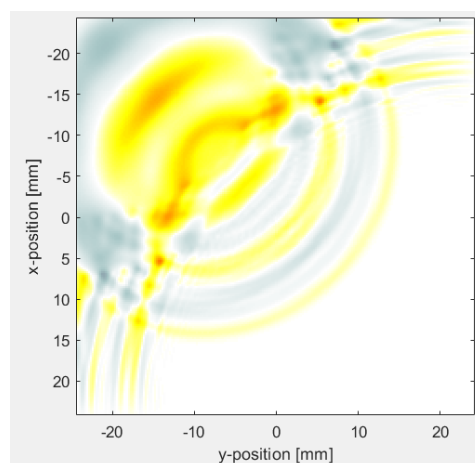


Рис. 2.5. Моделювання поля тиску при обробці виробу із забрудненням

Проаналізуємо сигнали, що зафіксовані датчиком для різної товщини забруднення виробу – рис. 2.6. Параметр, що демонструє постійне збільшення, – це час надходження сигналу. Так, на першому кроці при максимальній забрудненості він складає $44 \mu\text{s}$, на другому – $46 \mu\text{s}$, на третьому – $49 \mu\text{s}$ та для повністю очищеного виробу – $52 \mu\text{s}$.

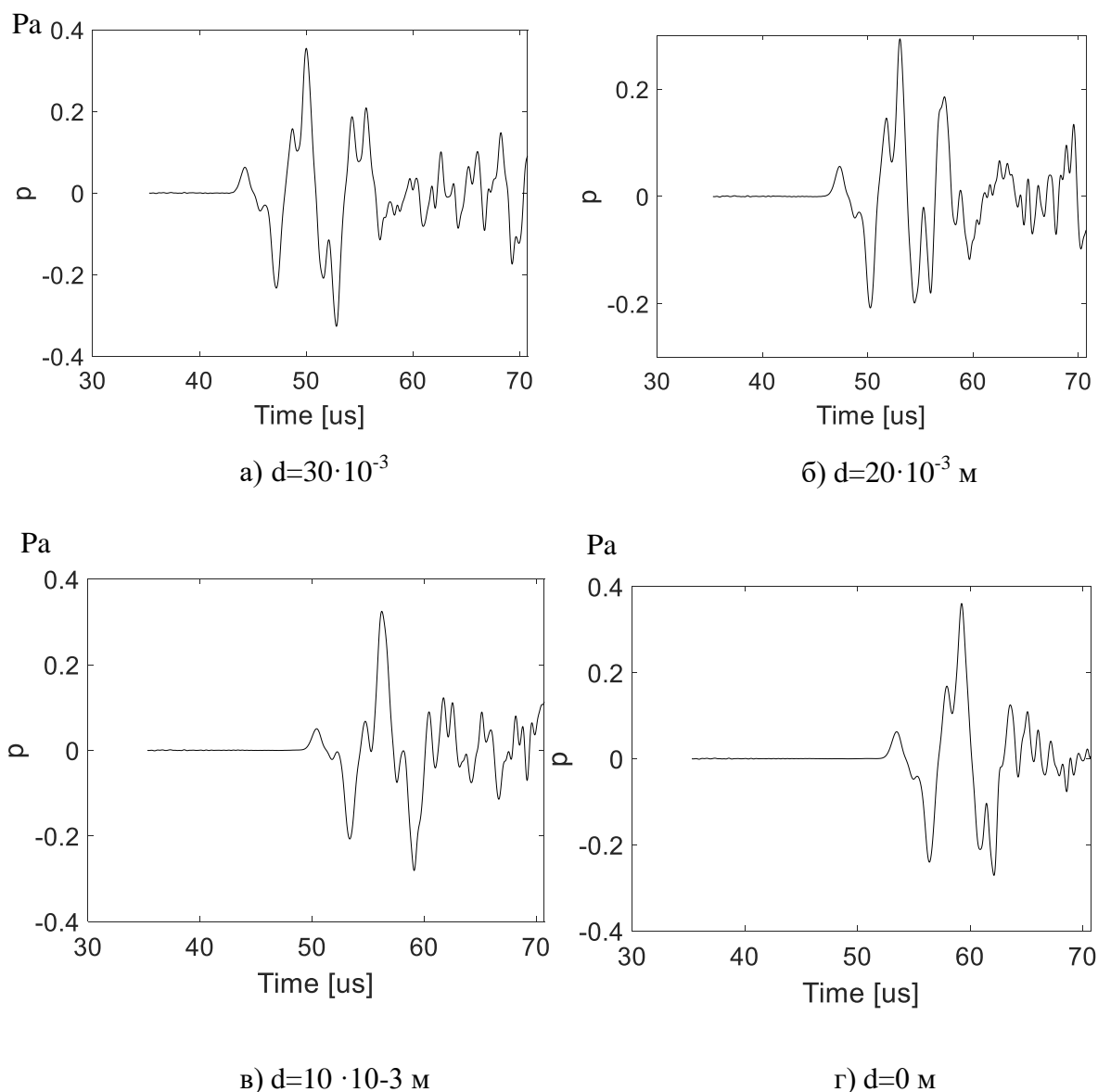


Рис. 2.6. Значення акустичного тиску при обробці забрудненого виробу з густиною забруднення $\rho_3 = 3100 \text{ кг/м}^3$, швидкістю УЗ хвиль $c_3=2500 \text{ м/с}$ (чистий виріб з густиною $\rho_T = 7800 \text{ кг/м}^3$ та швидкістю УЗ хвиль $c_T=5900 \text{ м/с}$), d – товщина забруднення

Також змінюється значення максимальної та мінімальної амплітуд. При максимальному забрудненні товщиною $d=30 \cdot 10^{-3}$ м (рис. 2.6, а) максимальна

амплітуда акустичного коливання складає 0,35 Па, мінімальна – 0,33 Па, кількість сплесків, що за амплітудою перебільшують 0,2–5. При зменшенні товщини забруднення до $d=20 \cdot 10^{-3}$ м (рис. 2.6, б) максимальна амплітуда акустичного коливання вже 0,29 Па, мінімальна: -0,2 Па, кількість сплесків, що за амплітудою перебільшують 0,2 – 2. При товщині забруднення до $d=10 \cdot 10^{-3}$ м (рис. 2.6, в) максимальна амплітуда акустичного коливання вже 0,32 Па, мінімальна: -0,28 Па, кількість сплесків, що за амплітудою перебільшують 0,2–3. І, нарешті для очищеного обладнання, спостерігаємо максимальну амплітуду акустичного коливання 0,35 Па, мінімальну: -0,26 Па, кількість сплесків, що за амплітудою перебільшують 0,2–3. Відповідно, різниця між максимальним та мінімальним значенням амплітуди складає поетапно: I–0,68 Па, II–0,49 Па, III–0,6 Па, IV–0,61 Па.

Отже, при забрудненні значної густини в процесі очищення спочатку відбувається зменшення амплітуди та різниці між максимальним та мінімальним значенням, а потім відбувається збільшення. Подібна ситуація і щодо кількості амплітудних сплесків. Час надходження сигналу демонструє стабільне передбачуване збільшення.

Розглянемо випадок, коли зменшується не товщина забруднення, а його густина, оскільки це може суттєво вплинути на показники датчиків. Початкові умови експерименту визначені аналогічно попередньому підрозділу, але очищення моделюватиметься не шляхом зменшення товщини, а через зменшення густини забруднення (Додаток А). Початкова густина та швидкість розповсюдження ультразвуку для забруднення, відповідно, $\rho_3 = 3100 \text{ кг/м}^3$ та $c_3 = 2500 \text{ м/с}$. Рівномірними кроками ці значення зменшуються до відповідних значень рідини $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ та $c = 1500 \text{ м/с}$ (рис.2.7).

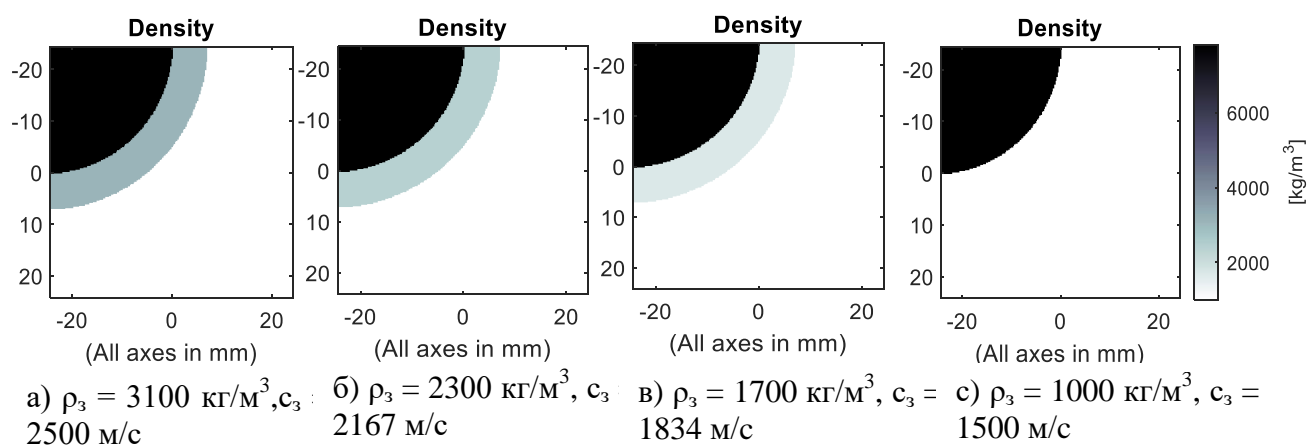


Рис. 2.7. Зменшення густини забруднення в процесі ультразвукового очищення

В результаті проведеного моделювання отримані значення акустичного тиску, що продемонстровано на рис. 2.8.

У випадку моделювання очищення шляхом зменшення густини забруднення не спостерігається стійке збільшення часу надходження сигналу, а простежується коливання значення максимальної амплітуди (на I етапі–0,33 Па, на II етапі–0,29 Па, на III–0,31Па) із досягненням максимуму для повністю очищеного виробу (0,35). Також для чистого обладнання характерно менше амплітудних сплесків порівняно із забрудненим.

Отже, при очищенні обладнання відбуваються суттєві зміни в віддзеркаленому ультразвуковому сигналі, як за зменшенням товщини забруднення, так і за зменшенням густини.

Для визначення загального напрямку зміни сигналу змодельюємо випадок очищення обладнання складнішої конфігурації, щоб визначити вплив геометричних особливостей, що відкриваються при відшаруванні бруду.

Розглянемо дві більш складні за конфігурацією ділянки обладнання: круговий та астроїдальний сектори з отворами (Додаток А). Зміна товщини забруднення для обох випадків приведена на рис. 2.9.

Наявність геометричних особливостей змінює картину акустичного тиску, що виникає в процесі очищення: постійне зростання часу надходження сигналу, характерне для попереднього моделювання, зберігається на початковій стадії очищення (рис.2.10, а – рис. 2.10,в), але припиняється на стадії очищення отвору

(рис.2.10, г): значення часу надходження сигналу не змінюється, але суттєво змінюється час надходження максимальної амплітуди (з 58 до 67 μs).

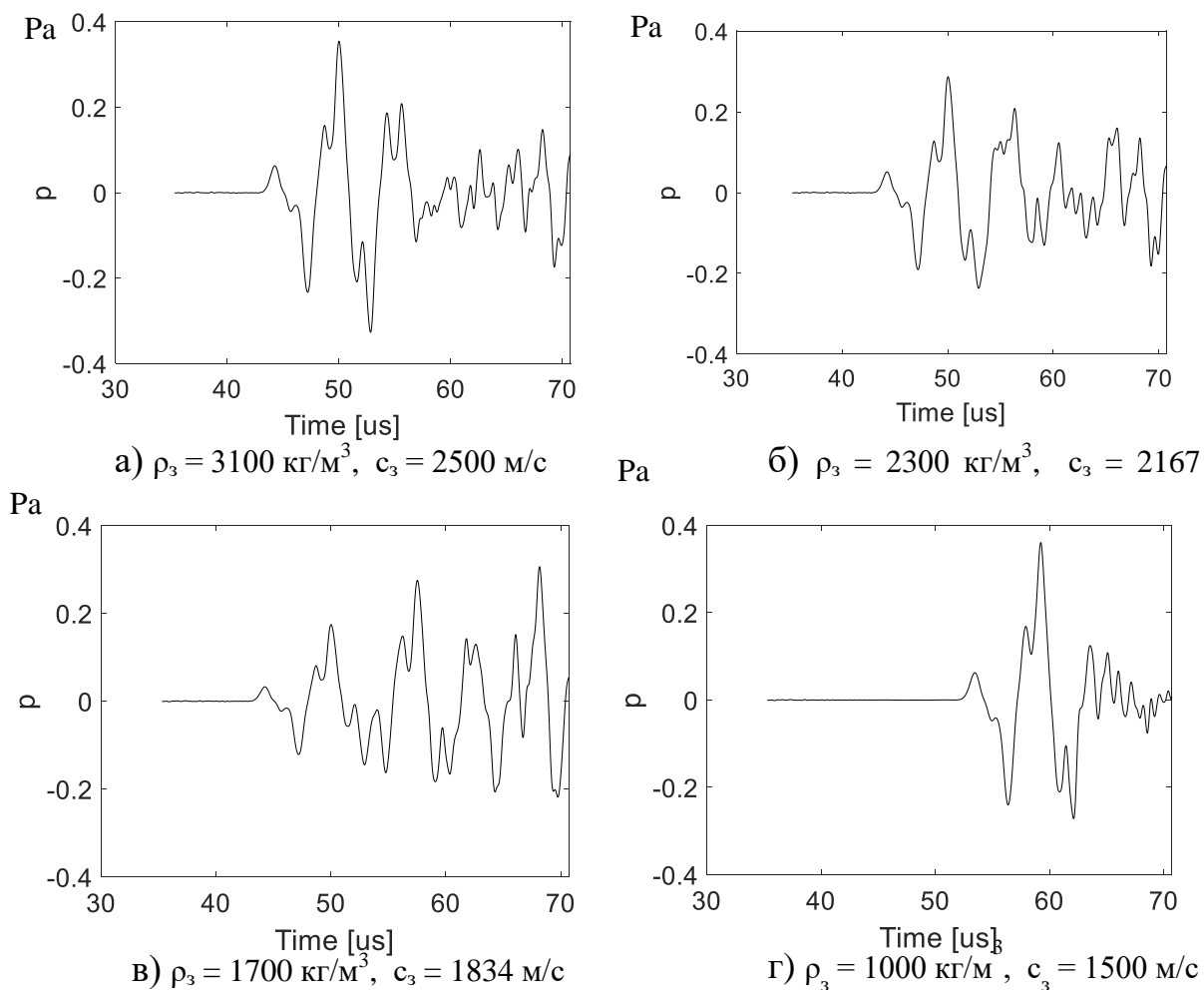


Рис. 2.8. Значення акустичного тиску при обробці забрудненого обладнання з товщиною забруднення $d=30 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ із густиною забруднення ρ_3 та швидкістю розповсюдження ультразвуку c_3 (чистий виріб з густиною $\rho_0 = 7800 \text{ кг/м}^3$ та швидкістю УЗ хвиль $c_0=5900 \text{ м/с}$)

Таким чином, аналіз максимальної амплітуди та часу надходження порогового значення сигналу не є визначальними параметрами для оцінки стану перебігу процесу очищення. Тому виникає необхідність застосувати більш складний аналіз даних, наприклад спектральний розклад.

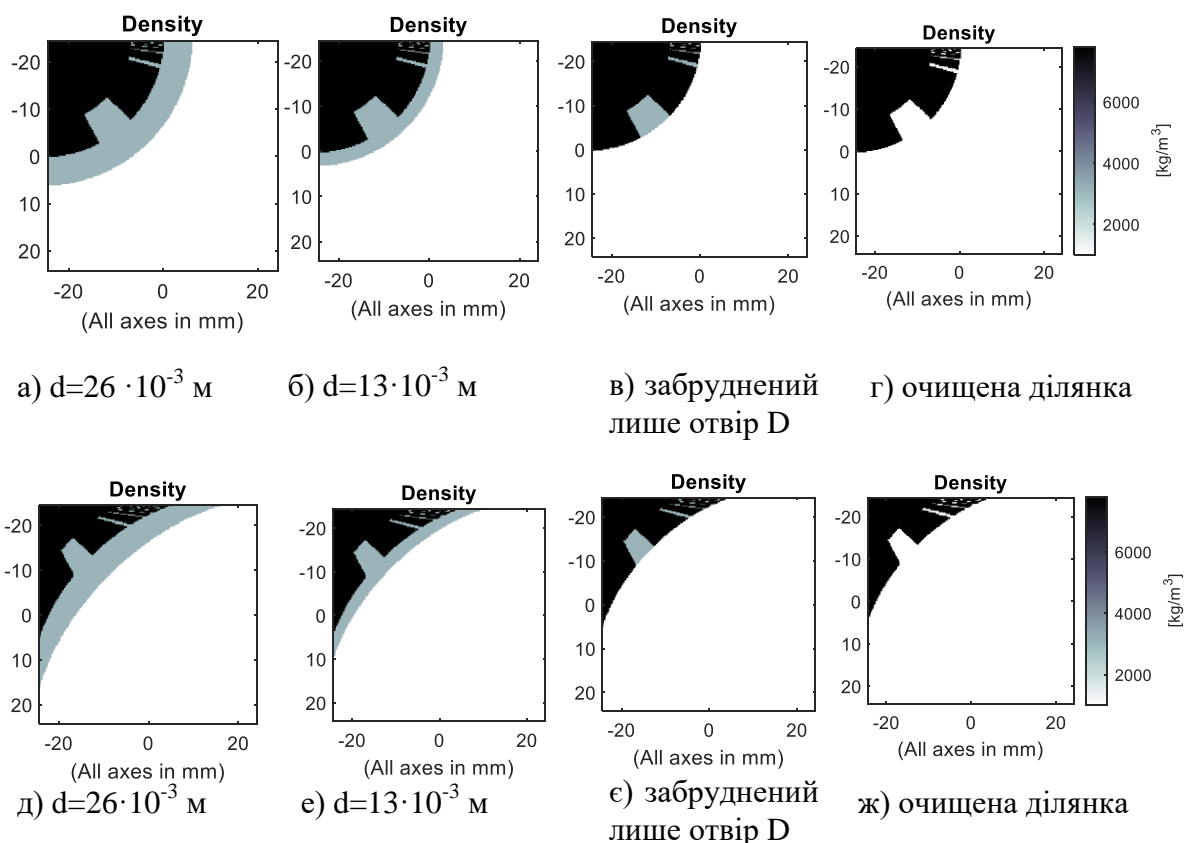


Рис. 2.9. Зміна товщини забруднення густиною $\rho_3 = 3100 \text{ кг/м}^3$ зі швидкістю УЗ хвиль $c_3=2500 \text{ м/с}$ в процесі очищення обладнання ($\rho_T = 7800 \text{ кг/м}^3$ та швидкістю УЗ хвиль $c_T=5000 \text{ м/с}$) з геометричними особливостями (отвір діаметром $D = 30 \cdot 10^{-3}$ м), d – товщина забруднення

При очищенні виробу астроїдальної форми рис. 2.11 спостерігається зміна акустичного тиску подібно до кругового виробу з отвором. Так на початкових етапах спостерігається зростання часу надходження сигналу: $d=26 \cdot 10^{-3}$ м – 55 μs ; $d=13 \cdot 10^{-3}$ м – 59 μs ; забруднений лише отвір – 60 μs . Але при очищенні отвору час не змінюється. Щодо максимальної амплітуди, то збільшення спостерігається на всіх етапах, окрім фінального очищення отвору.

Отже, особливості поверхні виробу при очищенні здатні суттєво змінювати акустичний відгук, що треба врахувати при формуванні оцінки перебігу процесу очищення.

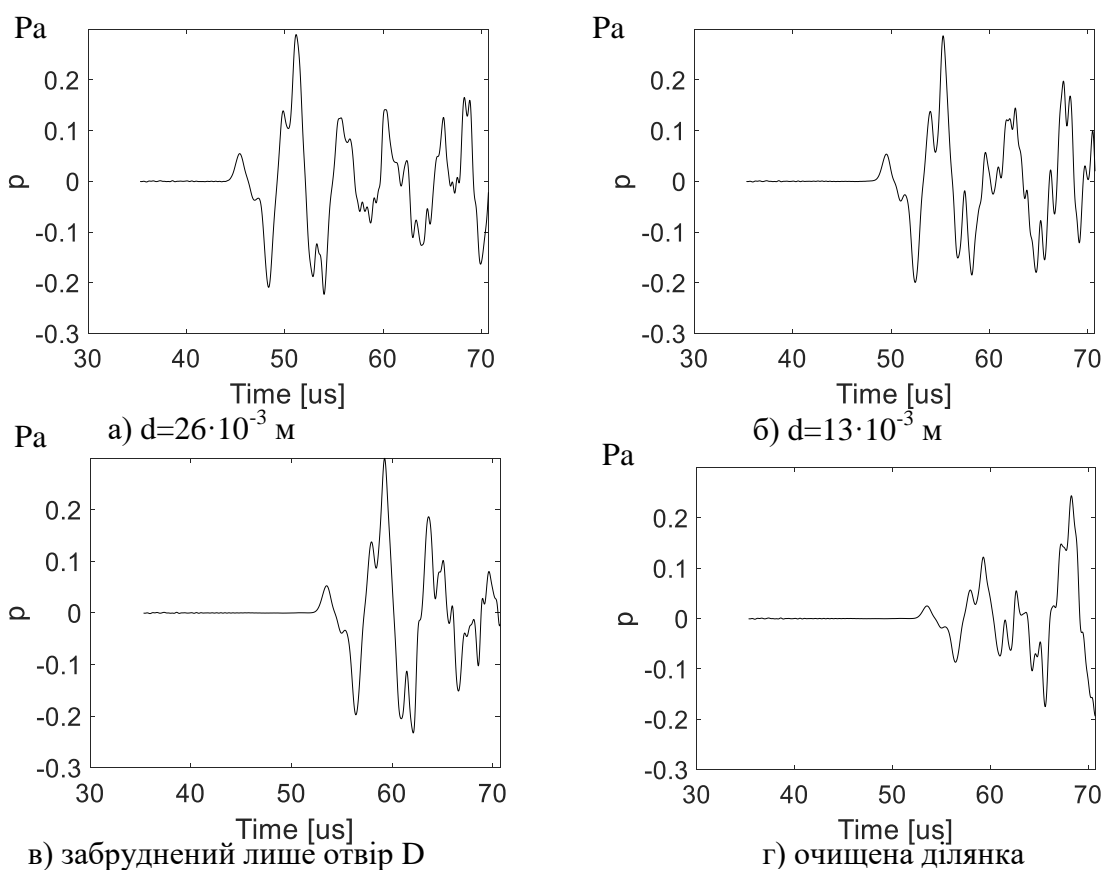


Рис. 2.10. Значення акустичного тиску при зміні товщини забруднення густиною $\rho_3 = 3100 \text{ кг/м}^3$ зі швидкістю УЗ хвиль $c_3=2500 \text{ м/с}$ в процесі очищення обладнання ($\rho_T = 7800 \text{ кг/м}^3$ та швидкістю УЗ хвиль $c_T=5000 \text{ м/с}$) (рис. 2.9, а–г) з геометричними особливостями (отвір діаметром $D = 30 \cdot 10^{-3} \text{ м}$), d – товщина забруднення

Таким чином, на основі даних, що надходять на датчик можна зробити висновок про перебіг ультразвукового очищення та необхідність продовжувати його[51]. Є сенс продовжувати процес до того часу, доки зростає час надходження сигналу або спостерігається зміна максимальної амплітуди чи різниці між максимальним та мінімальним значенням амплітуди. Кількість значних амплітудних сплесків також може стати основою для визначення наближення фінальної стадії очищення.

Окрім того, що важливим моментом є зміна сигналу у процесі очищення, також значним є зв'язок між розташуванням датчика та забруднення. Оскільки

аналіз досліджень, що наведено у розділі 1, свідчить про просторово розподілений характер процесу ультразвукового очищення, то гіпотетично існує чітка залежність між зміною сигналу датчика та його позицією відносно забруднення, що відшаровується.

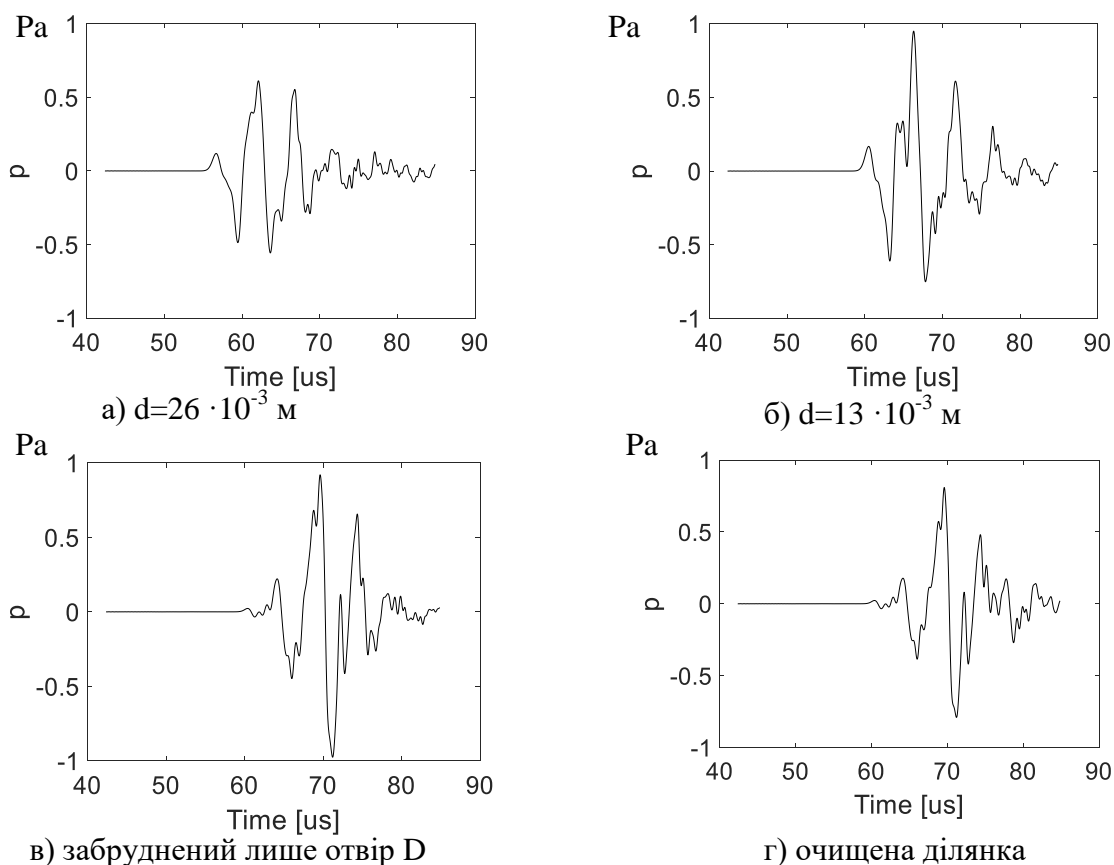


Рис. 2.11. Значення акустичного тиску при зміні товщини забруднення густиною $\rho_3 = 3100 \text{ кг/м}^3$ зі швидкістю УЗ хвиль $c_3=2500 \text{ м/с}$ в процесі очищення виробу ($\rho_T = 7800 \text{ кг/м}^3$ та швидкістю УЗ хвиль $c_T=5000 \text{ м/с}$) (рис.2.9, д–ж) з геометричними особливостями (отвір товщиною $D = 30 \cdot 10^{-3}$ м), d – товщина забруднення

Для підтвердження такого явища розглянемо моделювання у тривимірному просторі із використанням 4 ультразвукових датчиків (Додаток А).

Процес ультразвукового очищення симулюється при наступних початкових умовах:

- тривимірне поле розмірністю $64 \times 64 \times 64$ із розміром комірок 10^{-3} м в усіх напрямках;

- очищувальне середовище визначається наступними параметрами: густина та швидкість розповсюдження ультразвуку, відповідно, $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ та $c = 1500 \text{ м/с}$, що відповідає значенням для води;

- очищуване обладнання також визначається за допомогою густини та швидкості розповсюдження ультразвуку, відповідно, $\rho_T = 7800 \text{ кг/м}^3$ та $c_T = 5900 \text{ м/с}$, що є параметрами заліза;

- густина та швидкості розповсюдження ультразвуку для забруднення, відповідно, $\rho_3 = 3100 \text{ кг/м}^3$ та $c_3 = 2500 \text{ м/с}$, що відповідає параметрам корозії металу;

Об'єкт очищення знаходиться в центрі ємності та має вигляд астроїдального циліндру з радіусом $150 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ та висотою $440 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ із забрудненням на одній із сторін (рис. 2.12, а), датчики знаходяться на кожній з бокових сторін ємності по центру (рис. 2.12, б). Чотири точкових джерела ультразвуку знаходяться на дні ємності на однакових відстанях від центру (рис. 2.12, в). Початкова товщина забруднення склала $12 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, на наступному етапі - $6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Останніми розглядалися ультразвукові відгуки для повністю очищеного виробу (Додаток А).

Сигнали, зафіксовані датчиками наведено на рис. 2.13 – для товщини забруднення $d=12 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, на рис. 2.14 – для товщини забруднення $d=6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ та на рис. 2.15 – для повністю очищеного виробу. Найближче до забрудненої ділянки обладнання знаходяться датчики 3 та 4. При максимальній товщині це чітко простежується на отриманих відгуках.

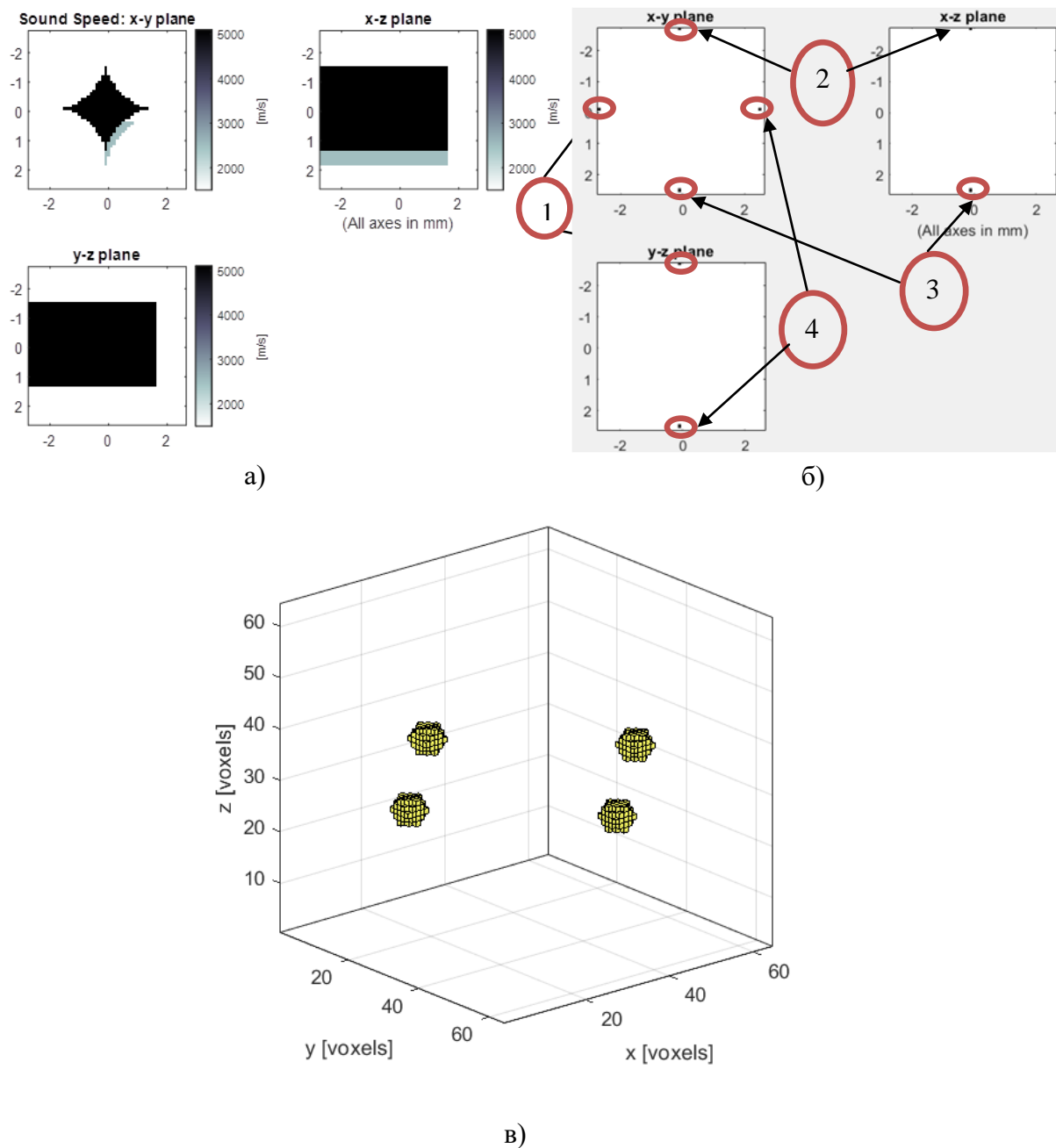


Рис. 2.12. Початкові умови моделювання а) об'єкт, що очищується з густиною $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ та швидкістю УЗ хвиль $c=5900 \text{ м/с}$, забруднення з густиною $\rho = 3100 \text{ кг/м}^3$, швидкістю УЗ хвиль $c=2500 \text{ м/с}$; б) розташування датчиків; в) джерела ультразвукових хвиль [27]

Так на рис. 2.13 видно, що сигнали датчиків 1 та 2 майже не відрізняються, в той час як сигнали 3 та 4 мають меншу амплітуду та менше суттєвих (більше 0,1 Па) амплітудних відхилень.

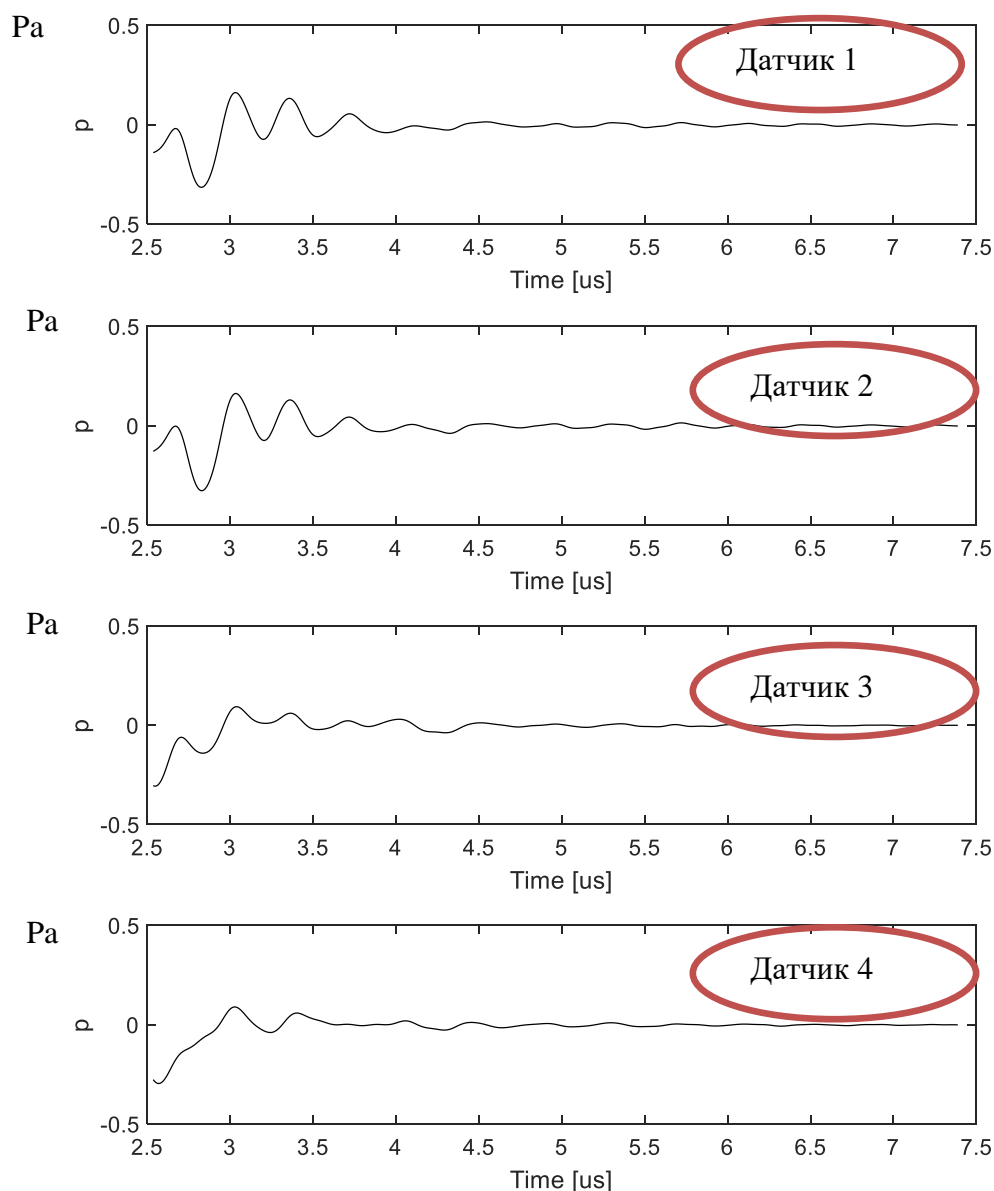


Рис. 2.13. Результати вимірювань акустичного тиску датчиками при моделюванні процесу ультразвукового очищення для товщини забруднення

$$d=12 \cdot 10^{-3} \text{ м [27]}$$

Під час зменшення товщини забруднення значення амплітуди відхилень тиску, зафіксованої датчиком 3, зростає більше, ніж значення відповідної амплітуди, зафіксованої датчиком 4 (рис. 2.14), в той час як значення інших датчиків залишаються постійними. Це пов'язано з відстанню від датчиків до забрудненої ділянки, адже 4 датчик є ближчим до неї, ніж 3. І у випадку повністю очищеного виробу маємо максимальні амплітуди для сигналів, що були зафіксовані 3 та 4 датчиками у всьому процесі очищення (рис.2.15) і до того ж всі

сигнали стають однаковими, що пов'язано із симетрією розташування датчиків відносно очищуваного обладнання.

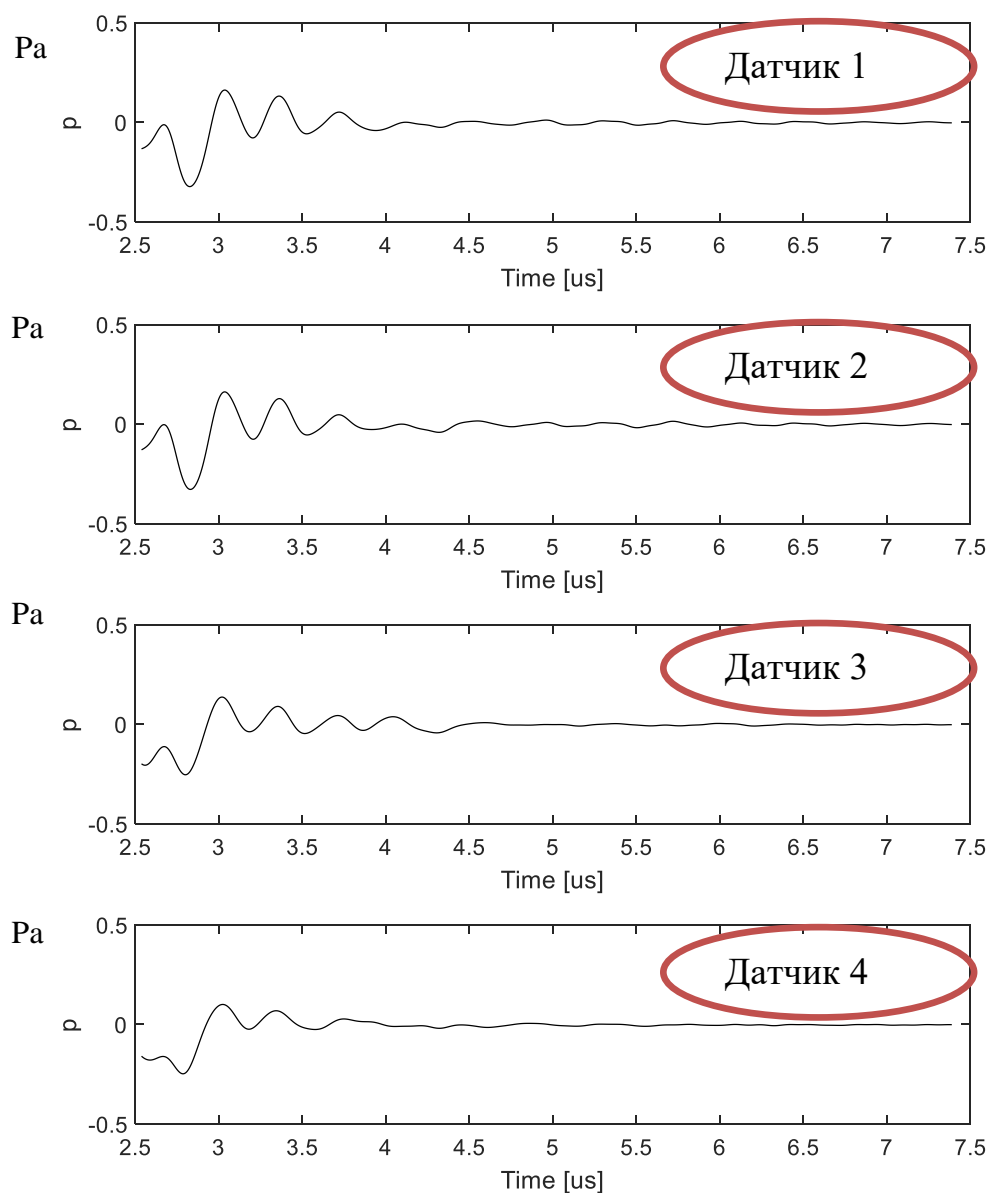


Рис. 2.14. Результати вимірювань акустичного тиску датчиками при моделюванні процесу ультразвукового очищення для товщини забруднення

$$d=6 \cdot 10^{-3} \text{ м [27]}$$

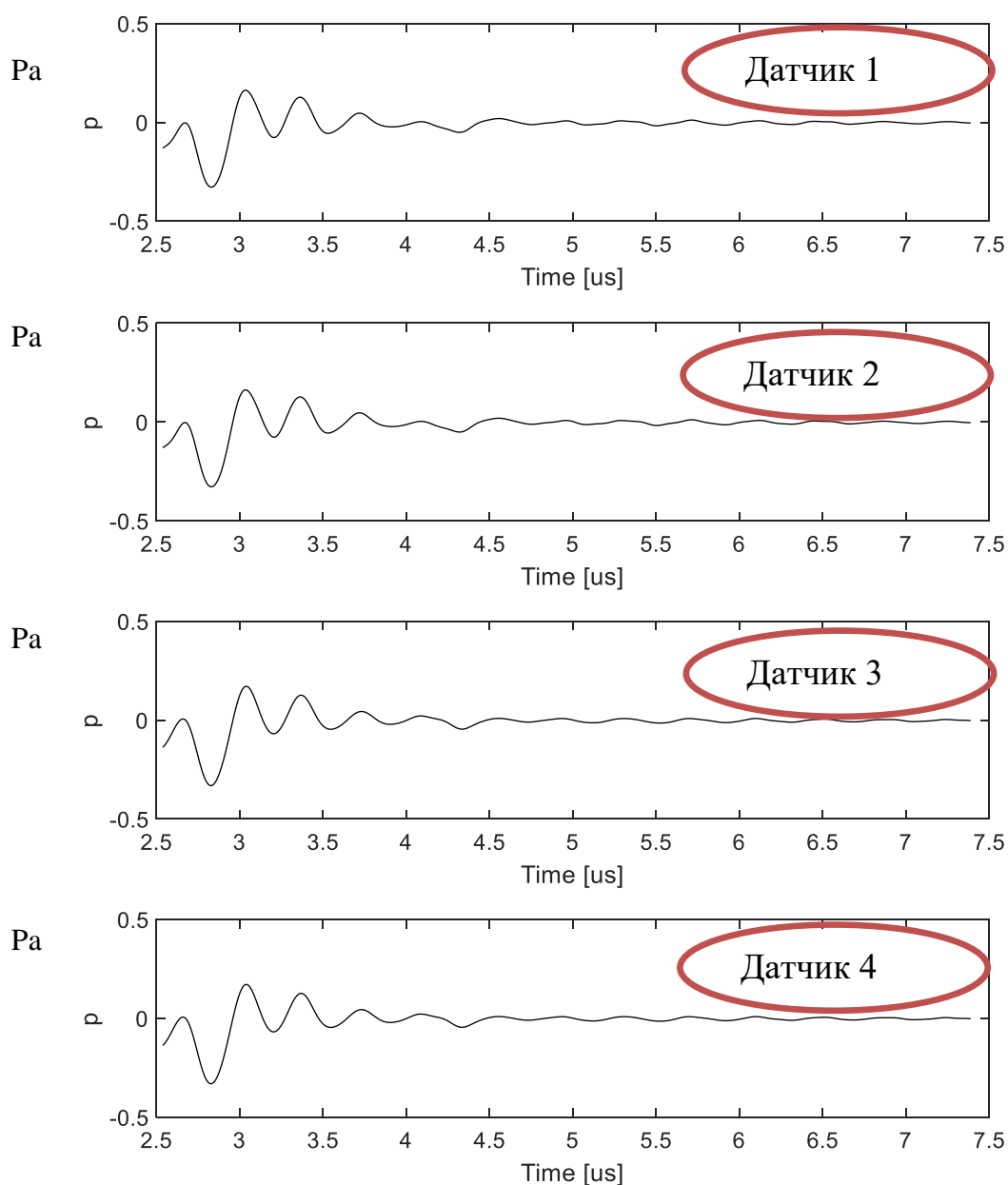


Рис. 2.15. Результати вимірювань акустичного тиску датчиками при моделюванні процесу ультразвукового очищення для повністю очищеного обладнання [27]

Отже, наявність забруднення найбільше впливає на зміни акустичного тиску того датчика, який знаходиться найближче до нього і найменше впливає на віддалені датчики. Це підтверджує доцільність використання саме ультразвукових вимірювань під час формування оцінки стану перебігу ультразвукового очищення

та розробку управління процесом очистки цілеспрямовано із врахуванням цього фактору [27].

2.4 Дослідження наявності впливу зважених частинок забруднення у рідині на процес очищення

Шляхом моделювання встановлено залежність між перебігом процесу очищення та такими параметрами ультразвукового відгуку, як час повернення сигналу, значення головної амплітуди сигналу та додаткових гармонік. Враховуючи наявність, як мінімум трьох меж різних середовищ (рідина – забруднення, забруднення – обладнання, забруднення - рідина), на яких відбувається заломлення та віддзеркалення ультразвукових хвиль, то це є складним процесом множинного розсіювання. У загальному випадку таких меж може бути більше за рахунок різної густини забруднення та його неоднорідної структури. При цьому в процесі очищення відбувається досягнення певного максимального числа меж різних середовищ, після чого їхня кількість спадає. В ультразвукових відгуках спостерігається збільшення нелінійної складової до певного значення із наступним скороченням до мінімального для повністю очищеного обладнання та збільшенням, коли починають очищуватись незначні нерівності та отвори на поверхні виробу. Тобто спостерігається погіршення однорідності механічної структури поверхні обладнання внаслідок порушення шару бруду та покращення, коли виріб буде повністю очищено.

Дослідження [73, 80, 81] доводять ефективність використання коефіцієнтів акустичної нелінійності другого або третього порядків для оцінювання нелінійності структури матеріалу

$$\beta_2 = \frac{8A_2}{k^2 \chi A_1^2} = \frac{2c^2 A_2}{\pi^2 f^2 \chi A_1^2}, \quad (2.14)$$

$$\beta_3 = \frac{24A_3}{k^3 \chi A_1^3} = \frac{3c^3 A_3}{\pi^3 f^3 \chi A_1^3}, \quad (2.15)$$

де β_2 – коефіцієнт нелінійності ультразвуку 2-го порядку;

β_3 – коефіцієнт нелінійності ультразвуку 3-го порядку;

A_1, A_2, A_3 – амплітуди головної, першої та другої гармонік, м;

χ – відстань до випромінювача, м;

f – частота ультразвуку, Гц;

c – швидкість ультразвуку м/с;

k – хвильовий вектор, м⁻¹.

У випадку ультразвукового очищення, враховуючи сталість значень більшості параметрів, будемо використовувати відносні параметри акустичної нелінійності

$$\beta_2 = \frac{A_2}{A_1^2}, \quad (2.16)$$

$$\beta_3 = \frac{A_3}{A_1^3}, \quad (2.17)$$

У випадку ультразвукового очищення процес визначення перебігу очищення буде залежати не лише від зміни параметрів очищеного обладнання, але і від зміни властивостей рідини за рахунок появи у ній зважених частинок твердої фази забруднення.

В процесі очищення в рідину потрапляють частинки бруду, що значно корегує процес загасання та розсіювання ультразвукових хвиль. Розсіювання хвиль на частинках забруднення буде суттєвим, якщо довжина хвилі λ порівняна з розмірами самих частинок. У випадку, коли хвиля буде проходить через середовище з великою кількістю хаотично розташованих частинок, фази хвиль,

що розсіюються у заданому напрямку та надходять від хаотично розташованих центрів, є некогерентними [123]. Тому повна інтенсивність ультразвукової хвилі в заданій точці дорівнює сумі інтенсивностей хвиль, від усіх центрів розсіювання. Тоді перетини розсіювання будуть адитивними, а лінійні коефіцієнти поглинання $\Sigma_-(\lambda)$ та розсіювання $\Sigma_S(\lambda)$ визначаються [123]

$$\Sigma_-(\lambda) = n\sigma_c(\lambda), \Sigma_S(\lambda) = n\sigma_S(\lambda), \quad (2.18)$$

де n – концентрація частинок, кг/м³;

$\sigma_c(\lambda)$ и $\sigma_S(\lambda)$ – значення повних перерізів поглинання та розсіювання акустичної хвилі на частинці.

Повні перетини поглинання та розсіювання залежать від довжини хвилі та розміру частинки r .

Основна характеристика поля випромінювання ультразвуку $I_\lambda(\vec{r}, \vec{\Omega})$ визначається з кінетичного рівняння. Кінетичне рівняння, розв'язок якого $I_\lambda(\vec{r}, \vec{\Omega})$ отримується через визначення енергетичного балансу в елементарному об'ємі фазового простору [71]

$$\vec{\Omega} \nabla I_\lambda(\vec{r}, \vec{\Omega}) = -\Sigma(\lambda) I_\lambda(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \int d\Omega' \Sigma_S(\vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) I_\lambda(\vec{r}, \vec{\Omega}') + S_\lambda(\vec{r}, \vec{\Omega}), \quad (2.19)$$

де $S_\lambda(\vec{r}, \vec{\Omega})$ – функція густини випромінювання ультразвуку, що визначає середній розмір енергії в одиницю часу одиничним фазовим об'ємом;

$$\Sigma_S(\vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}') = n\sigma_S(\vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}'),$$

де $\sigma_S(\vec{\Omega} \rightarrow \vec{\Omega}')$ – диференційне за кутами розсіювання енергії на частинках твердої фази. Фазові координати у даному випадку це сукупність змінних r та Ω , а елементарний фазовий об'єм – $d\vec{r} \cdot d\vec{\Omega}$.

Отже, зміна інтенсивності ультразвукового пучка з напрямом $\vec{\Omega}$, в точці \vec{r} , відбувається за рахунок поглинання та розсіювання (перший доданок у правій частині) потоку енергії, що мала напрям $\vec{\Omega}'$, у напрямку $\vec{\Omega}$ (другий доданок у правій частині) та за рахунок енергії, що надходить в цей пучок з випромінювачів (останній доданок правої частини). В інтегральному вигляді рівняння (2.19) виглядає як

$$I_\lambda(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \int d\vec{r}' \int d\vec{\Omega}' \sum_s (\vec{\Omega}' - \vec{\Omega}) \frac{e^{-\tau(\vec{r}', \vec{r}, \lambda)}}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \times \\ \times \delta \left[\vec{\Omega} - \frac{(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \right] I_\lambda(\vec{r}', \vec{\Omega}') + I_\lambda^0(\vec{r}, \vec{\Omega}), \quad (2.20)$$

де $\tau(\vec{r}', \vec{r}, \lambda) = \Sigma(\lambda) |\vec{r} - \vec{r}'|$;

$\delta(\cdot)$ – дельта-функція Дірака;

$I_\lambda^0(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \int_0^\infty S_\lambda(\vec{r} - \xi \vec{\Omega}, \vec{\Omega}) e^{-\tau(\xi, \lambda)} d\xi$ – вільний член, що визначає

інтенсивність нерозсіяної ультразвукової хвилі; $\xi = |\vec{r} - \vec{r}'|$.

Аналітичного розв'язку рівняння не має, тому використовуються чисельний метод [123].

Вплив зважених у рідині частинок бруду на сигнал відгуку, який фіксує ультразвуковий сенсор, було розглянуто у праці [124].

Для спрощення прийнято, що частинки забруднення мають сферичну форму радіусу r та густини ρ_3 , тоді перетин поглинання на такій частинці визначається

$$\sigma_S(\lambda) = \frac{4\pi r^3}{3} k \left(\frac{\rho_3}{\rho_p} - 1 \right)^2 \frac{S}{S^2 + (\rho_3/\rho_p + \tau)^2}, \quad (2.21)$$

де $k = 2\pi/\lambda$ - хвильове число, м^{-1} ;

ρ_0 - густина рідини, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$$S = \frac{9}{4Br} \left(1 + \frac{1}{Br} \right), B = (\pi\nu/\mu)^{\frac{1}{2}}, \tau = \frac{1}{2} + \frac{9}{4Br};$$

$$\mu = \eta/\rho_0;$$

η - коефіцієнт в'язкості рідини, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

ν - частота ультразвукових коливань, Гц .

Дифракційні явища, що обумовлені наявністю частинок забруднення у рідині, призводять до розсіювання енергії ультразвукових хвиль. Перетин цього процесу визначається за формулою

$$\sigma_S(\lambda) = \frac{4\pi}{3} \cdot r^3 \cdot \frac{k^4}{6}, \quad (2.22)$$

де k - хвильове число, м^{-1} ;

r - радіус частинки, м .

З останнього виразу зрозуміло, що $\sigma_S(\lambda) \sim \frac{1}{\lambda^4}$ тому із збільшенням частоти перетин розсіювання зростає $\sigma_S \sim \nu^4$.

Розглянемо випадок, коли детектор випромінювання знаходиться на осі пучка акустичних коливань. Тоді покази детектора пропорційні

$$I_\lambda^\circ(Z) = I_{\circ,\lambda} e^{-\Sigma(\lambda)}, \quad (2.23)$$

де $\Sigma(\lambda) = n_1\sigma_p(\lambda, R) + n\sigma(\lambda, r)$,

де n_1 – концентрація газових бульбашок, м^{-3} ;

n – концентрація частинок твердої фази, м^{-3} ;

$\sigma_p(\lambda, R)$ – перетин поглинання ультразвукових коливань з довжиною хвилі λ на газовій бульбашці радіуса R ;

$\sigma(\lambda, r)$ – повний перетин ослаблення ультразвукових коливань з довжиною хвилі λ на частинці твердої фази радіуса r .

При ультразвуковому очищенні рекомендовано застосовувати рідину із зниженим вмістом газів, тому не враховується повітряна складова.

Середня інтенсивність, що пройде через рідину із зваженими частинками забруднення визначається за наступним виразом [123]

$$\langle I_\lambda^0(Z) \rangle = I_{0,\lambda} \exp\{-V[\bar{n}(1 - \eta)]\}, \quad (2.24)$$

де $\eta = \int_0^\infty \exp\left\{-\frac{1}{V}\sigma(\lambda, r)Z\right\} \phi(r) dr$ – концентрація частинок за розмірами;

$\phi(r)$ – функція розподілу частинок за розмірами;

$V = \frac{\pi d^2}{4} Z$ – об'єм, що контролюється, м^3 ;

де d – діаметр випромінювача, м ;

Z – відстань до обладнання, м ;

\bar{n} – середня концентрація частинок твердої фази в рідині, м^{-3} .

Тоді загальна інтенсивність, що буде відбита обладнанням та повернеться на датчик

$$I(x) = I_0 e^{-V\bar{n}(1-\eta)} e^{-2\alpha x \left(\frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}\right)^2} e^{-V\bar{n}(1-\eta)} = I_0 e^{-2\alpha x \left(\frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}\right)^2} e^{-2V\bar{n}(1-\eta)} = I_0 e^{-2(\alpha x V \bar{n}(1-\eta)) \left(\frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}\right)^2} \quad (2.25)$$

Отже, зміна інтенсивності має експоненційну залежність від товщини забруднення, концентрації забруднення в рідині та розподілу частинок за розмірами. Втрати інтенсивності при поглинанні сигналу рідиною не враховані, оскільки вони, за винятком розсіювання від частинок забруднення, є відносно постійними. Оскільки на фінальній стадії очищення співвідношення меж середовища істотно змінюється, то спостерігається значна зміна показів датчика.

Для формування ефективного керування ультразвуковим очищенням із оцінкою стану на основі ультразвукових відгуків необхідно визначити два параметра: ступінь очищення обладнання, тобто наскільки процес наближено до фінальної стадії, та інтенсивність відшаровування бруду на заданій ділянці. Другий параметр є основним при формуванні керуючої дії, оскільки висока інтенсивність перебігу очищення є свідченням того, що необхідно продовжувати ультразвуковий вплив, оскільки на ділянці є забруднення і воно відшаровується. Перший параметр використано для корекції значення керуючого впливу і дає змогу оцінити відносну забрудненість даної ділянки порівняно з іншими.

2.5 Формування методики оцінювання перебігу процесу ультразвукового очищення із урахуванням стану забрудненого об'єкта та очищувальної рідини

Для дослідження характеристик ультразвукового відгуку, що дозволяють визначити ступінь активності відшаровування бруду на заданій ділянці та як впливають зважені частинки забруднення на відбитий сигнал, проведено моделювання процесу очищення виробів при різних умовах [124]. Отриманий сигнал перетворено за допомогою швидкого перетворення Фур'є та проведено аналіз значення перших трьох гармонік (Додаток Б).

Ініціалізація початкового стану проведена за наступними параметрами: розташування випромінювача та датчика, товщина ділянки та забруднення (рис. 2.16). Розмір поля 216×216 з розміром комірки $50 \cdot 10^{-3}$ м. Очищуваний об'єкт (обладнання) та забруднення задано густиною та швидкістю розповсюдження

ультразвукової хвилі. Параметри обладнання - густина $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ та швидкість розповсюдження ультразвукової хвилі $c = 5900 \text{ м/с}$, що відповідає металевому виробу. Параметри забруднення - густина $\rho = 3100 \text{ кг/м}^3$ та швидкість розповсюдження ультразвукової хвилі $c = 2500 \text{ м/с}$, що відповідає параметрам корозії металу. Початкове значення товщини забруднення $60 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Під час моделювання товщина забруднення зменшується з кроком $20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ на кожному етапі.

На першому кроці було проведено моделювання ідеального випадку, коли забруднення у рідині настільки мале, що їм можна знехтувати. Ультразвукові відгуки, отримані під час моделювання ультразвукового очищення були перетворені за допомогою швидкого перетворення Фур'є та отримано значення перших трьох гармонік (табл. 2.1). Також у табл. 2.1 наведено час фіксування датчиком порогового значення.

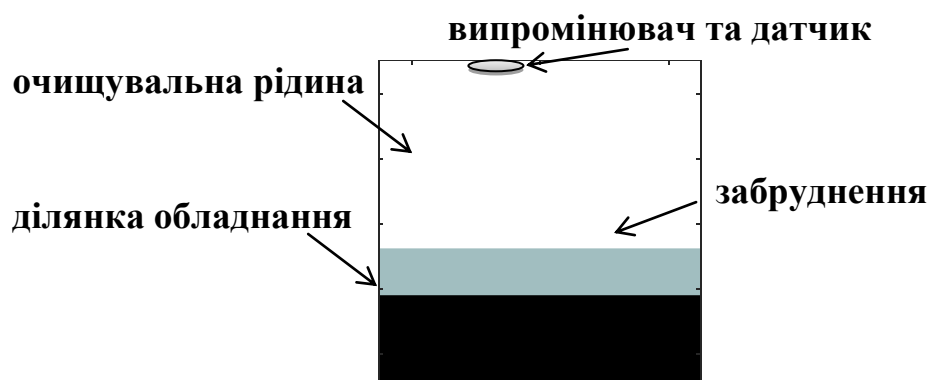


Рис. 2.16. Розташування датчика, випромінювача та забруднення

Таблиця 2.1. Значення параметрів ультразвукового відгуку під час ультразвукового очищення при незабрудненій рідині

Товщина забруднення, мм	Номер часового кроку	Час надходження сигналу, $\mu\text{с}$	Значення амплітуд перших трьох гармонік (10^{-3})		
60	3101	42	3,224	2,922	1,965
40	3366	46	2,946	2,663	1,962
20	3631	49	2,709	2,419	1,946
0	3886	53	4,242	4,103	1,80

Отже, спостерігається постійне, майже лінійне збільшення часу, за який сигнал досягає порогового значення (рис. 2.17)

Поведінка амплітуди головної гармоніки відповідає передбаченому аналітично, тобто різке зростання при повному очищенні.

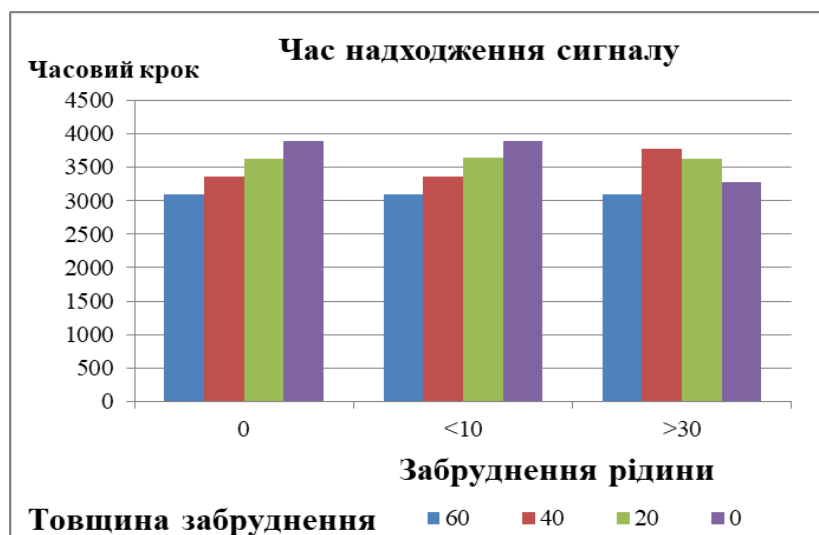


Рис. 2.17. Змінення часу досягнення сигналом порогового значення в залежності від товщини забруднення та забрудненості рідини

Коефіцієнти обчислено за формулами (2.16) та (2.17) для визначення ступеня нелінійності сигналу та проведений аналіз щодо їх можливого застосування для визначення стану перебігу процесу ультразвукового очищення (табл. 2.2).

Таблиця 2.2. Коефіцієнти нелінійності другого та третього порядків для незабрудненої рідини

Товщина забруднення, мм	$\beta_2 = \frac{A_2}{A_1^2}$	$\beta_3 = \frac{A_3}{A_1^3}$
60	0,281	0,059
40	0,307	0,077
20	0,330	0,098
0	0,228	0,024

В процесі очищення маємо зростання нелінійної складової, що пов'язано з погіршенням механічних властивостей, внаслідок нерівномірності густини поверхні виробу. Для чистого обладнання, навпаки, цей показник різко спадає. Спостерігається зростання коефіцієнтів нелінійності другого та третього порядків до максимального значення при мінімально розглянутій товщині забруднення із різким збільшенням для повністю очищеного обладнання. Отже, значення зміни коефіцієнтів другого та третього порядку та зміни часу досягнення сигналом порогового значення є основою для побудови методики для оцінювання перебігу процесу ультразвукового очищення, особливо для стадії, на якій знаходиться очищення.

Для підвищення якості оцінювання проведено моделювання розсіювання та поглинання, що формується зваженими частинками забруднення у рідині. Для цього симульовано процес очищення, під час якого частинки забруднення частково осідають, а частково залишаються зваженими у рідині. Забрудненість рідини розглядалась у двох концентраціях: низька (<10 %) та висока (>30 %). Це пов'язано з тим, що при підвищенні забрудненості рідини параметри отриманих ультразвукових відгуків суттєво змінювались.

Ступінь забруднення рідини залежить від властивостей рідини та забруднення: частини забруднення, що залишається у зваженому стані, та загального співвідношення кількостей забруднення та рідини.

Наявність розсіювання від зважених частинок суттєво змінює час досягнення сигналом порогового значення, який перестає мати пряму залежність від відстані до забрудненого обладнання (табл. 2.3, табл.2.4).

При незначній забрудненості рідини (<10 %) при очищенні спостерігається нестійке зменшення коефіцієнтів другого та третього порядку із збільшенням значення головної амплітуди (табл. 2.5). Час надходження порогового значення незначно коливається порівняно з ідеальним випадком. Загальна ситуація поведінки параметрів відгука подібна до тої, що спостерігалась у чистій рідині.

Таблиця 2.3. Значення параметрів ультразвукового відгуку при низькій концентрації частинок забруднення у рідині

Товщина забруднення, мм	Номер часового кроку ¹	Час надходження сигналу, μ s	Значення амплітуд перших трьох гармонік (10^{-3})		
60	3101	42	3,224	2,922	1,965
40	3366	46	3,008	2,35	1,931
20	3634	49	2,503	2,201	1,804
0	3887	53	4,19	4,139	1,702

При вищій ступені забрудненості (>30 %) картина починає суттєво змінюватись у деяких аспектах (табл. 2.6). Так, коефіцієнти нелінійності 2-го та 3-го порядку продовжують зменшуватись, але головна амплітуда перестає постійно зростати при зменшенні забруднення, як і час надходження порогового значення.

Таблиця 2.4. Значення параметрів ультразвукового відгуку при високій концентрації частинок забруднення у рідині

Товщина забруднення, мм	Номер часового кроку ²	Час надходження сигналу, μ s	Значення амплітуд перших трьох гармонік (10^{-3})		
60	3101	42	3,224	2,922	1,965
40	3773	51	2,904	1,198	0,255
20	3630	49	3,116	2,977	1,898
0	3277	45	19,179	3,239	0,649

¹ Розмір часового кроку $dt = 13.6166$ нс

² Розмір часового кроку $dt = 13.6166$ нс

Таблиця 2.5. Значення коефіцієнтів нелінійності при низькій концентрації частинок забруднення у рідині

Товщина забруднення, мм	$\beta_2 = \frac{A_2}{A_1^2}$	$\beta_3 = \frac{A_3}{A_1^3}$
60	0,281	0,059
40	0,268	0,071
20	0,351	0,115
0	0,235	0,023

При високій забрудненості рідини спостерігається ситуація, коли відгук формується не відбиттям ультразвуку від очищуваного виробу, а від зважених частинок забруднення. При цьому фіксується різке зменшення часу надходження порогового значення до мінімального та різкий скачок основної амплітуди майже на порядок (від 3,116 до 19,179).

При найвищій забрудненості рідини оцінювання перебігу стану ультразвукового очищення стає неможливим. Але водночас при високій забрудненості рідини доцільність очищення стає також сумнівною.

Таблиця 2.6. Значення коефіцієнтів нелінійності при високій концентрації частинок забруднення у рідині

Товщина забруднення, мм	$\beta_2 = \frac{A_2}{A_1^2}$	$\beta_3 = \frac{A_3}{A_1^3}$
60	0,281	0,059
40	0,142	0,01
20	0,307	0,063
0	0,0088	0,0001

Отже, сталою є поведінка щодо мінімального значення коефіцієнту нелінійності другого порядку для очищеного обладнання при бідь-якій

забрудненості рідини та максимальне значення амплітуди першого порядку (рис. 2.18 та 2.19).

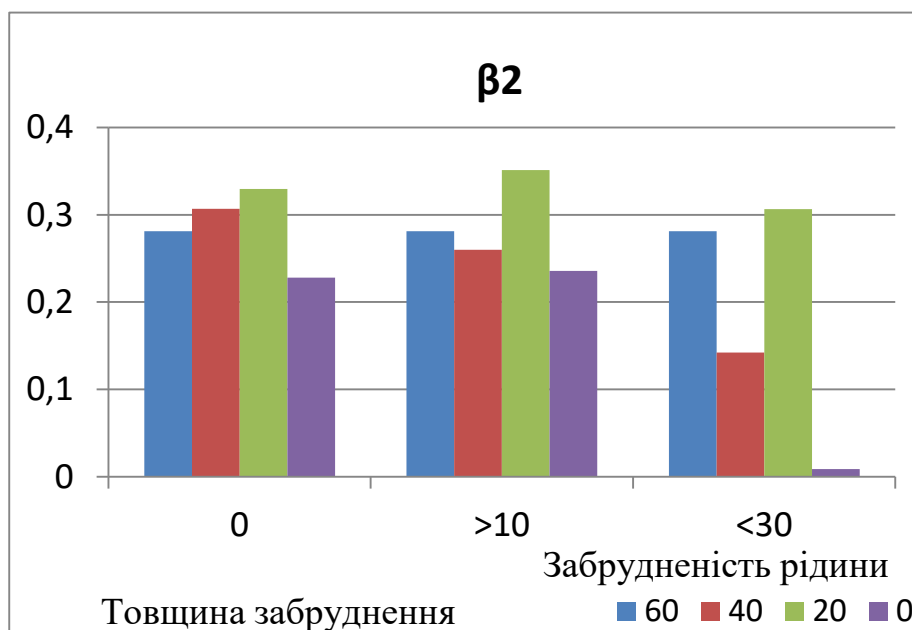


Рис. 2.18. Зміна коефіцієнту нелінійності другого порядку та основної амплітуди в залежності від товщини забруднення та забрудненості рідини

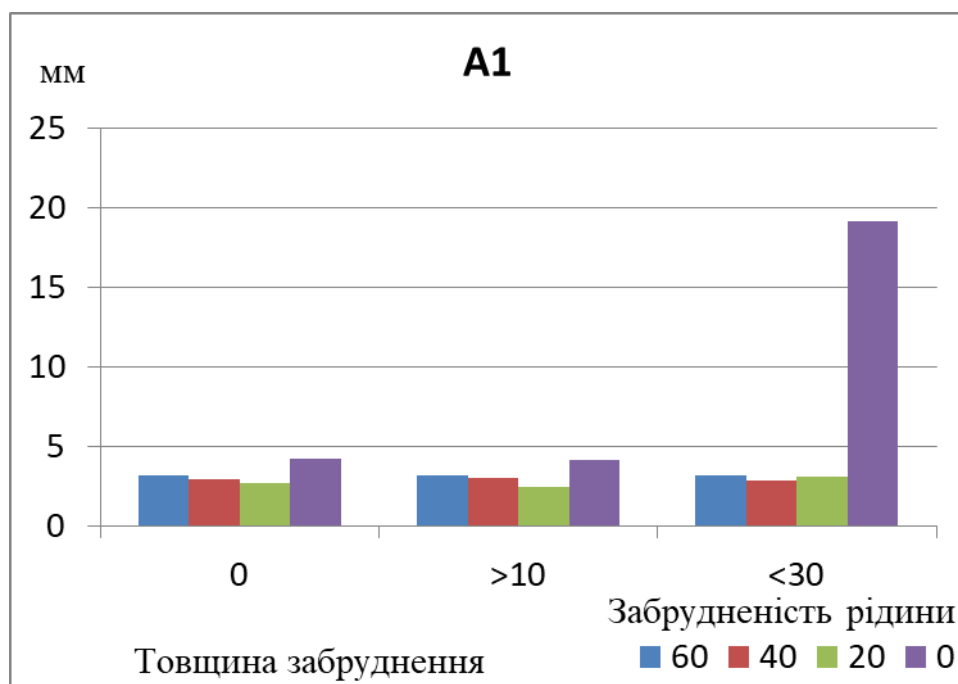


Рис. 2.19. Зміна основної амплітуди в залежності від товщини забруднення та забрудненості рідини

Таким чином, в процесі очищення відбувається збільшення значення часу надходження граничного значення сигналу та нелінійні зміни для головної амплітуди та коефіцієнту нелінійності 2-го порядку. Висока забрудненість рідини

викликає зменшення часу надходження сигналу, оскільки відбиття відбувається вже не від очищеного виробу, а від зважених частинок бруду. Відповідно, при цьому спостерігається різке збільшення головної амплітуди (більш ніж у 4 рази).


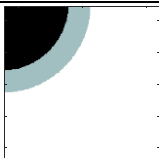
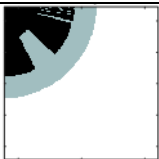

В розглянутому моделюванні не було враховано наявність геометричних особливостей очищеного виробу, які також матимуть певний вплив на зміну сигналу, тому доцільно розглянути проведемо моделювання ультразвукового очищення для виробів різної конфігурації із аналізом коефіцієнтів нелінійності другого та третього порядків та часу досягнення сигналом порогового значення.

Для врахування впливу на визначені параметри для оцінювання стану перебігу ультразвукового очищення геометричних особливостей виробу проведемо моделювання очищення для різних конфігурацій із наступним використанням швидкого перетворення Фур'є для визначення головної амплітуди та першої і другої гармонік [125].

Початкові умови симуляції наступні: розмір поля 216×216 з розміром комірки $50 \cdot 10^{-3}$ м. Очищений об'єкт та забруднення визначаються за наступними характеристиками: густина та швидкість розповсюдження ультразвукової хвилі. Ділянка обладнання має густина $\rho = 7800$ кг/м³ та швидкість розповсюдження ультразвукової хвилі $c = 5900$ м/с, що відповідає металевому виробу. Забруднення - густина $\rho = 3100$ кг/м³ та швидкість розповсюдження ультразвукової хвилі $c = 2500$ м/с, що відповідає параметрам корозії металу. В якості різних форм ділянок було обрано наступні: сектор кола, сектор астроїди та сектори кола і астроїди з отворами (табл. 2.7).

Для виробу кожної конфігурації та з різною товщиною забруднення було зафіксовано ультразвукові відгуки. Ці відгуки було оброблено за допомогою швидкого перетворення Фур'є та отримано значення найбільших 3 амплітуд (табл. 2.7).

Таблиця 2.7. Параметри ультразвукових відгуків при очищенні виробів різної конфігурації

№ виробу	Початковий вигляд виробу із забрудненням	Товщина забруднення	Номер часового кроку ³	Час надходження сигналу, μ с	Значення амплітуд перших трьох гармонік			β_2	β_3
1		60	2669	36	0,2379	0,0758	0,0411	1,339	3,053
		40	2818	38	0,2922	0,1046	0,0612	1,225	2,453
		20	2956	40	0,3173	0,1004	0,0569	0,997	1,781
		0	3105	42	0,36	0,084	0,0833	0,648	1,785
2		60	2467	34	0,1026	0,0229	0,0090	2,175	8,333
		40	2728	37	0,154	0,0633	0,0199	2,669	5,449
		20	2884	39	0,1498	0,0619	0,0038	2,758	1,13
		0	2914	40	0,1104	0,03	0,0059	2,461	4,385
3		60	2466	34	0,1016	0,0238	0,0099	2,306	9,44
		40	2728	37	0,1601	0,0571	0,0206	2,228	5,02
		20	2882	39	0,1414	0,0599	0,0076	2,996	2,688
		0	2924	40	0,0927	0,025	0,01	2,909	12,553
		чистий отвір	3033	41	0,0846	0,0314	0,0158	4,387	26,094
4		60	2669	36	0,2377	0,0759	0,0409	1,343	3,045
		40	2818	38	0,2942	0,1041	0,0625	1,203	2,454
		20	2956	40	0,3238	0,101	0,06	0,963	1,767
		0	3106	42	0,3419	0,0718	0,0831	0,614	2,079
		чистий отвір	3105	42	0,3629	0,0869	0,0824	0,66	1,724

³ Розмір часового кроку $dt = 13.6166$ нс

За графіками залежностей (рис. 2.20) видно що наявність очищеного отвору викликає збільшення нелінійної складової (коефіцієнта другого порядку) незалежно від геометричної форми виробу.

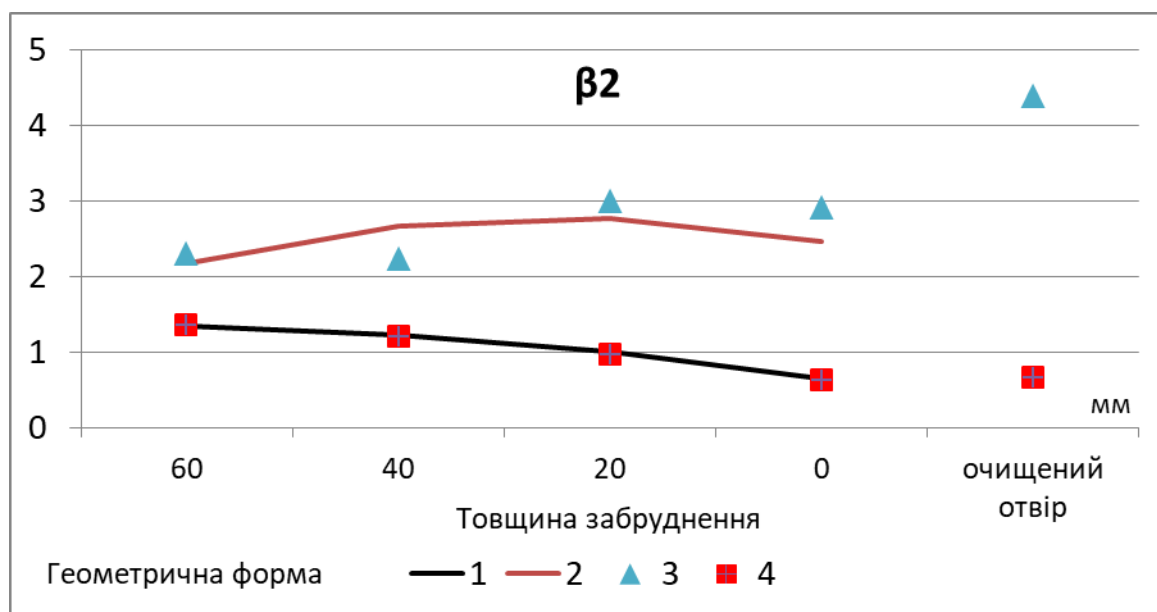


Рис. 2.20. Коефіцієнт нелінійності другого порядку при різній товщині забруднення

Для сектора кола – значне (від 2,909 до 4,387), для астроїдального сектора незначне (0,614 до 0,66). Загальний же характер зміни відбувається нерівномірно – зменшення коефіцієнту β_2 спостерігається у випадку, коли шар забруднення нижче певного рівня, а збільшення може спостерігатись за певної геометричної форми у випадку, коли шар забруднення зменшується, але в цілому лишається значним. На рис. 2.20 можна побачити, що для будь-якого виробу значення коефіцієнту β_2 на останній стадії очищення зменшується.

При цьому очищення отворів, навпаки, викликає його збільшення. Отже, можна зробити наступний висновок: зростання коефіцієнту β_2 свідчить або про очищення отворів, або про зменшення забруднення, шар якого лишається досить значущим.

Коефіцієнт нелінійності третього порядку має ще більшу залежність від геометрії виробу та не демонструє закономірностей у процесі ультразвукового

очищення (рис. 2.21). Тому прийняте рішення обмежитися аналізом лише коефіцієнта другого порядку.

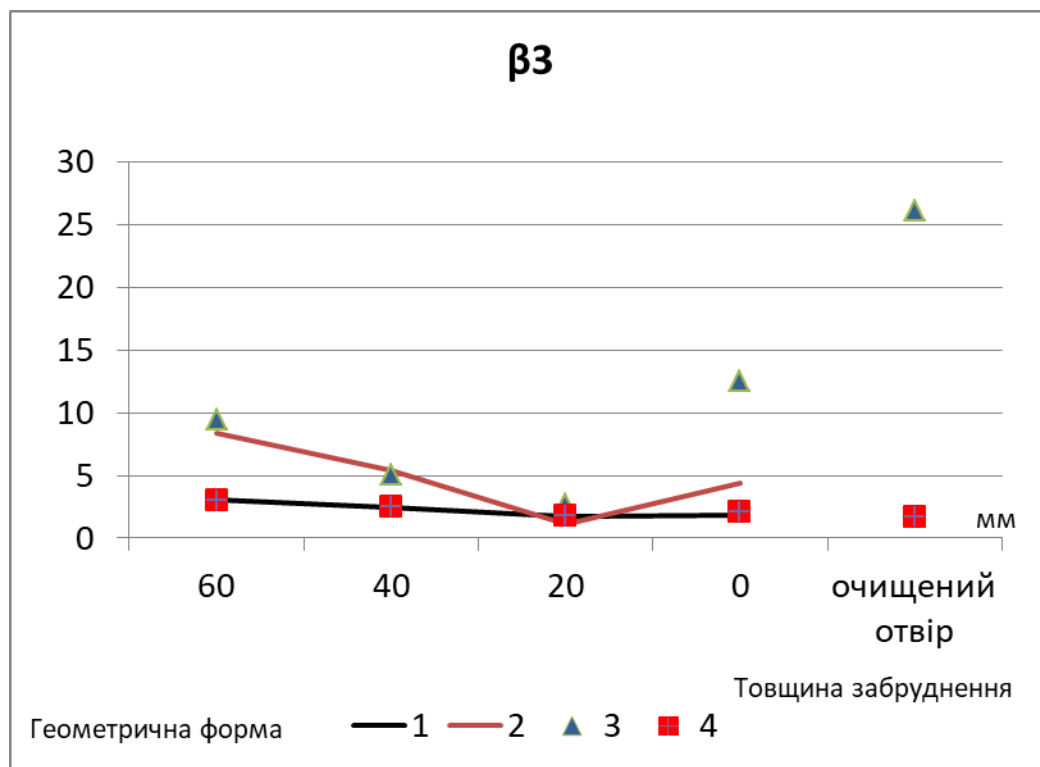


Рис. 2.21. Коефіцієнт нелінійності третього порядку при різній товщині забруднення

Важливим чинником, що має стабільну поведінку та дозволяє сформувати оцінку перебігу процесу ультразвукового очищення забрудненості є час через який надходить порогове значення сигналу. На рис. 2.22 простежується, що зміна часу відбувається майже лінійно з постійним збільшенням. Нелінійність спостерігається лише на стадії очищення отвору, коли зміна часу надходження порогового сигналу може зменшуватись.

При збільшенні зважених частинок забруднення у рідині більший вплив на сигнал відгуку вже має стан рідини, а не обладнання. При цьому спостерігалось зменшення часу досягнення сигналом порогового значення та збільшення головної амплітуди.

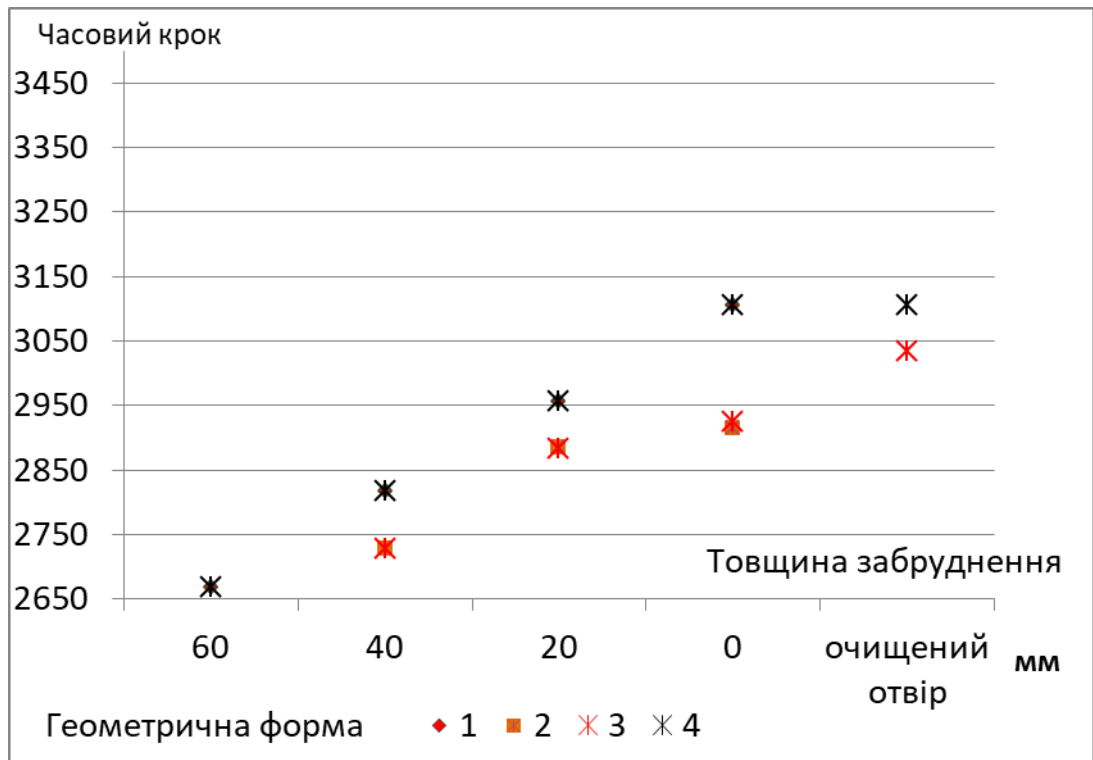


Рис. 2.22. Час досягнення сигналом порогового значення в залежності від товщини забруднення

Таким чином, за значенням зміни часу надходження сигналу, за коефіцієнтом нелінійності другого порядку та за значенням зміни основної амплітуди визначається стан перебігу ультразвукового очищення, а саме:

1. Зміна товщини забруднення має залежність від зміни часу досягнення сигналом порогового значення близького до прямопропорційного.

2. За коефіцієнтом нелінійності другого порядку при цьому визначається товщина забруднення: значне зростання коефіцієнта (більше 50 %: $\frac{|4,387-2,909|}{2,909} = 0,51$ для виробу 3 в табл. 2.7) при зростанні часу надходження свідчить про очищення різного роду отворів, тобто фінальну стадію очищення. Основна амплітуда при цьому зменшується.

3. Менше зростання коефіцієнту нелінійності другого порядку при зростанні часу надходження (наприклад, $\frac{|2,996-2,228|}{2,228} = 0,5$ для виробу 3) є свідченням того, що забруднення ще залишається значним і ділянка вимагає інтенсивного очищення. Поведінка основної амплітуди довільна.

4. Збільшення основної амплітуди із зменшенням коефіцієнту нелінійності другого порядку є чітким показником стабільного процесу очищення.

Висновок до розділу 2

1. Виконано теоретичний аналіз та моделювання у програмному пакеті k-Wave процесу розповсюдження ультразвукових хвиль у гетерогенному середовищі та особливостей відбиття ультразвукового зонduючого імпульсу від виробів складної конфігурації, що знаходяться у рідині під час очищення, з метою визначення основних закономірностей для формування оцінки інтенсивності перебігу ультразвукового очищення у заданих ділянках.

2. Моделюванням процесу ультразвукового очищення виробів досліджено наступні закономірності, що визначають його перебіг та результати:

- просторова залежність відбитого зонduючого ультразвукового сигналу від стану поверхні виробу, що очищується;
- вплив на параметри відбитого зонduючого сигналу наявного забруднення та особливостей поверхні виробів;
- час досягнення граничного значення інтенсивності зонduючого ультразвукового сигналу, відбитого від поверхні виробів;
- зміни в процесі очищення виробів лінійної та нелінійної складових відбитого зонduючого сигналу та їх співвідношення;
- залежність амплітуди зонduючого ультразвукового сигналу та амплітуд першої та другої його гармонік, коефіцієнтів нелінійності 2-го та 3-го порядків від характеристик виробів, забруднення та рідини, в якій виконується очищення.

3. За результатами аналітичного аналізу та моделювання ультразвукового очищення виробів складної конфігурації встановлено, що оцінка перебігу цього процесу, а і, відповідно, якості очищення, визначається часом досягнення граничного значення інтенсивності та обчисленого на основі спектрального

розкладу коефіцієнту нелінійності другого порядку віддзеркаленого від поверхні виробу зондуючого ультразвукового сигналу.

4. Отримані результати дозволяють сформулювати оцінку якості ультразвукового очищення не опосередковано за станом рідини в якій занурено очищуваний виріб, а безпосередньо стосовно відповідних ділянок його поверхні для цілеспрямованого перерозподілу інтенсивності очищувальних впливів у напрямку найбільшого забруднення.

РОЗДІЛ 3.

ПРОСТОРОВЕ НЕЧІТКЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОЧИЩЕННЯ

3.1 Особливості тривимірної нечіткої логіки та нечіткої інтервальної логіки типу 2

Ультразвукове очищення виробів складної конфігурації є просторово розподіленим процесом, керування яким відбувається в умовах неповної та нечіткої інформації про фізичні та геометричні характеристики об'єкту, а також стосовно стану його поверхні. За цих умов автоматизоване керування ультразвуковим очищенням побудовано із застосуванням нечіткої логіки [126, 127].

Для врахування просторової розподіленості системи та складності формування чіткої експертної оцінки щодо перебігу стану ультразвукового очищення застосовується керування на основі тривимірної інтервальної нечіткої множини типу 2.

Тривимірна інтервальна нечітка множина типу 2 є розширенням базової нечіткої множини за допомогою просторової координати та інтервальної функції належності.

В основі нечіткої логіки лежить поняття нечіткої множини, яка задається наступним чином [87]

$$\tilde{A} = \int_X \frac{\mu_{\tilde{A}}(x)}{x}, 0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x) \leq 1, x \in X. \quad (3.1)$$

де $\mu_{\tilde{A}}(x)$ – функція, що визначає, в якій мірі елемент x належить множині

\tilde{A} . Графічна ілюстрація прикладу такої функції наведена на рис.3.1. Інтервальна нечітка логіка типу 2 в основі містить наступну нечітку множину [128]

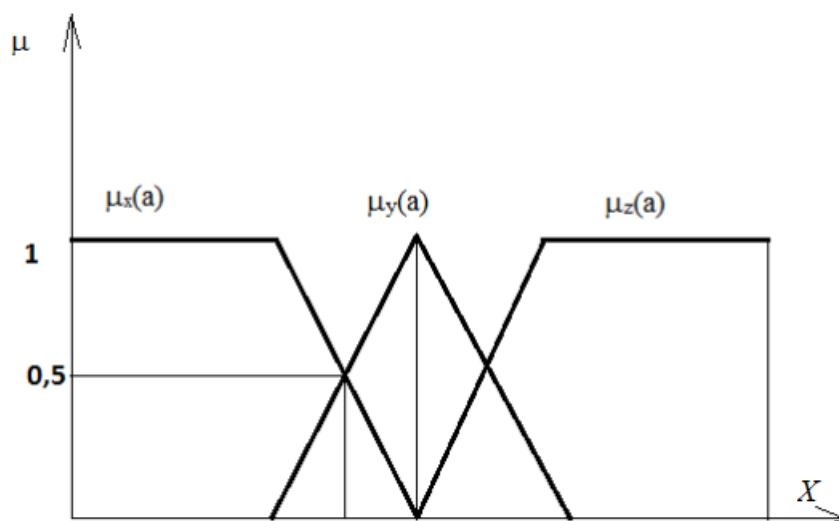


Рис. 3.1 Графічне зображення функції належності нечіткої множини типу 1

$$\tilde{A} = \int_X \frac{\left[\int_U \frac{1}{u} \right]}{x}, u \in J_x \subseteq U = [0,1], x \in X,$$

$$J_x = [\underline{\mu}_A(x), \bar{\mu}_A(x)] \quad (3.2)$$

де $\bar{\mu}_A(x)$ - значення верхньої функції належності;

$\underline{\mu}_A(x)$ - значення нижньої функції належності. Графічна ілюстрація прикладу

такої функції наведена на рис. 3.2.

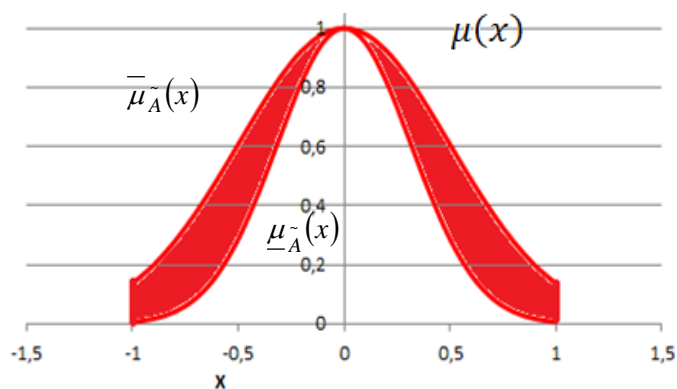


Рис. 3.2 Графічне зображення ФП нечіткої множини типу 2

I, нарешті, тривимірна нечітка логіка має в основі наступну нечітку множину [109]

$$\tilde{A} = \int_{z \in Z} \int_{x \in X} \frac{\mu_{\tilde{A}}(x,z)}{(x,z)}, \quad (3.3)$$

де z – просторова координата. Графічне ілюстрація функції належності тривимірної нечіткої множини наведена на рис. 3.3.

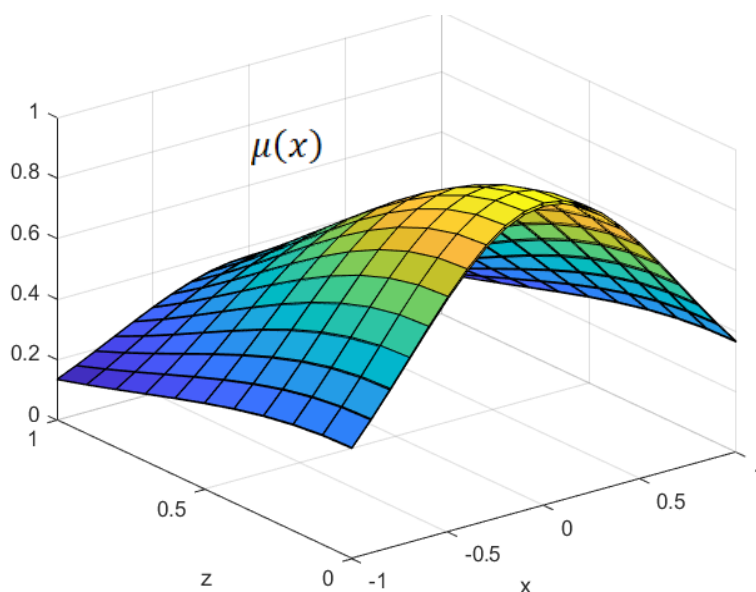


Рис. 3.3 Графічне зображення ФП тривимірної нечіткої множини.

Базова структура контролера на основі різних типів нечіткої логіки залишається постійною та складається з операцій фазифікації, нечіткого логічного виводу та дефазифікації (рис. 3.4) [129].

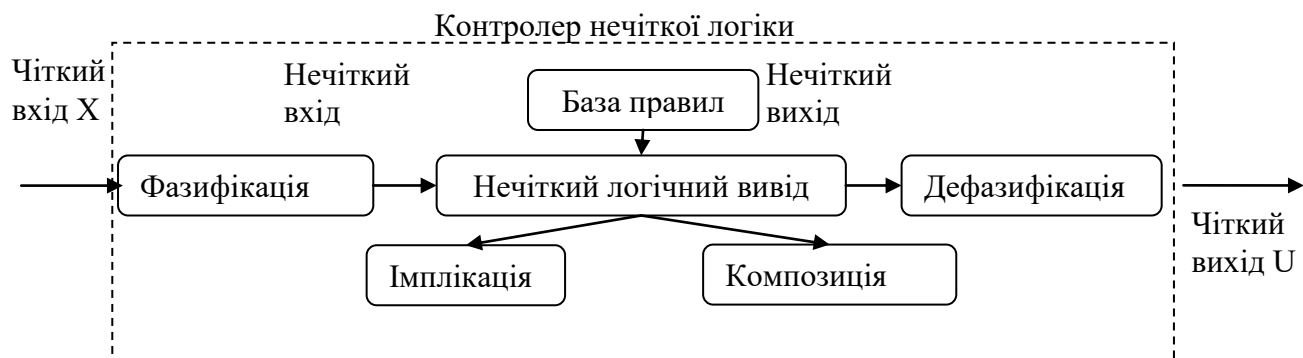


Рис. 3.4. Базова структура контролера нечіткої логіки типу 1

Для нечіткого контролера типу 2 відбувається ускладнення на етапі формування чіткого виводу – з'являється необхідність скорочення типу даних (рис. 3.5) [130]. Для тривимірної нечіткого контролера ускладнюється етап формування нечіткого логічного виводу, стандартній процедурі передують операції злиття просторової інформації та зменшення розмірності (рис. 3.6) [109].

Контролер нечіткої логіки типу 2

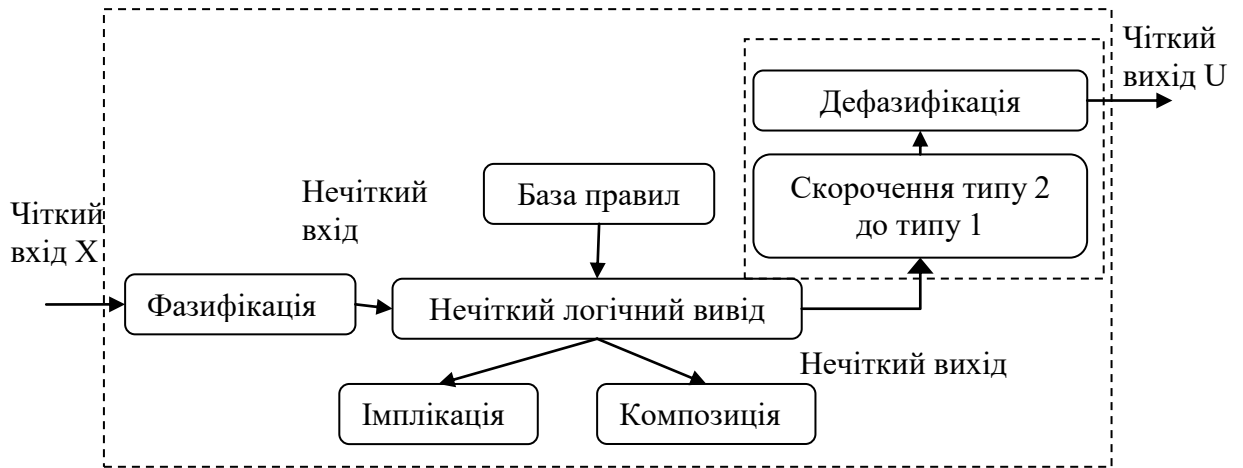


Рис. 3.5. Базова структура контролера нечіткої логіки типу 2

Отже, для поєднання переваг розглянутих розширень класичної нечіткої логіки необхідно, щоб в її основі знаходилась нечітка множина із додатковою просторовою координатою та інтервальною функцією належності. Структура запропонованого контролера для керування процесом ультразвукового очищення розроблена шляхом симбіозу операцій тривимірної та інтервальної нечіткої логіки

Контролер тривимірної нечіткої логіки

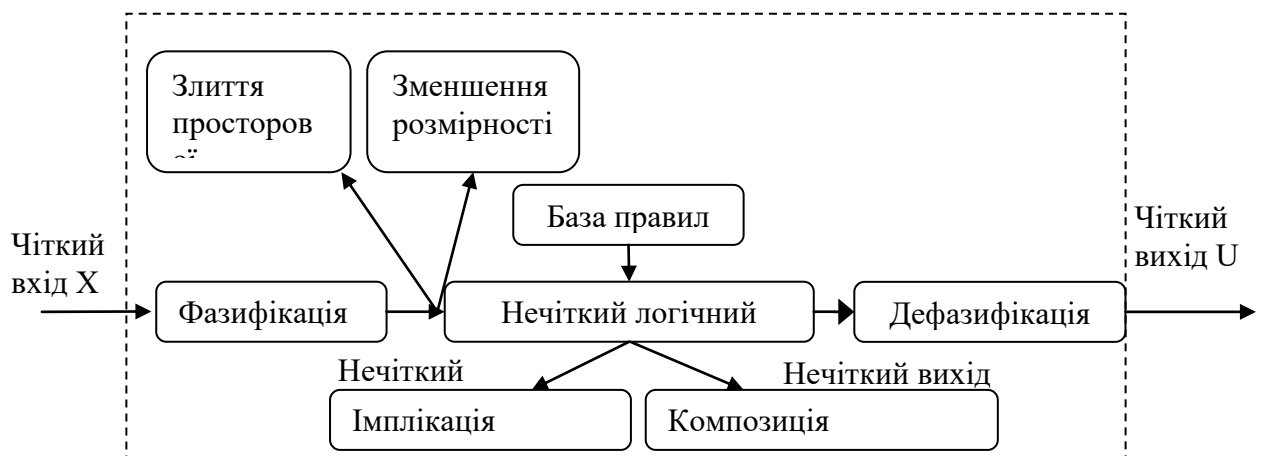


Рис. 3.6. Базова структура контролера тривимірної нечіткої логіки

3.2 Тривимірна інтервальна нечітка множина типу 2 та визначення основних операцій на ній

В основі тривимірного нечіткого контролера типу 2, що використовується для ультразвукового очищення, знаходиться тривимірна інтервальна нечітка множина типу 2, яка визначається через змістовну змінну X , однорозмірну змінну простору Z та нечітку функцію належності $\mu(x,z)$

$$\begin{aligned} \tilde{A} &= \{(x, z), \mu_{\tilde{A}}^{\sim}(x, z) | \forall x \in X, z \in Z, \}, \\ \mu_{\tilde{A}}^{\sim}(x, z) &= \int_u \frac{1}{u}, u \in J_x \subseteq U = [0, 1]. \end{aligned} \quad (3.4)$$

де J_x – первинна приналежність;

U – область визначення первинних приналежностей, $U = [0, 1]$.

Враховуючи, що J_x має інтервальний характер, то вона визначається за допомогою двох функцій

$$J_x = [\mu_{\tilde{A}}^{\sim-}(x, z), \bar{\mu}_{\tilde{A}}^{\sim}(x, z)], \quad (3.5)$$

де $\mu_{\tilde{A}}^{\sim-}(x, z)$ – це нижня границя функції належності (lower membership function);

$\bar{\mu}_{\tilde{A}}^{\sim}(x, z)$ – верхня границя функції належності (upper membership function).

Для неперервних x, z, \tilde{A} можна записати як

$$\tilde{A} = \int_{z \in Z} \int_{x \in X} \left[\int_u \frac{1}{u} \right]_{(x,z)}, u \in J_x \subseteq U = [0, 1], x \in X. \quad (3.6)$$

Для дискретних x, z , \tilde{A} можна записати як

$$\tilde{A} = \sum_{z \in Z} \sum_{x \in X} \left[\int_{J_x} \frac{1}{u} \right]_{(x,z)}, u \in J_x \subseteq U = [0,1], x \in X. \quad (3.7)$$

Графічне зображення синглетонної функції належності для ТІНМТ2 наведено на рис. 3.7.

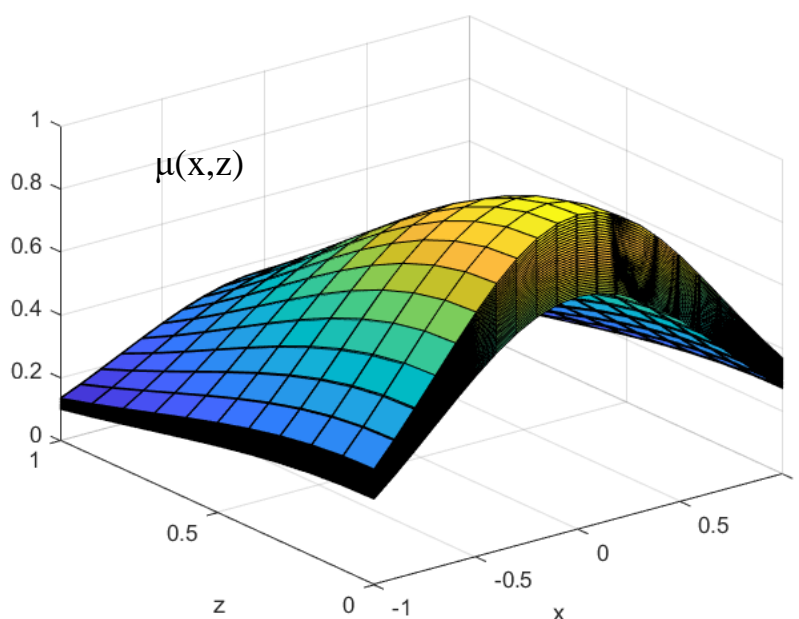


Рис. 3.7. Тривимірна інтервальна нечітка множина типу 2

Для опису роботи розробленого тривимірного нечіткого контролера типу 2 опишемо основні операції для ТІНМТ2. За аналогією з урахуванням поєднання тривимірної нечіткої множини [110, 109] та нечіткою інтервальною множиною типу 2 [100] основні операції для ТІНМТ2 описуються наступним чином:

Об'єднання множин \tilde{B}_1 та \tilde{B}_2 , тобто $\tilde{B}_1 \cup \tilde{B}_2$ визначається наступним чином

$$\begin{aligned}
\tilde{B}_1 &= \frac{1}{\cup_{\forall x \in X, z \in Z} \left[\mu_{-B_1}^{\sim}(x, z), \bar{\mu}_{-B_1}^{\sim}(x, z) \right]}, \tilde{B}_2 = \frac{1}{\cup_{\forall x \in X, z \in Z} \left[\mu_{-B_2}^{\sim}(x, z), \bar{\mu}_{-B_2}^{\sim}(x, z) \right]} \\
\tilde{B}_1 \cup \tilde{B}_2 &= \frac{1}{\cup_{\forall x \in X, z \in Z} \left[\mu_{-B_1}^{\sim}(x, z) \vee \mu_{-B_2}^{\sim}(x, z), \bar{\mu}_{-B_1}^{\sim}(x, z) \vee \bar{\mu}_{-B_2}^{\sim}(x, z) \right]} = \\
&= \frac{1}{\cup_{\forall x \in X, z \in Z} \left[\max \left(\mu_{-B_1}^{\sim}(x, z), \mu_{-B_2}^{\sim}(x, z) \right), \max \left(\bar{\mu}_{-B_1}^{\sim}(x, z), \bar{\mu}_{-B_2}^{\sim}(x, z) \right) \right]}, \tag{3.8}
\end{aligned}$$

та є t-конормою для описаної множини.

Перетин множин \tilde{B}_1 та \tilde{B}_2 , тобто $\tilde{B}_1 \cap \tilde{B}_2$ визначається наступним чином

$$\begin{aligned}
\tilde{B}_1 &= \frac{1}{\cup_{\forall x \in X, z \in Z} \left[\mu_{-B_1}^{\sim}(x, z), \bar{\mu}_{-B_1}^{\sim}(x, z) \right]}, \tilde{B}_2 = \frac{1}{\cup_{\forall x \in X, z \in Z} \left[\mu_{-B_2}^{\sim}(x, z), \bar{\mu}_{-B_2}^{\sim}(x, z) \right]} \\
\tilde{B}_1 \cap \tilde{B}_2 &= \frac{1}{\cup_{\forall x \in X, z \in Z} \left[\mu_{-B_1}^{\sim}(x, z) \wedge \mu_{-B_2}^{\sim}(x, z), \bar{\mu}_{-B_1}^{\sim}(x, z) \wedge \bar{\mu}_{-B_2}^{\sim}(x, z) \right]} = \\
&= \frac{1}{\cup_{\forall x \in X, z \in Z} \left[\min \left(\mu_{-B_1}^{\sim}(x, z), \mu_{-B_2}^{\sim}(x, z) \right), \min \left(\bar{\mu}_{-B_1}^{\sim}(x, z), \bar{\mu}_{-B_2}^{\sim}(x, z) \right) \right]}, \tag{3.9}
\end{aligned}$$

та буде вважатися t-нормою для описаної множини.

Доповнення множини \tilde{B}_1 , де $\tilde{B}_1 = \frac{1}{\cup_{\forall x \in X, z \in Z} \left[\mu_{-B_1}^{\sim}(x, z), \bar{\mu}_{-B_1}^{\sim}(x, z) \right]}$ визначається

наступним чином

$$\overline{\tilde{B}_1} = \frac{1}{\cup_{\forall x \in X, z \in Z} \left[1 - \bar{\mu}_{-B_1}^{\sim}(x, z), 1 - \mu_{-B_1}^{\sim}(x, z) \right]} \tag{3.10}$$

3.3 Розробка контролера на базі тривимірної інтервальної нечіткої множини типу 2 для системи ультразвукового очищення

Розширення функції належності у даному контролері до інтервальної призвело до змін у механізмі формування виводу. Розглянемо більш детально операції, що містяться у структурі контролера на базі ТІНМТ2.

ТІНМТ2 контролер має структуру, подібну до базового [129], з стандартними операціями фазифікації, нечіткого логічного виводу та дефазифікації (рис. 3.8). Але наявність додаткової просторової координати та інтервальність функції належності вимагають їхнього розширення. на кожному етапі. Для спрощення та стислості всі операції контролера наведено для синглетонної функції належності.

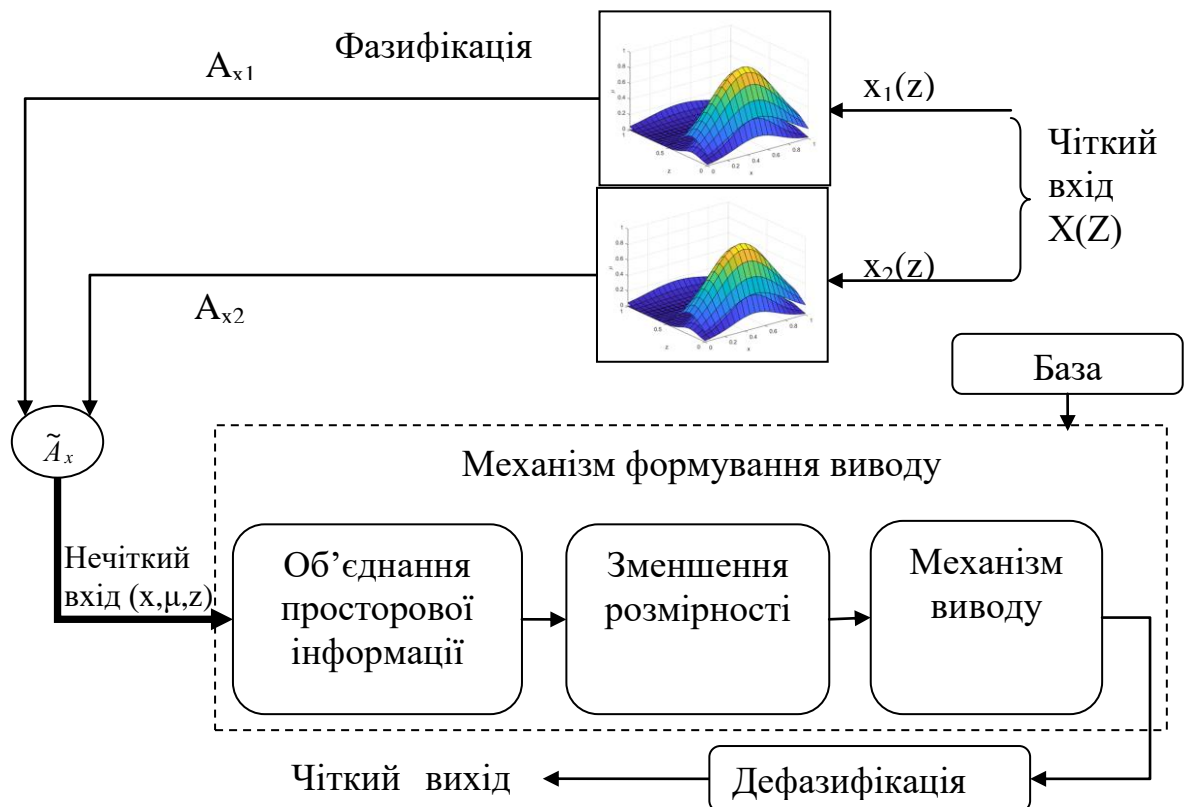


Рис. 3.8. Контролер на базі 3-D IT2 FS

Першим етапом обробки даних є фазифікація. Подібно традиційній нечіткій логіці фазифікація може виконуватись різними способами і залежить від задачі, що вирішується.

Функція належності для синглетонної фазифікації виглядає наступним чином

$$\mu_{\tilde{A}}(x, z) = \begin{cases} [\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x), \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x)], & x = x', z = z' \\ 0, & x \neq x', z \neq z' \end{cases} \quad (3.11)$$

Тоді фазифікацію для кожного чіткого входу X визначається наступним чином [109]

$$\begin{aligned} \tilde{A}_{x_1} &= \sum_{z \in Z} \sum_{x_1(z) \in X_1} \frac{\mu_{x_1}(x_1(z), z)}{(x_1(z), z)}, \text{ де } \mu_{x_1}(x_1, z) = \int_{u \in J_{x_1}} \left[\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_1(z), z), \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_1(z), z) \right] \frac{1}{u} \\ &\quad \vdots \\ \tilde{A}_{x_N} &= \sum_{z \in Z} \sum_{x_N(z) \in X_N} \frac{\mu_{x_N}(x_N(z), z)}{(x_N(z), z)}, \text{ де } \mu_{x_N}(x_N, z) = \int_{u \in J_{x_N}} \left[\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_N(z), z), \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_N(z), z) \right] \frac{1}{u} \end{aligned} \quad (3.12)$$

де u – вторинна змінна, що є інтервалом для функції належності при заданих x та z .

Отже, загальна фазифікація для N чітких входів має вигляд [109]

$$\tilde{A}_X = \sum_{z \in Z} \sum_{x_1(z) \in X_1} \cdots \sum_{x_N(z) \in X_N} \frac{\mu_{x_1}(x_1(z), z) * \cdots * \mu_{x_N}(x_N(z), z)}{(x_1(z), \dots, x_N(z), z)}, \quad (3.13)$$

де $\mu_{x_N}(x_N, z) = \int_{u \in J_{x_N}} \left[\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_N(z), z), \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_N(z), z) \right] \frac{1}{u}$, * позначається операція

t-норми.

Після фазифікації чітких входів наступним є етап формування нечіткого логічного виводу на основі заданої бази правил. Використовуючи ТІНМТ2, l – те правило в базі набуває вигляду [109]

$$\tilde{R}^l: \text{Якщо } x_1(z) \text{ це } \tilde{C}_1^l \text{ та...та } x_j(z) \text{ це } \tilde{C}_j^l, \text{ то } u(z) \text{ це } \tilde{K}^l \quad (3.14)$$

де \tilde{R}^l – l – те правило ($l = 1, 2 \dots N$);

$x_j(z)$ ($j=1, 2, \dots, J$) – вхідні змінні у заданих точках простору;

\tilde{C}_j^l – ТІНМТ2;

u – керуючий вплив;

\tilde{K}^l – ІНМТ2;

N – кількість нечітких правил.

Нечіткий логічний вивід зводиться до приведення множини ТІНМТ2 до традиційного вигляду ІНМТ2. Використовуються наступні операції: об'єднання просторової інформації, зменшення розмірності та формування виводу. Процес формування виводу використовує операції об'єднання, перетину та доповнення, що описані вище. Правило (3.14) можна записати у вигляді нечіткого відношення [109]

$$\tilde{R}^l: \tilde{A}_1^l \times \dots \times \tilde{A}_n^l \rightarrow \tilde{K}^l, \quad l = 1, 2, \dots, N \quad (3.15)$$

Об'єднання просторової інформації – це перша операція у нечіткому виводі, що призведе до перетворення від тривимірного нечіткого інтервального входу \tilde{A}_x до тривимірного набору W^l , який є інтервальною нечіткою множиною типу 2 в кожній точці x_z . Множина W^l визначається як розширена sup-star [111] композиція вхідних множин. На рис. 3.9 зображено таку композиція для двох чітких входів для простору $Z: x(z)=[x_1(z), x_2(z)]$. Розширена sup-star композиція виконана на вхідній множині та заданих множинах l -того правила позначається

$$W^l_{\tilde{A}_x \circ (\tilde{C}_1^l \times \dots \times \tilde{C}_1^j)} = \tilde{A}_x \circ \left(\tilde{C}_1^l \times \dots \times \tilde{C}_1^j \right), \quad (3.16)$$

з верхнім та нижнім значенням функції належності

$$\begin{aligned} \bar{\mu}_{W^l} &= \bar{\mu}_{\tilde{A}_x \circ (\tilde{C}_1^l \times \dots \times \tilde{C}_1^j)}(x_z, z) = \sup_{x_1(z) \in X_1, \dots, x_j(z) \in X_j} \left[\bar{\mu}_{\tilde{A}_x}(x_z, z) * \bar{\mu}_{\tilde{C}_1^l \times \dots \times \tilde{C}_1^j}(x_z, z) \right] = \\ &= \sup_{x_1(z) \in X_1, \dots, x_j(z) \in X_j} \left[\bar{\mu}_{X_1}(x_1(z), z) * \dots * \bar{\mu}_{X_j}(x_j(z), z) * \bar{\mu}_{\tilde{C}_1^l}(x_1(z), z) * \dots * \bar{\mu}_{\tilde{C}_1^j}(x_j(z), z) \right] = \\ &= \left\{ \sup_{x_1(z) \in X_1} \left[\bar{\mu}_{X_1}(x_1(z), z) * \bar{\mu}_{\tilde{C}_1^l}(x_1(z), z) \right] \right\} * \dots * \left\{ \sup_{x_j(z) \in X_j} \left[\bar{\mu}_{X_j}(x_j(z), z) * \bar{\mu}_{\tilde{C}_1^j}(x_j(z), z) \right] \right\} \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} \underline{\mu}_{W^l} &= \underline{\mu}_{\tilde{A}_x \circ (\tilde{C}_1^l \times \tilde{C}_2^l)}(x_z, z) = \sup_{x_1(z) \in X_1, x_2(z) \in X_2} \left[\underline{\mu}_{\tilde{A}_x}(x_z, z) * \underline{\mu}_{\tilde{C}_1^l \times \tilde{C}_2^l}(x_z, z) \right] = \\ &= \sup_{x_1(z) \in X_1, x_2(z) \in X_2} \left[\underline{\mu}_{X_1}(x_1(z), z) * \underline{\mu}_{X_2}(x_2(z), z) * \underline{\mu}_{\tilde{C}_1^l}(x_1(z), z) * \underline{\mu}_{\tilde{C}_2^l}(x_2(z), z) \right] = \\ &= \left\{ \sup_{x_1(z) \in X_1} \left[\underline{\mu}_{X_1}(x_1(z), z) * \underline{\mu}_{\tilde{C}_1^l}(x_1(z), z) \right] \right\} * \left\{ \sup_{x_2(z) \in X_2} \left[\underline{\mu}_{X_2}(x_2(z), z) * \underline{\mu}_{\tilde{C}_2^l}(x_2(z), z) \right] \right\} \end{aligned}$$

де $z \in Z$, добуток $*$ позначає операцію t-норми.

Далі виконується операція скорочення просторості. Множина W^l є просторовим розподілом для кожного входу x_z , де координата z визначається на стадії розробки. Операція скорочення просторості полягає в стисненні просторово розподіленої інформації (x_z, μ, z) до двовимірної (x_z, μ) .

Після проведення об'єднання отримуємо для кожного входу x_z двовимірну функцію належності на площині (μ, z) . Операція центроїда є одним з ефективних варіантів [109] стиснення тривимірної множини W^l до двовимірної множини, що дозволяє описати загальний вплив просторово розподіленої системи на вхід x_z . Верхня та нижня функції належності визначаються наступним чином

$$\bar{\mu}_{\phi^l} = \frac{\sum_{i=1}^{p-1} \frac{(\bar{\mu}_{W^l}(z_i) + \bar{\mu}_{W^l}(z_{i+1}))}{2} \Delta s_i}{\sum_{i=1}^{p-1} \Delta s_i}, \quad \underline{\mu}_{\phi^l} = \frac{\sum_{i=1}^{p-1} \frac{(\underline{\mu}_{W^l}(z_i) + \underline{\mu}_{W^l}(z_{i+1}))}{2} \Delta s_i}{\sum_{i=1}^{p-1} \Delta s_i} \quad (3.18)$$

де p – кількість вхідних значень датчиків з нижнім $\underline{\mu}_{W^l}(z_i)$ та верхнім $\bar{\mu}_{W^l}(z_i)$ значеннями функції належності;

$\Delta s_i = \sqrt{(\mu_{W^l}(z_{i+1}) - \mu_{W^l}(z_i))^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}$ - довжина i -того відрізка прямої;

$(\mu_{W^l}(z_{i+1}) - \mu_{W^l}(z_i))/2$ - відстань від осі z до центроїда i -того сегменту.

Механізм виводу складається з операції акумуляції та приведення типу. Результат виконання процедури акумуляції N правил виглядає наступним чином [101]

$$\tilde{B} = \frac{1}{\cup_{\forall u \in U} [\underline{\mu}_{\tilde{B}}(u), \bar{\mu}_{\tilde{B}}(u)]} = \left(\cup_{\forall u \in U} \left[\begin{array}{c} \max \left(\underline{\mu}_{\phi^1}(u) \dots \underline{\mu}_{\phi^{N'}}(u) \right), \\ \max \left(\underline{\mu}_{\phi^1}(u) \dots \underline{\mu}_{\phi^{N'}}(u) \right) \end{array} \right] \right)^{-1} \quad (3.19)$$

де N' – кількість продукційних правил.

Тоді верхня та нижня границя функції належності визначаються як

$$\begin{aligned} \underline{\mu}_{\tilde{B}}(u) &= \max \left(\underline{\mu}_{\phi^1}(u) \dots \underline{\mu}_{\phi^{N'}}(u) \right), \forall u \in U; \\ \bar{\mu}_{\tilde{B}}(u) &= \max \left(\underline{\mu}_{\phi^1}(u) \dots \underline{\mu}_{\phi^{N'}}(u) \right), \forall u \in U. \end{aligned} \quad (3.20)$$

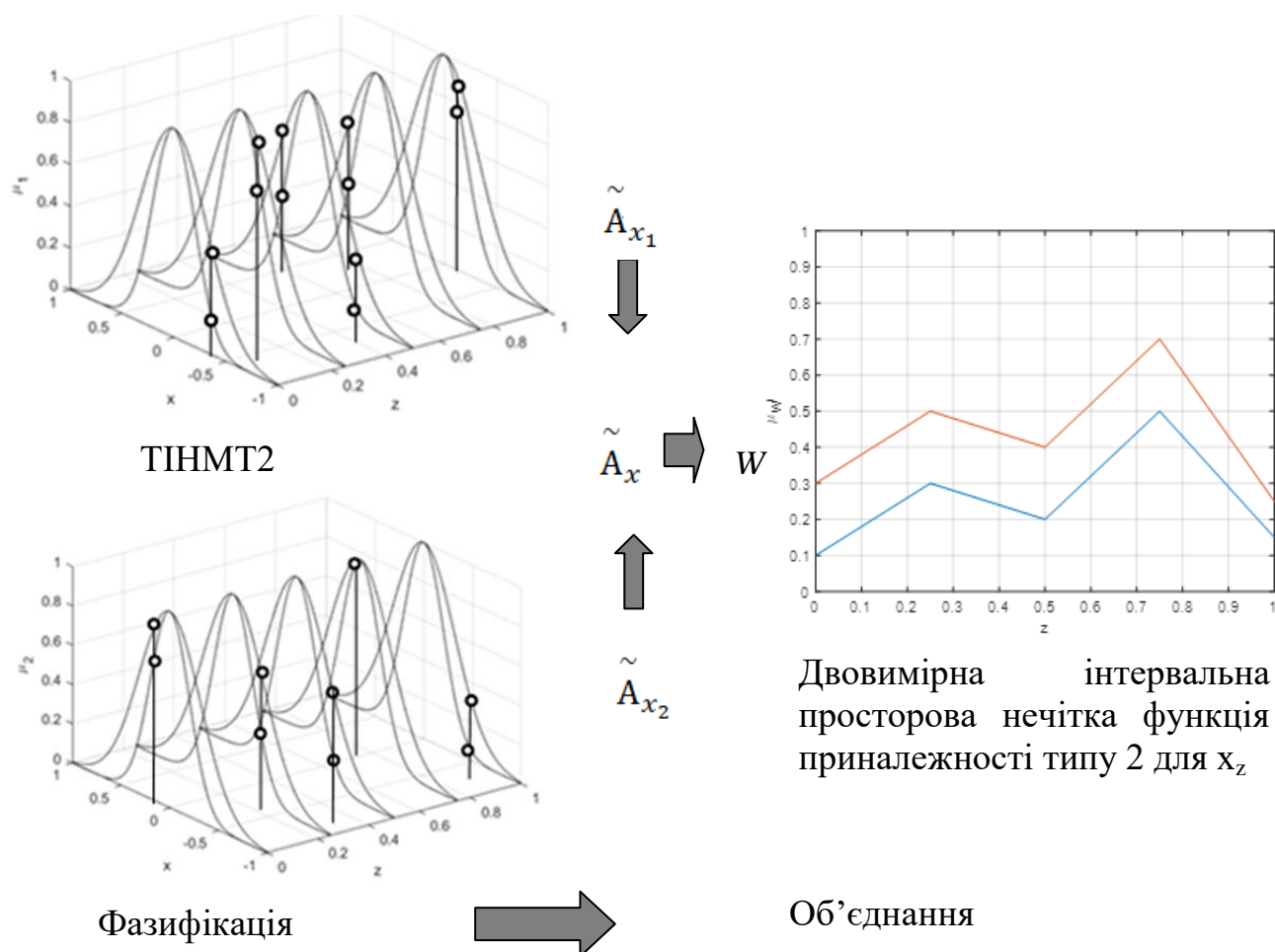


Рис. 3.9. Об'єднання просторової інформації для кожного чіткого входу
 $x(z)=[x_1(z), x_2(z)]$

Мета приведення типів – це перехід до традиційної нечіткої множини. Згідно [101] перетворюємо типи шляхом пошуку центроїду всіх продукційних правил. Результатом стає колекція чисел, що містить найбільше та найменше значення, тобто

$$C_{\tilde{B}}(z) = \frac{1}{\{c_1(z), \dots, c_r(z)\}} \quad (3.21)$$

де

$$c_l(z) = \min_{\forall \theta_i \left[\underline{\mu}_B^{\sim}(u_i), \bar{\mu}_B^{\sim}(u_i) \right]} \frac{\sum_{i=1}^N u_i \theta_i}{\sum_{i=1}^N \theta_i}, c_r(z) = \max_{\forall \theta_i \left[\underline{\mu}_B^{\sim}(u_i), \bar{\mu}_B^{\sim}(u_i) \right]} \frac{\sum_{i=1}^N u_i \theta_i}{\sum_{i=1}^N \theta_i}. \quad (3.22)$$

Для знаходження c_l та c_r було використано ітераційний алгоритм Карніка – Менделя [131], із наступними загальними формулами

$$c_l(z) = \frac{\sum_{i=1}^L u_i(z) \bar{\mu}_B^{\sim}(u_i) + \sum_{i=L+1}^N u_i \underline{\mu}_B^{\sim}(u_i)}{\sum_{i=1}^L \bar{\mu}_B^{\sim}(u_i) + \sum_{i=L+1}^N \underline{\mu}_B^{\sim}(u_i)}, \quad (3.23)$$

$$c_r(z) = \frac{\sum_{i=1}^R u_i(z) \underline{\mu}_B^{\sim}(u_i) + \sum_{i=R+1}^N u_i \bar{\mu}_B^{\sim}(u_i)}{\sum_{i=1}^R \underline{\mu}_B^{\sim}(u_i) + \sum_{i=R+1}^N \bar{\mu}_B^{\sim}(u_i)}.$$

І останньою проводиться дефазифікація. Оскільки у приведенні типів використовується і операція знаходження центроїда, то дефазифікація зводиться до [101]

$$u = \frac{1}{2} (c_r + c_l). \quad (3.24)$$

Отже, була визначена структура тривимірного нечіткого інтервального контролеру типу 2 та основні його операції шляхом синтезу тривимірного нечіткого контролера та інтервального контролера типу 2. Це призвело до розширення механізму формування виводу, який, завдяки операціям об'єднання просторової інформації та скорочення просторовості, дозволяє перейти від тривимірної нечіткої інтервальної множини типу 2 до нечіткої інтервальної множини типу 2, а акумуляція та механізм приведення типів забезпечують перехід до традиційної нечіткої множини.

3.4 Дослідження параметрів ультразвукових фазованих решіток для формування просторового керування процесом ультразвукового очищення

Використання скоординованої роботи декількох ультразвукових випромінювачів дозволяє підвищити ефективність впливу за рахунок активізації неколапсуючих кластерів у віддалених зонах кавітації. У праці [19] наведено експеримент з використанням установки (рис. 3.10) з двома несинхронізованими випромінювачами ультразвуку високої та низької амплітуди. Цей експеримент довів, що, на певних відстанях, робоча площа кавітаційної активності при двох випромінювачах більша, ніж сума робочих площ кожного випромінювача окремо. Це доцільно використовувати при ультразвуковій обробці виробів складної конфігурації, що мають внутрішні отвори. Технологія, що дозволяє формувати спрямований ультразвуковий вплив – це використання ультразвукових фазованих решіток.

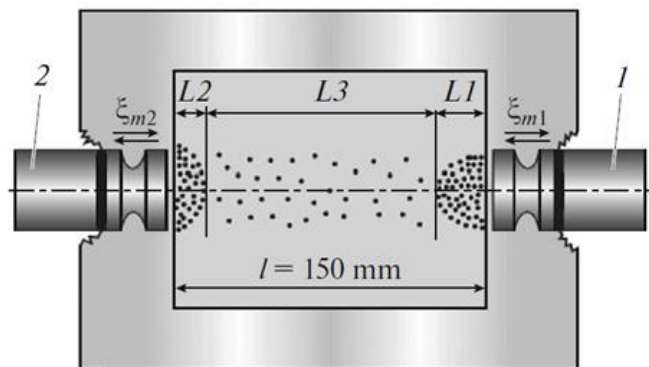


Рис. 3.10. Експериментальна установка з високо- та низькочастотними ультразвуковими випромінювачами

Для визначення оптимального просторового керування ультразвуковим очищенням із використанням ультразвукової фазованої решітки проведено дослідження впливу фізичних параметрів решітки на сформоване поле тиску.

Проаналізовано залежність вигляду поля максимального сформованого тиску від кута спрямування, кількості елементів в лінійній фазованій решітці та відстані між елементами. Для цього змодельовано промінь із відповідними параметрами апертури та спрямування.

На першому етапі досліджено залежність максимального тиску від кількості перетворювачів. Кількість перетворювачів 8, 12, 32 та 64 перетворювачів. Кут променя при цьому дорівнював 0° , а відстань до фокусу – 200 мм. Відстань між перетворювачами не враховувалась.

За отриманими шаблонами ультразвукових променів (рис. 3.11) можна зробити висновок, що при збільшенні кількості перетворювачів при значній віддаленості точки фокусування зростає не максимальне значення акустичного тиску, який генерується лінійною решіткою, а область його розповсюдження.

Так шкали поряд із шаблонами променів демонструють, що для випадків із 8, 16 та 32 перетворювачами максимальне значення близько 1,3 МПа, лише для 8 перетворювачів це значення збільшується до 1,42 МПа. У той же час простежується збільшення зони із значним тиском при збільшенні кількості перетворювачів. Таким чином, розміри ультразвукової фазованої решітки, що використовується при ультразвуковому очищенні в якості основного виконуючого механізму, мають залежати від геометричних розмірів ванни.

Для визначення можливостей ефективного фокусування було розглянуто решітки із 16 та 32 елементів (інші відкинуті за неможливістю формувати промінь у досить віддалену точку) із кутами 25° , 45° та 70° .

Для 32 перетворювачів при кутах 25° та 45° - не спостерігається зменшення максимальної потужності 1,3 МПа, але при куті у 70° вона стає 1,12 МПа. Також при збільшенні кута спостерігається зменшення області із значним значенням акустичного тиску, що може негативно впливати на енергоефективність в процесі очищення.

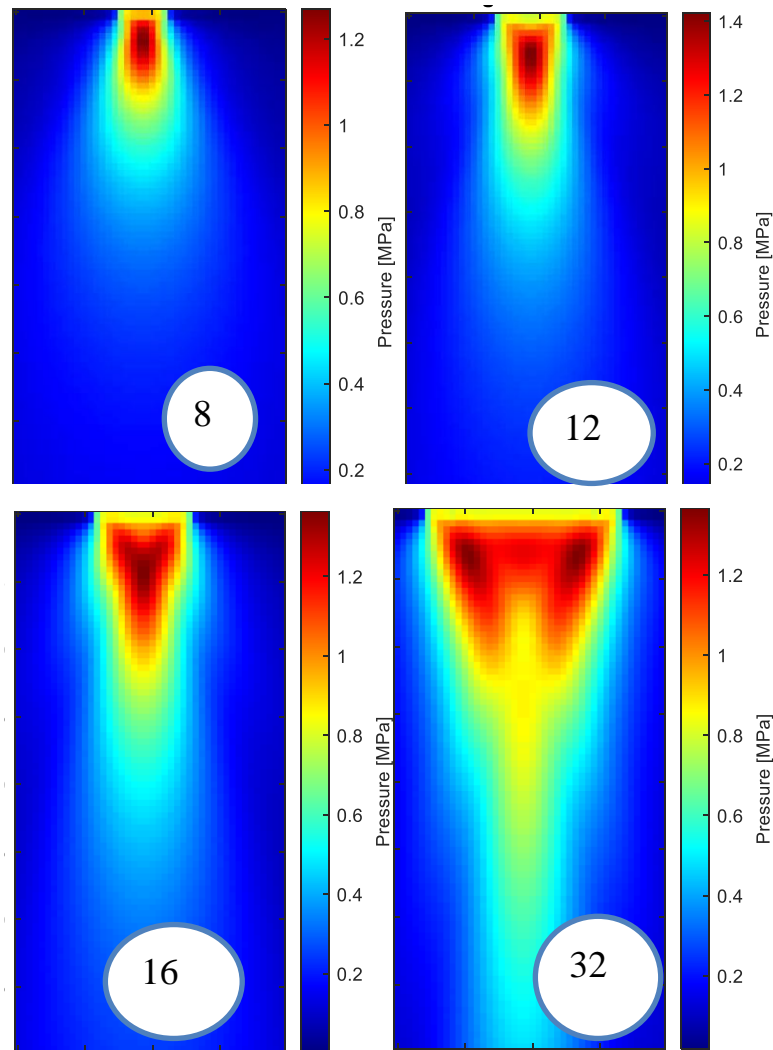


Рис. 3.11. Моделювання ультразвукового променя для різної кількості перетворювачів у k-Wave [53]

При збільшенні кута втрачається максимальна потужність, а при досить великих значеннях фокусування майже не відбувається, весь тиск групується біля перетворювачів. Так для 16 перетворювачів (рис. 3.12) при 25° - максимальна потужність 1,42 МПа, при 45° - вона зменшується до 1,3 МПа, а при 70° стає менше 1,1 МПа.

Для аналізу впливу значення відстані між перетворювачами були змодельовані промені без відстані між перетворювачами та із відстанню, що дорівнює розміру перетворювачів (рис. 3.13).

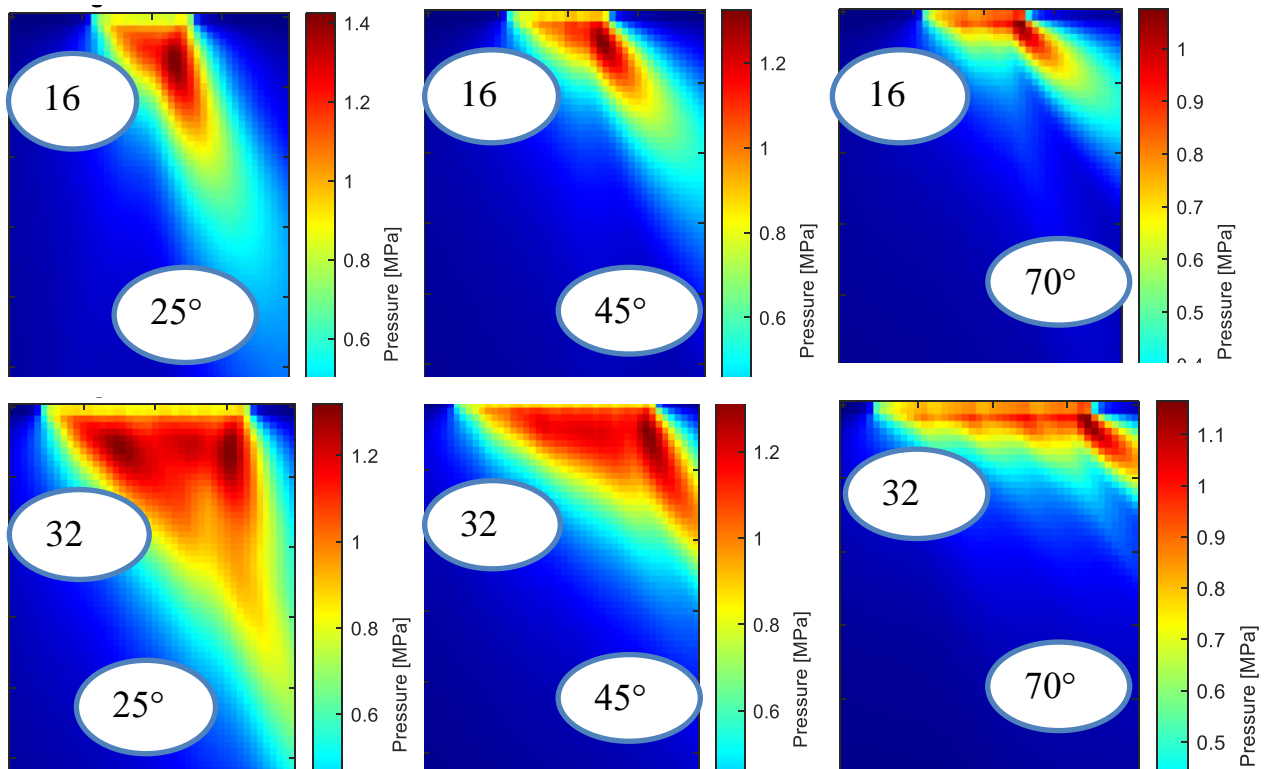


Рис. 3.12. Моделювання променя із кутами у 25° , 45° та 70° для ультразвукової фазованої решітки із 16 та 32 перетворювачами

Поведінка променів при цьому відповідає виразу (1.8), тобто сумарний акустичний тиск не змінюється, але при цьому за рахунок того, що решітка перетворювачів із відстанями між елементами займає більшу площу, то й промінь також охоплює більшу площу, хоча й з меншим акустичним тиском. Це відбувається незалежно від значення кута спрямування. Так, на рис. 3.13 для 0° максимальний акустичний тиск для решітки з 16 елементів без відстаней між перетворювачами склав 1,3 МПа, а для такої ж решітки, але із відстанями, що дорівнюють розміру перетворювача – 0,68 МПа. При цьому за візуальним зображенням видно, що площа, яку охоплює промінь зросла більше ніж вдвічі. Таким чином, для ультразвукового очищення більш доцільно використовувати фазовані решітки із відстанями, оскільки площа, яка оброблюється ультразвуком є більш значним фактором для формування достатньої кількості кавітаційних колапсів, ніж значення величини акустичного тиску.

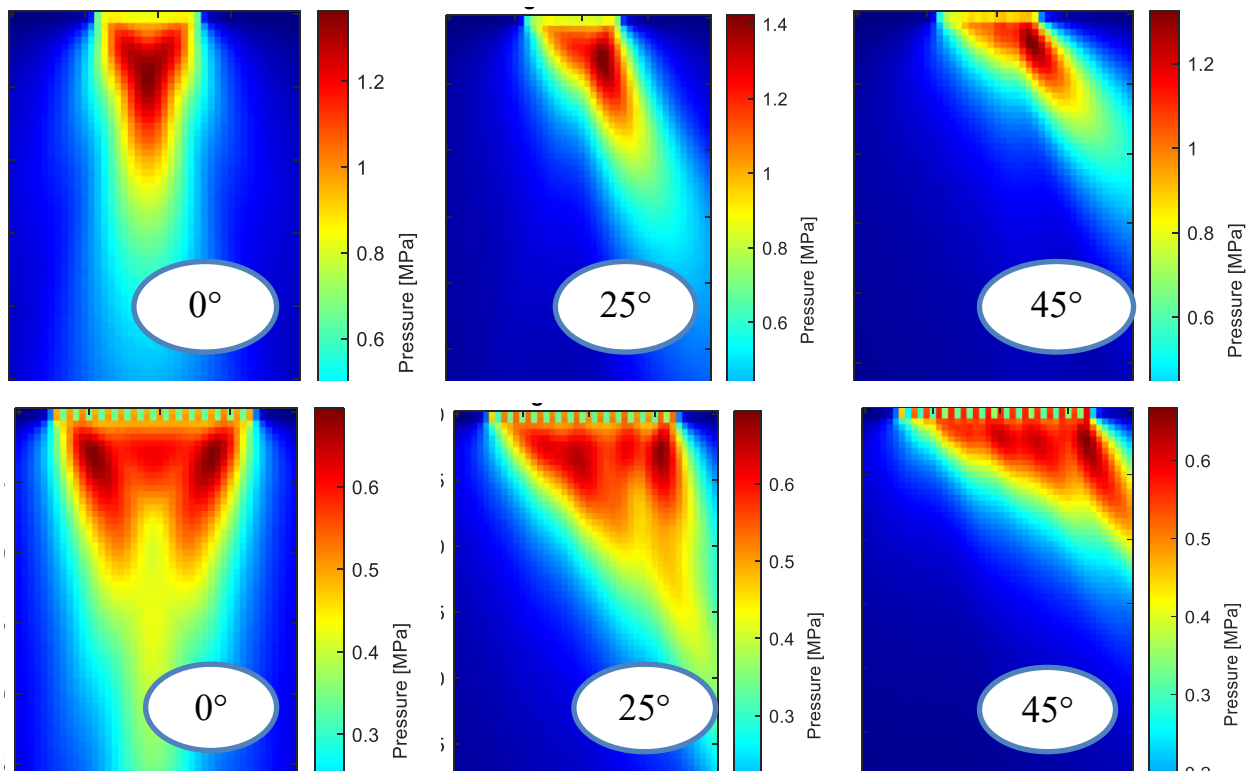


Рис. 3.13. Моделювання променю із кутами у 0° , 25° та 45° для ультразвукової фазованої решітки із 16 перетворювачів без відстаней між елементами (зверху) та з відстанями, що дорівнюють розміру перетворювача (знизу)

Зазвичай ультразвукове очищення проводиться на частоті від 20 до 80 кГц [14]. Проаналізуємо як впливає частота ультразвуку на можливості формування променю.

Отже, зростання частоти робить керування променем більш ефективним, що робить його доцільним інструментом при фінальному очищенні обладнання, яке вимагає високої якості чистоти.

Дослідження впливу параметрів двовимірної решітки на ефективне формування променю у заданому напрямі було проведено на решітці з 4×4 елементів з розмірами комірки $50 \cdot 10^{-3}$ м із наступними кутами спрямування: азимутний $\varphi = 0^\circ, 45^\circ, 70^\circ$, зенітний $\theta = 0^\circ, 30^\circ$. Використано було продукт Matlab Sensor Array Analyzer [132]. При зенітному куті в 0° відбувається ефективне спрямування за азимутним кутом, окрім випадку, коли кут дорівнює 70° – тоді відбувається формування бокових пелюсток із значною амплітудою (рис. 3.14).

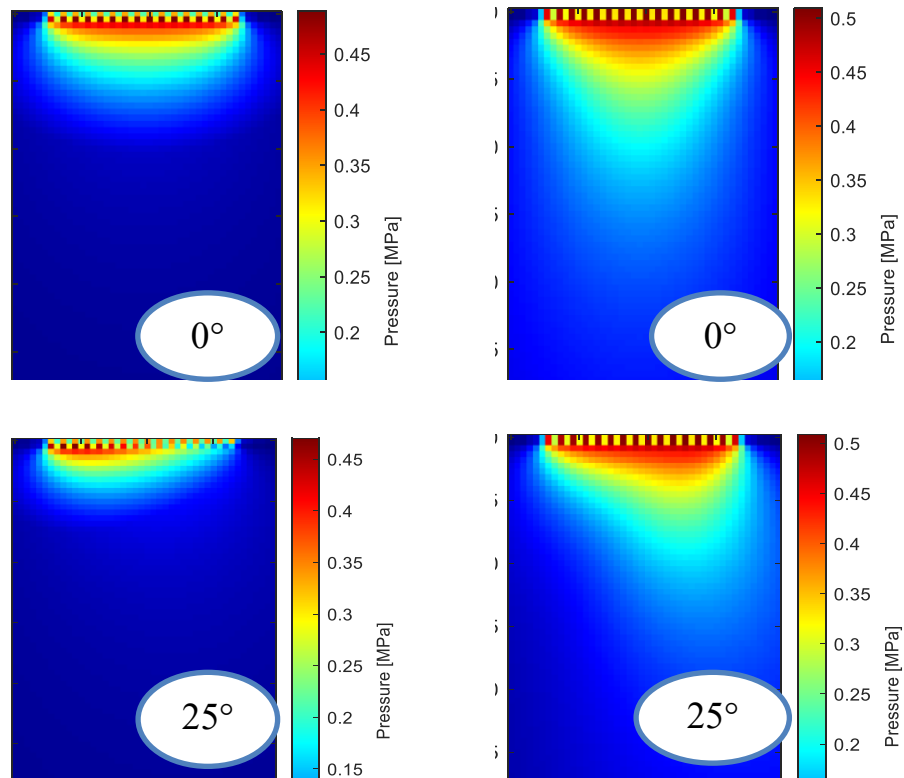


Рис. 3.14. Моделювання променя із кутами у 0° , 25° для ультразвукової фазованої решітки із 16 перетворювачів з відстанями, що дорівнюють розміру перетворювача для частоти 50 кГц (справа) та 100 кГц (зліва)

При подальшому дослідженні було отримано наступний результат: на достатньо великих значеннях азимутного кута ($>45^\circ$) відбувається спотворення не лише азимутного напрямку, але й зенітного. Якщо при $\varphi=45^\circ$ та $\theta = 0^\circ$ промінь за зенітним кутом чітко формується, при збільшенні φ до 70° відбувається втрата напрямку і за θ (рис. 3.15).

Оскільки кути φ та θ виявились взаємозалежними, то було проведено дослідження граничних значень кожного кута, яке дозволяє ефективно керувати іншим кутом.

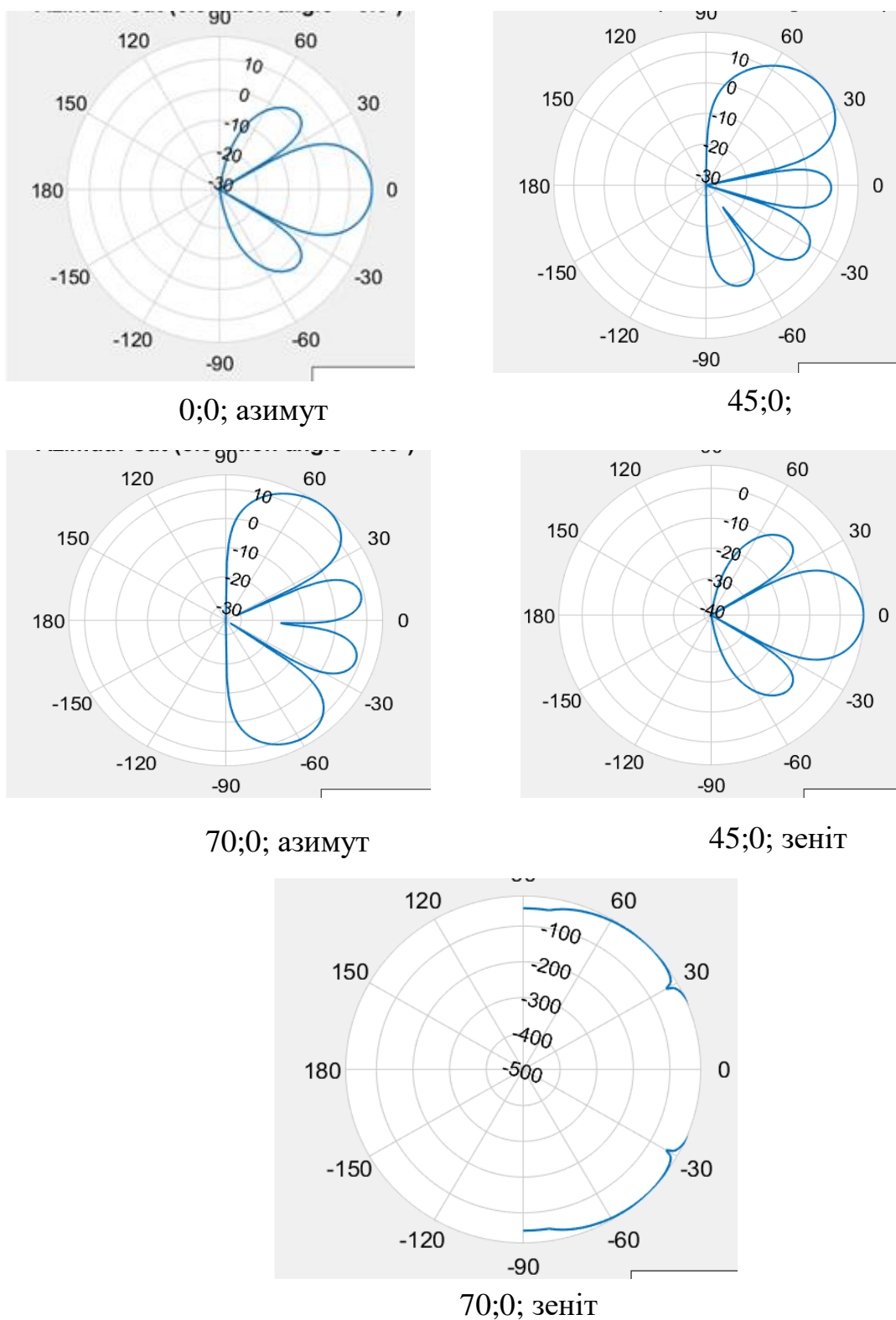


Рис. 3.15. Моделювання променів для ультразвукової фазованої решітки (φ – азимутний кут, θ – зенітний)

Шляхом моделювання був визначений граничний кут у 27° для азимутного та зенітного кутів. Після цього значення фокусування за іншим кутом не відбувалося.

3.5 Методика керування ультразвуковим очищенням із використанням фазованої решітки

Для підвищення енергоефективності очищення необхідно формувати керуючу дію із максимізацією впливу в зонах найбільшого забруднення. Визначення таких зон відбувається згідно аналізу ультразвукових відгуків, описаного вище. Але використання звичайних ультразвукових перетворювачів обмежує керування процесом, тому пропонується [125] використання ультразвукових фазованих решіток, що дає змогу переспрямовувати потужність у необхідному напрямку. Часова затримка для кожного перетворювача розраховується за визначеними значеннями відстані до фокусу та азимутного і зенітного кутів, які знаходяться із геометричних залежностей у ванні та аналізу ультразвукових відгуків. Окрім, питання визначення закону затримки для формування променя, важливим моментом є вплив кута спрямування на результуючу інтенсивність у заданому напрямку. Тобто той акустичний тиск, який буде у заданому напрямі в залежності від апертури (фізичних розмірів поверхні, що представляють комбінований розподіл активних і пасивних ультразвукових датчиків: іншими словами, площа решітки. Апертура решітки визначається кількістю ультразвукових датчиків (елементів), їх розмірами та їх розподілом) ультразвукової фазованої решітки та від параметрів точки фокусування.

Хвильове рівняння для моделювання поля тиску, що створене довільним джерелом та поширюється в однорідному середовищі виглядає наступним чином [132]

$$\partial_x^2 p(x, t) - \frac{1}{c_0^2} \partial_t^2 p(x, t) = S(x, t) \quad (3.25)$$

де ∂_x^2 та ∂_t^2 – похідні другого порядку, відповідно до простору та часу;

$p(x, t)$ – функція поля тиску;

$x = (x, y, z)$ – тривимірні Декартові координати,

c_0 – швидкість звуку, м/с;

$S(x, t)$ – функція джерела.

Для монохроматичного точкового джерела $S(x, t) = \delta(x) \cos(2\pi f_0 t)$, тоді розв'язок (3.25) можна записати як [129]

$$p_{MP_s}(x, t) = \frac{P_0}{4\pi|x|} \cos \left[2\pi f_0 \left(t - \frac{|x|}{c_0} \right) \right], \quad (3.26)$$

де $p_{MP_s}(x, t)$ – поле тиску, що створено монохроматичним точковим джерелом;

P_0 – амплітуда джерел, Па;

f_0 – частота, Гц.

Тоді сумарний тиск для декількох джерел

$$p(x, t) = \sum_{i=1}^N \frac{P_0}{4\pi D_i} \cos \left[2\pi f_0 \left(t - \frac{D_i}{c_0} \right) \right], \quad (3.27)$$

де N – кількість точкових джерел;

D_i — відстань між точкою, для якої розраховується поле тиску, і джерелом i , м.

Отже, умовою отримання максимального тиску у заданій точці є або однакова відстань від точкових джерел, або використання фазового коефіцієнту для компенсації відмінностей між D_i . Крім того для збільшення значень акустичного

тиску також можна збільшувати кількість точкових джерел, але при цьому зростають як початкові витрати, так і витрати енергії в процесі експлуатації.

Моделювання очищення із використанням наведеної методики доводить її ефективність у можливості збільшення інтенсивності ультразвуку у найбільш забруднених ділянках.

Відмінність нової моделі процесу ультразвукового очищення у застосуванні ультразвукових фазованих решіток якості виконавчих механізмів. Це не обмежує формування спрямованої дії ультразвуком на необхідну ділянку та дає змогу переспрямувати акустичні потоки.

Для оптимізації формування керуванням процесом ультразвукового очищення вихідними параметрами визначено не лише значення інтенсивності, але й значення кута ультразвукового променя. Отже, очищення відбувається за допомогою m ультразвукових фазованих решіток, що розташовані у заданих позиціях та задаються коефіцієнтами інтенсивності $u(z) = (u(z_1), u(z_2), \dots, u(z_m))$ та коефіцієнтами нахилу ультразвукового променя $\alpha(z) = (\alpha(z_1), \alpha(z_2), \dots, \alpha(z_m))$.

Схематичне зображення ультразвукової ванни з просторово розподіленим керуванням із використанням у якості випромінювачів ультразвукових решіток наведено на рис. 3.16.

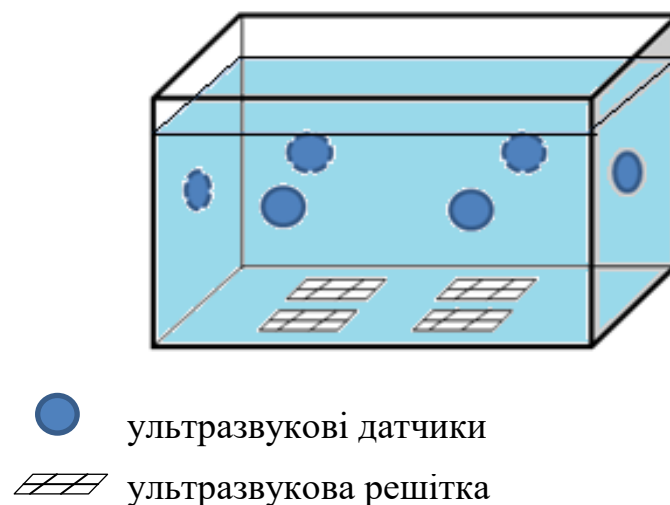


Рис. 3.16. Схематичне зображення ультразвукової ванни

Згідно поставленій задачі необхідно розрахувати відстань до фокусної точки та кут нахилу ультразвукового променя у напрямку більшої «інтенсивності» очищення (рис. 3.17).

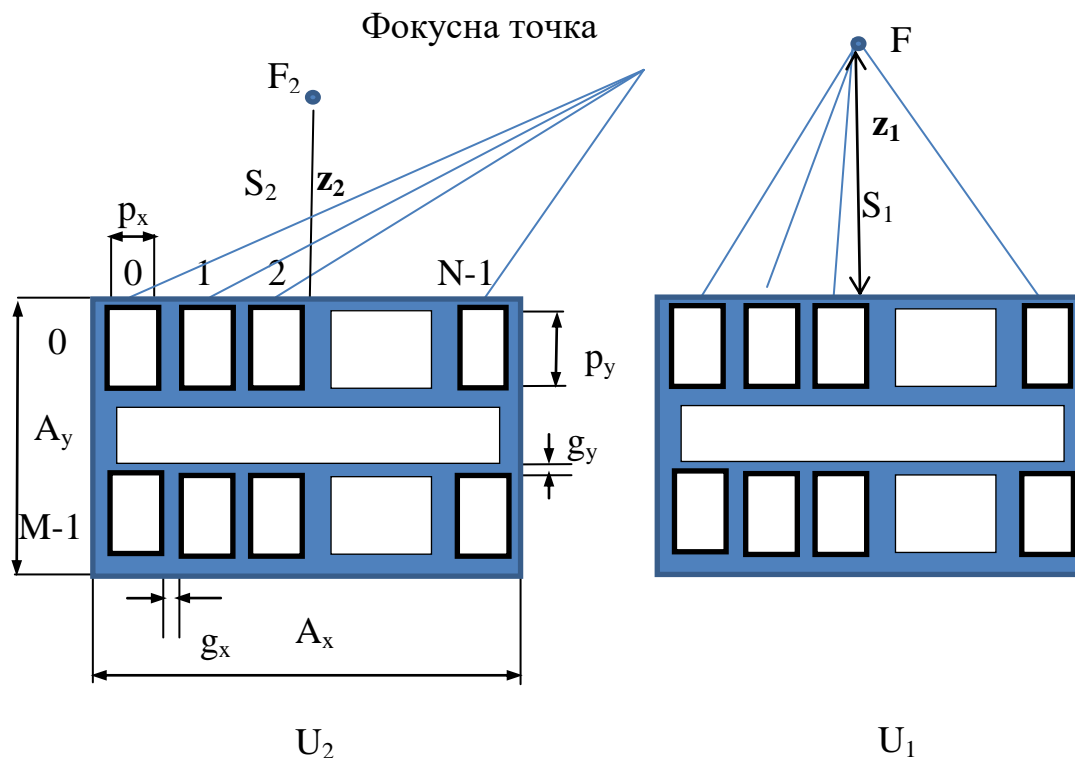


Рис. 3.17. Схематичне зображення взаємодії двох фазованих решіток

Значення відстані до фокусної точки визначаємо за часом надходження порогового значення сигналу, до двох сусідніх датчиків (рис. 3.18) [125].

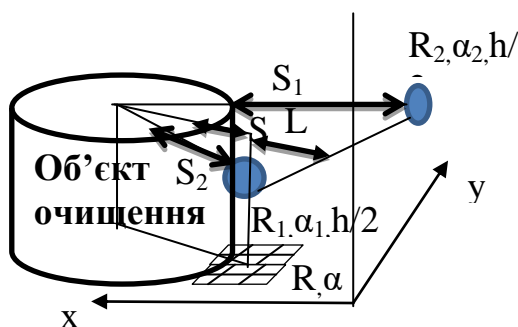


Рис. 3.18. Схематичне зображення розрахунку параметрів ультразвукового променя

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \frac{ct_1}{2}, \\
 S_2 &= \frac{ct_2}{2} \\
 L &= \frac{|aR\cos\alpha + R\sin\alpha + d|}{\sqrt{a^2 + 1}},
 \end{aligned}
 \tag{3.28}$$

де c – швидкість розповсюдження ультразвуку у рідині, м/с;

t_1 та t_2 – час надходження порогового значення сигналу до двох найближчих датчиків, с;

R та α – полярні координати центру випромінювача,

$$\begin{aligned}
 a &= -\frac{R_2\sin\alpha_2 - R_1\sin\alpha_1}{R_2\cos\alpha_2 - R_1\cos\alpha_1} \\
 d &= -R_1\sin\alpha_1 + aR_1\cos\alpha_1,
 \end{aligned}
 \tag{3.29}$$

де $R_1, \alpha_1, R_2, \alpha_2$ – полярні координати сусідніх до випромінювача датчиків.

Тоді відстань від проекції випромінювача у площину датчиків до обладнання розраховуємо наступним чином

$$S = \frac{R_2|\alpha_1 - \alpha| + R_1|\alpha_2 - \alpha|}{|\alpha_1 + \alpha_2|} - L.
 \tag{3.30}$$

Це і буде фокусна відстань, у площині датчиків, яка визначає відстань від обладнання до випромінювача.

Кут променя визначається залежності від розрахованих за допомогою нечіткого інтервального контролера типу 2 інтенсивностей сусідніх датчиків у напрямку найбільшого значення інтенсивності. Але, у будь-якому випадку, кут нахилу сформованого променя не має перевищувати 45° , оскільки це призведе до появи бокових пелюстків та погіршення ефективності керування [118]. Тому кут

керування знаходиться у межах 0° – 45° та змінюється пропорційно відношенню коефіцієнтів інтенсивностей

$$\varphi = 45^\circ \cdot \frac{u(z_1)}{u(z_2)}, \quad (3.31)$$

де $u(z_1) < u(z_2)$.

Для фазованої решітки із найбільшим значенням інтенсивності $\varphi=0$.

Напрямок в азимутній площині визначено так, щоб промінь було спрямовано у половинне значення висоти ультразвукової ванни (рис. 3.19).

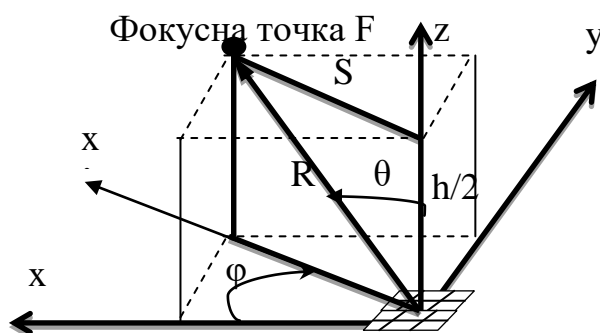


Рис. 3.19. Параметри ультразвукового променя

Значення фокусної відстані визначається як

$$R = \sqrt{S^2 + \frac{h^2}{4}}. \quad (3.32)$$

Значення азимутного кута

$$\theta = \text{atn} \left(\frac{2S}{h} \right). \quad (3.33)$$

За описаними параметрами ультразвукового променя знаходимо час затримки для кожного елемента ультразвукової решітки. Схематичне зображення системи координат наведено на рис. 3.19. Для деякого перетворювача, що

розташовано у позиції $x = (x_n, y_m)$ для кутового променя з точки F отримуємо наступну різницю часу [118]

$$\Delta\tau_{nm}(x, F) = \frac{(|F-x_0| - |F-x|)}{c}, \quad (3.34)$$

де x_0 – координата центру масиву, тобто за початок координат визначено саме центр ультразвукової фазованої решітки.

У сферичній системі координати фокусної точки, що були розраховані вище приймають наступний вигляд

$$F = (F_1, F_2, F_3) = (R\sin\theta\cos\varphi, R\sin\theta\sin\varphi, R\cos\theta). \quad (3.35)$$

Тоді різниця часу складає

$$\Delta\tau_{nm}(x, F) = \frac{R \left[1 - \sqrt{\left(\frac{\sin\theta\cos\varphi - x_n/R}{R} \right)^2 + \left(\frac{\sin\theta\sin\varphi - y_m/R}{R} \right)^2 + \cos^2\theta} \right]}{c}. \quad (3.36)$$

Якщо обмежити вплив лише напрямом, не враховуючи відстань до обладнання R , то спрощене значення для закону затримки часу виглядає як

$$\Delta\tau_{nm}(x, \theta, \varphi) = \Delta\tau_n(x, \theta, \varphi) + \Delta\tau_n(x, \theta, \varphi) = \frac{x_n \sin\theta \cos\varphi}{c} + \frac{y_m \sin\theta \sin\varphi}{c}. \quad (3.37)$$

Отже, визначено всі параметри, що дозволяють сформувати спрямований вплив на зону, що цього потребує. Використання цих параметрів дає змогу переспрямувати акустичні потоки у необхідні зони та підвищити інтенсивність

ультразвукового випромінення у заданному напрямку. Результатом стане покращення енергоефективності та якості ультразвукового очищення.

Висновки до розділу 3

Для підвищення енергоефективності процесу ультразвукового очищення розроблено метод управління з урахуванням його просторової розподіленості. Описана технологія базується на тривимірному нечіткому інтервальному контролері типу 2, який має структуру подібну до традиційного з урахування просторовості та інтервальності функції належності. Визначено функцію належності, що враховує просторовий вплив вхідних параметрів. Складний фізичний процес множинного розсіювання врахований при цьому як спадна залежність при збільшенні відстані між датчиком та випромінювачем. Розроблена база правил, яка залишається двовимірною та не залежить від кількості датчиків та виходів.

Для підвищення енергоефективності очищення ультразвуком запропоновано використовувати в якості виконуючих механізмів ультразвукові фазовані решітки.

З метою визначення оптимальних значень для формування просторового керування при ультразвуковому очищенні було проведено моделювання фізичних параметрів лінійної фазованої решітки ультразвукових перетворювачів. Виявлено наступні залежності:

1. Кількість перетворювачів в решітці впливає на можливість фокусування у віддаленій точці – чим більше перетворювачів, тим далі можна спрямувати промінь.

2. Ефективне формування променя відбувається із кутами до 45° , із наступним збільшенням спостерігається зменшення як площі області значного акустичного тиску, так і його значення. За допомогою значення відстані між перетворювачами можна керувати розміром області значного акустичного тиску, але за рахунок зниження його значень.

3. Ефективність керування променем збільшується із зростанням частоти, тому фазовані ультразвукові решітки доцільно використовувати для виробів, що вимагають підвищеної чистоти.

4. При дослідженні двовимірного ультразвукової фазованої решітки було виявлено граничний кут у 45° при формуванні променя за одним з просторових кутів та у 27° при формуванні променя одночасно за азимутним та зенітним кутами.

Встановлені закономірності стали основою для визначення параметрів керування ультразвуковим променем для збільшення концентрації потужності у найбільш забруднених ділянках. На основі аналізу перебігу процесу очищення відбувається розрахунок кута для ультразвукового променя у напрямку найбільш інтенсивного перебігу очищення.

РОЗДІЛ 4.

РОЗРОБКА ТА АПРОБАЦІЯ ЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ ПРОСТОРОВОГО КЕРУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИМ ОЧИЩЕННЯ НА БАЗІ ТРИВИМІРНОЇ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

4.1 Структура автоматизованої системи просторового керування ультразвуковим очищенням

Автоматизована система керування ультразвуковим очищення на базі тривимірного нечіткого контролера має n входів та m виходів, які чітко визначені просторовими координатами (рис. 4.1). Кількість входів та виходів є взаємонезалежною величиною та визначається габаритами ультразвукової ванни. Збільшення кількості входів підвищує точність розрахунків вихідних даних, але при цьому вимагає додаткових коштів.

У якості вхідних даних прийнято зміни часу надходження граничного значення сигналу (x_1) та нелнійного коефіцієнта другого порядку (x_2), а вихідних – значення коефіцієнта інтенсивності для кожного випромінювача (u).

Основними обчислювальними процесами, що відбуваються при формуванні керування ультразвуковим очищенням з урахуванням його просторової розподіленості на основі оцінювання його перебігу за ультразвуковими відгуками є спектральний аналіз поточних відгуків, порівняння їх із значеннями для попереднього стану та на основі результату цього порівняння формування розподіленого керуючого впливу.

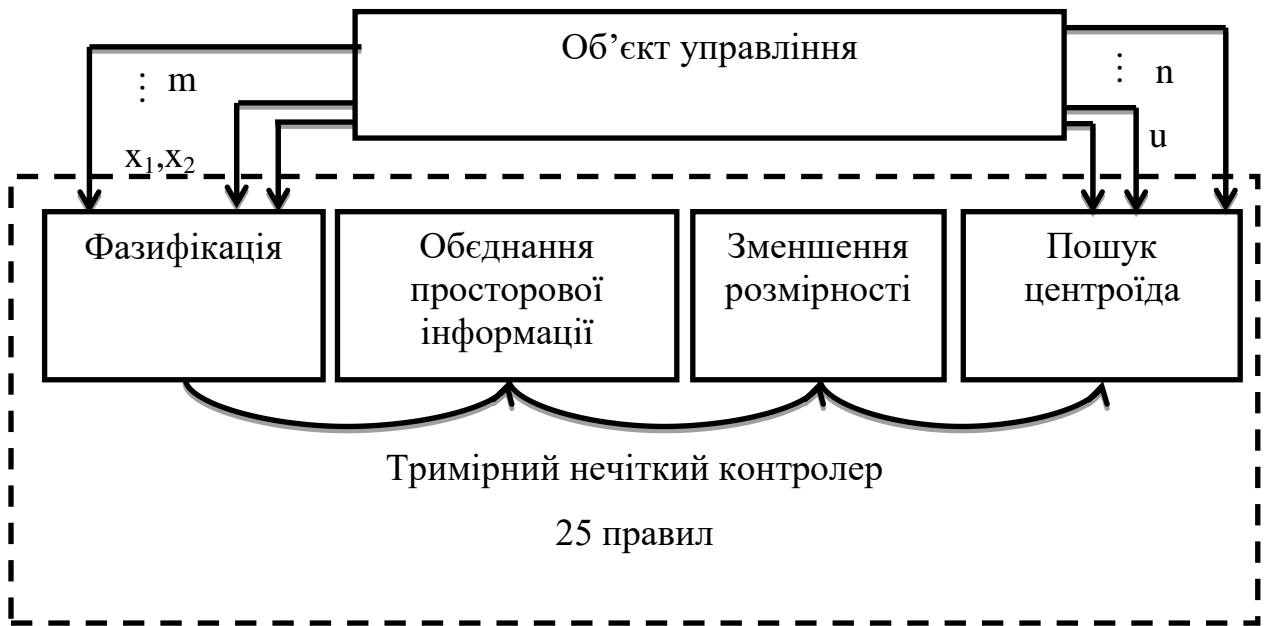


Рис. 4.1. Структурна схема автоматизованої системи керування ультразвуковим очищенням на базі нечіткої тривимірної логіки

Керування процесом ультразвукового очищення відбувається згідно алгоритму наведеного на рис. 4.2. Початкові етапи алгоритму: ініціалізація даних та фіксація початкових показників ультразвукових сенсорів для наступного порівняння із новими показниками. Ультразвукове очищення відбувається до набуття граничної різниці між попередніми та поточними показниками сенсорів або до фіксації значного скорочення часу надходження граничного сигналу (це є свідченням високої забрудненості рідини, що робить недоцільним подальше очищення). Основний ультразвуковий вплив (блок 5 – рис. 4.2) відбувається із застосуванням ультразвукових фазованих решіток із врахуванням інтенсивностей, що були розраховані в блоці 10 (на першому циклі очищення ці інтенсивності однакові та дорівнюють 1). Після етапу ультразвукового очищення відбувається нове сканування ультразвукових відгуків (блок 7), потім за спектральним розкладом попередніх та поточних показників сенсорів визначається оцінка перебігу процесу ультразвукового очищення (блок 8–9), яка і є основою для розрахунку нових значень інтенсивностей (блок 10).

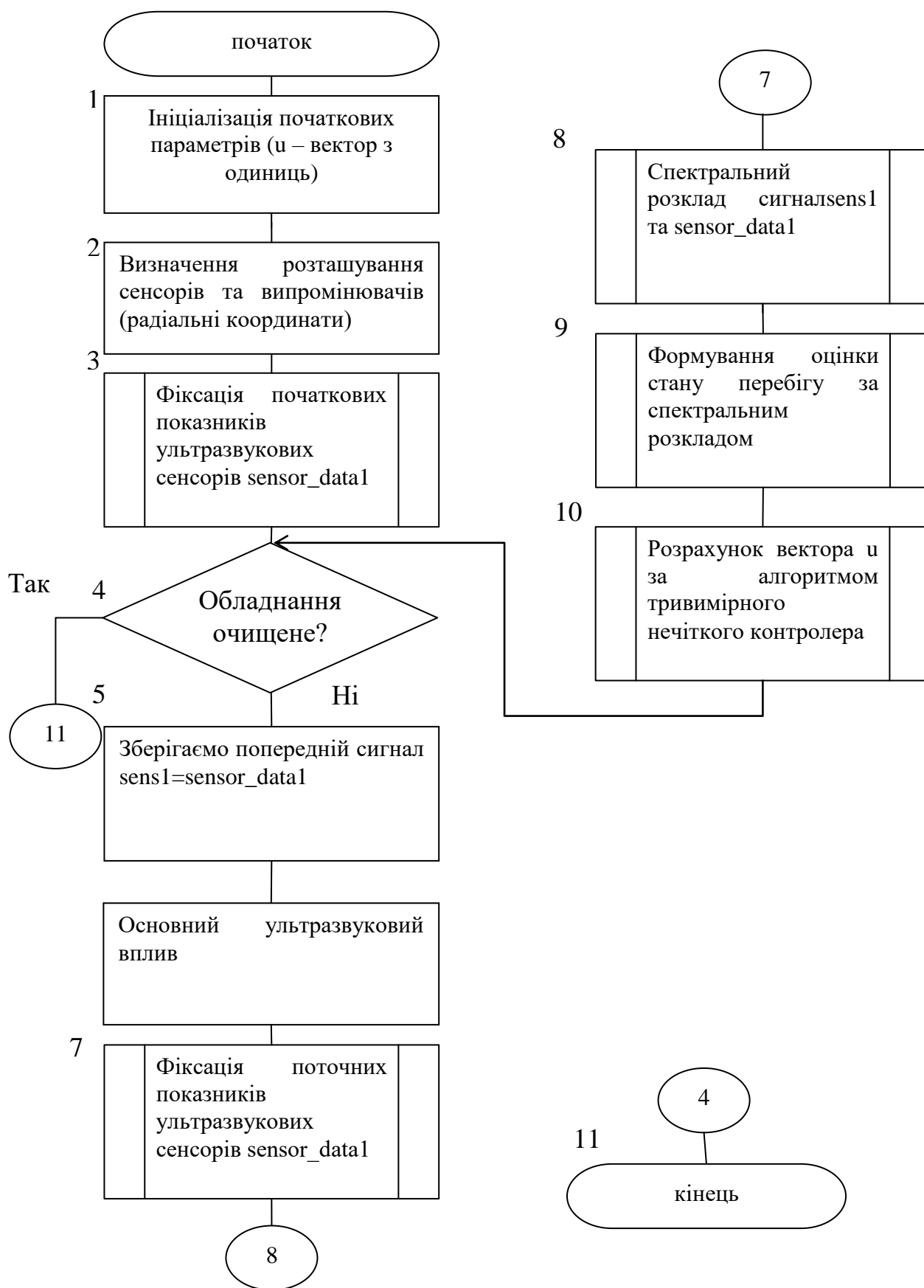


Рис. 4.2. Функціональний алгоритм очищення на базі ТНІ контролера

Для доведення ефективності розробленого методу оцінювання перебігу процесу очищення та застосування ультразвукових фазованих решіток в якості виконуючого механізму було проведене моделювання процесів ультразвукового очищення за різних умов, яке відбувалося згідно алгоритму наведеного на рис. 4.3.

Це є розширенням алгоритму з рис. 4.2, до якого додано етапи симулювання ультразвукових відгуків (блоки 4, 8 та 11) та виведення інформації про перебіг процесу (блок 10). Тривалість у 4 цикли (блок 5) обрано відповідно до необхідної тривалості процесу очищення у традиційний спосіб без використання тривимірного нечіткого контролера та оцінювання перебігу процесу. Дослідження проводилось у три етапи. На першому було протестовано ефективність використання тривимірного нечіткого контролера, при цьому оцінювання перебігу процесу формувалося шляхом повного порівняння сигналів, отриманих датчиком. На другому етапі було додано метод оцінювання із використанням спектрального аналізу за лінійною та нелінійними складовими. На третьому було просимульовано використання ультразвукових фазованих решіток в якості виконуючих механізмів. Всі етапи довели ефективність запропонованих методів, що більш докладно наведено у наступних підрозділах.

4.2 Формування керування ультразвуковим очищенням на основі тривимірного нечіткого інтервального контролера

На першому етапі було змодельовано керування на основі тривимірного нечіткого інтервального контролера без врахування спектрального розкладу та оцінки стану перебігу, що визначена у розділі 3.

На систему впливають m виконавчих механізмів, що розташовані у заданих позиціях, з інтенсивністю сигналів $u(z) = [u(z_1), u(z_2), \dots, u(z_m)]$ (рис. 4.4). Вихідні параметри вимірюються у P просторових позиціях Z_1, Z_2, \dots, Z_p . P та m взаємозалежні. На вхід системи надходять у нормованому вигляді наступні дані: $\Delta x_z = (\Delta x_{z1}, \Delta x_{z2}, \dots, \Delta x_{zP})$ та $x_z = (x_{z1}, x_{z2}, \dots, x_{z3})$, що позначатимуть різницю між останніми двома вимірюваннями ($\Delta x_z = |x_z - x_{z-1}|$) та значення останнього вимірювання відповідно.

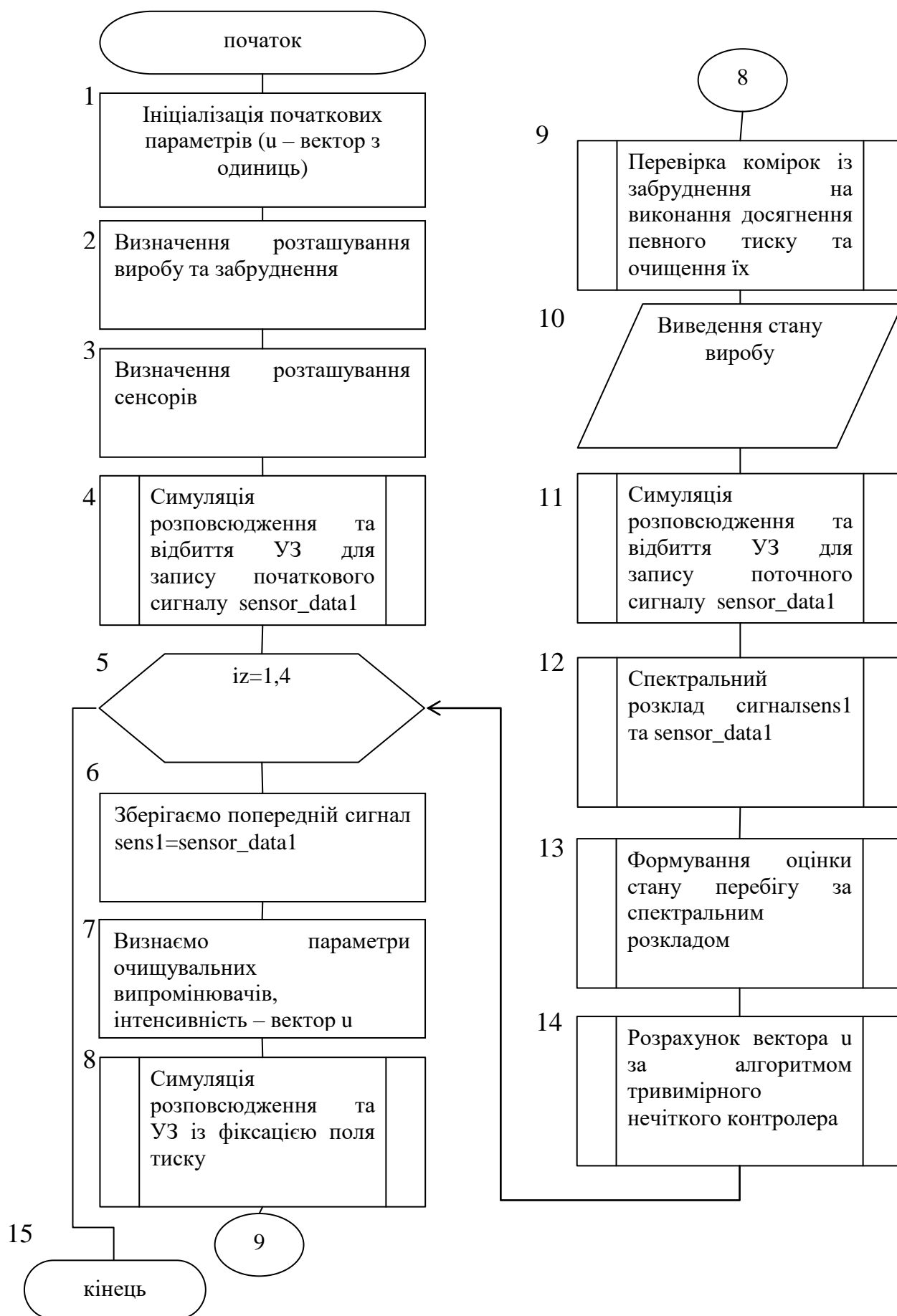


Рис. 4.3. Функціональний алгоритм моделювання очищення на базі ТНІ

Виконавчі механізми є ультразвуковими випромінювачами, інтенсивність яких визначається контролером в процесі аналізу вхідних сигналів. Вхід системи – ультразвукові датчики, що фіксують відбитий сигнал від очищуваного обладнання через задані проміжки часу. Керування формується таким чином, щоб очищування відбувалося у найбільш забруднених ділянках обладнання при мінімальних витратах енергії. Просторова позиція задається у вигляді одновимірної радіальної координати.

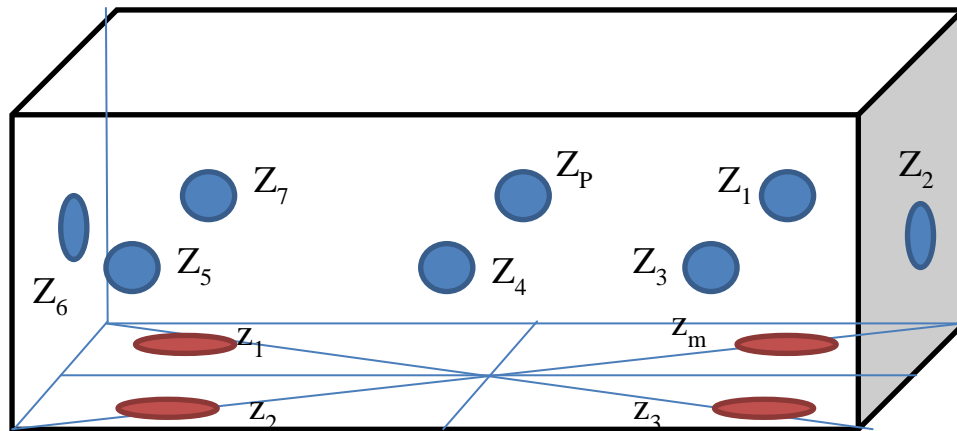


Рис. 4.4 Схематичне зображення системи ультразвукового очищення, де

● - ультразвукові датчики, а ● - виконавчі механізми

Отже, задано два чітких просторово залежних $x_1(z)$ та $x_2(z)$, де $(z = (z_1, z_2, \dots, z_p))$, що позначають зміну ультразвукових відгуків у часі та значення останніх отриманих показників датчиків. Чіткий вихід визначається як інтенсивність ультразвукових випромінювачів на заданій ділянці $u(z) = [u(z_1), u(z_2), \dots, u(z_m)]$. Значення $x_1(z)$ та $x_2(z)$ та $u(z)$ нормалізовано на інтервалі $[0, 1]$. Всі змінні мають три лінгвістичні мітки: значне (L), середнє (M) та мале (S). Враховуючи просторову розподіленість процесу ультразвукового очищення верхня та нижня функція належності вхідних параметрів мають наступний вигляд

$$\begin{aligned}\underline{\mu}(x_i, z) &= \exp\left(-\frac{((x_i-a)^2 + (|2|z-z_0|-1|-1|^2))}{\sigma_1}\right), \\ \bar{\mu}(x_i, z) &= \exp\left(-\frac{((x_i-a)^2 + (|2|z-z_0|-1|-1|^2))}{\sigma_2}\right), \\ i &= 1, 2, z = (z_1, z_2, \dots, z_p)\end{aligned}\quad (4.1)$$

де $\underline{\mu}(x, z)$ та $\bar{\mu}(x, z)$ - верхнє та нижнє значення функції належності;

x – значення чіткого входу;

z – радіальна координата входу;

a – значення лінгвістичної мітки, при якій функція належності набуває максимального значення: для значного (L) – $a = 1$, середнього (M) – $a = 0,5$ та для малого (S) – $a=0$;

z_0 – значення просторової радіальної координати виходу;

σ_1 та σ_2 – параметри, що визначаються за фізичними особливостями ємності для очищення та кількістю датчиків і виходів, належать інтервалу $[0,1]$;

i – кількість змінних.

Графічна ілюстрація для лінгвістичної мітки середнє (M) для виходу $z_0 = 0,2$ та для мітки мале (S) для виходу $z_0 = 0,5$ наведено на рис. 4.5, при цьому $\sigma_1 = 0,1$ та $\sigma_2 = 0,2$. Такий вигляд функції забезпечить врахування просторового зв'язку датчиків та випромінювачів. При мінімальній відстані значення функції є максимальним, а при віддаленні виходу від входу значення зменшується. Графік, що зображено на рис. 4.5 демонструє максимальне значення в просторовій точці, найближчій до виходу, що відповідає заданій лінгвістичній мітці.

Для виходу $u(z)$ функцію належності визначено у вигляді інтервальної трикутно трапецієвидної форми, як показано на рис. 4.6. Функція належності є двовимірною, оскільки просторовий вплив враховано при фазифікації входу.

База правил (табл.4.1) сформована з урахуванням припущень, що викладені вище: оскільки зміна сигналу є головною ознакою успішного перебігу процесу очищення, то вона є більш значущою, ніж останній отриманий сигнал. Він може

бути обумовлений не лише забрудненістю виробу, а і його геометричними особливостями та розташуванням у баку.

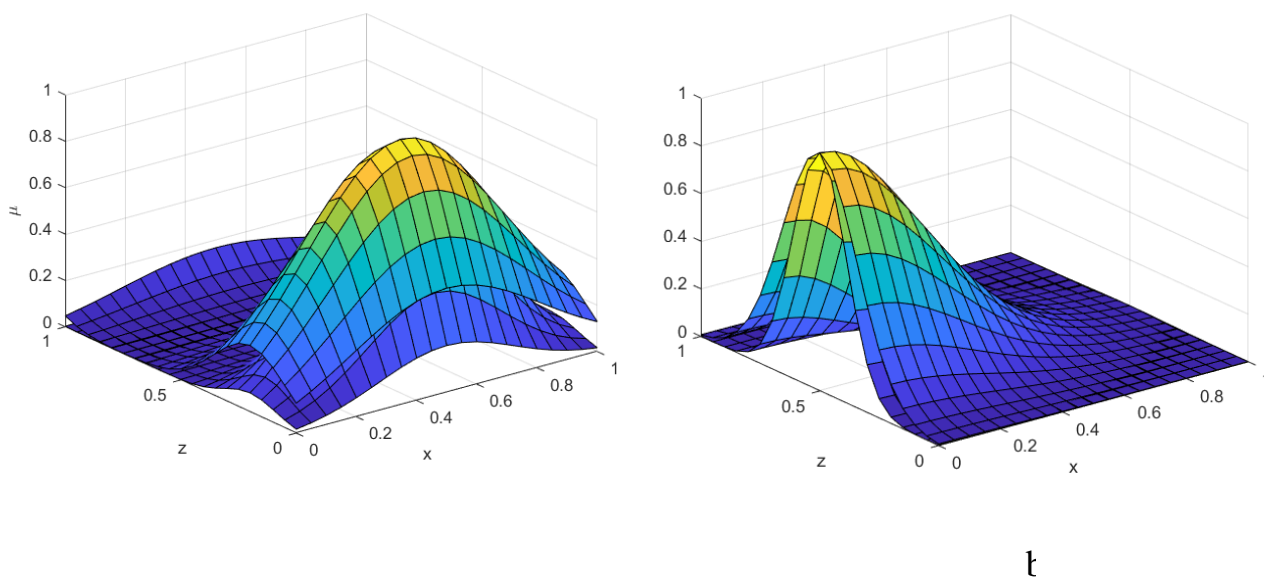


Рис. 4.5. Графіки верхньої та нижньої функції приналежностей:
а – для мітки середнє (М) для виходу $z_0=0,2$; б – для мітки мале (S) для виходу $z_0=0,5$

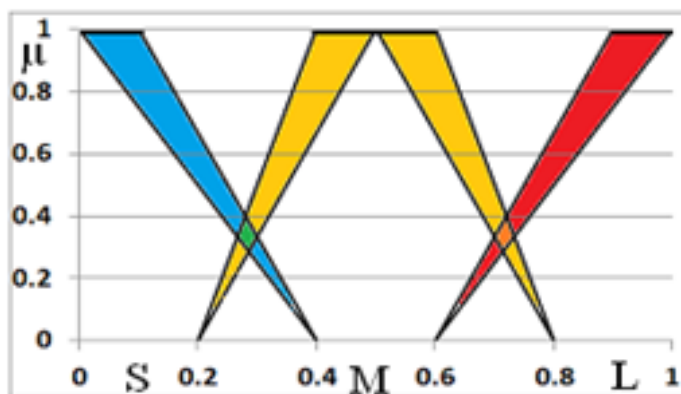


Рис. 4.6. Функція належності для $\mu_i(z)$, де S – мале, M – середнє, L – значне.
На основі визначених функцій належності та бази правил описується алгоритм роботи контролера на ТНІМТ2.

Для 2 чітких входів операція фазифікації (3.13) має вигляд

$$\tilde{A}_x = \sum_{z \in Z} \sum_{x_1(z) \in X_1} \sum_{x_2(z) \in X_2} \frac{\mu_{x_1}(x_1(z), z) * \mu_{x_2}(x_N(z), z)}{(x_1(z), x_2(z), z)} \quad (4.2)$$

де * – позначається операція t-норми. Для формування управління процесом ультразвукового очищення в якості t-норми прийнято перетин множин (3.9).

Після фазифікації чітких входів відбувається формування нечіткого логічного виводу на основі заданої бази правил у табл. 4.1 за співвідношенням (3.14), де $N = 9$. Далі відбувається об'єднання просторової інформації згідно з виразом (3.16), акумуляція (3.19) та приведення типів (3.21). І на останньому кроці відбувається дефазифікація згідно (3.24).

Таблиця 4.1 База правил

$\Delta x_i/x_i$	\tilde{S}	\tilde{M}	\tilde{L}
\tilde{S}	\tilde{M}	\tilde{S}	\tilde{S}
\tilde{M}	\tilde{M}	\tilde{M}	\tilde{S}
\tilde{L}	\tilde{L}	\tilde{L}	\tilde{M}

Для доведення ефективності роботи було проведено моделювання процесу очищення із застосуванням контролера на базі ТНІМТ2. Симуляція проводилась з припущенням, що найкраще очищення відбувається у зонах зі значним за амплітудою значенням акустичного тиску. Практична доцільність такого припущення підтверджується численними експериментами [118, 19, 4].

Для моделювання використано програмний засіб k-wave, що дозволяє за прийнятний час симулювати масштабні розповсюдження ультразвукових хвиль [53, 133, 134].

Оскільки фактично просторова координата єдина, то для спрощення проаналізовано очищення на площині (тобто приймається, що датчики та випромінювачі розташовані в єдиній площині).

Спочатку було проведено моделювання без використання управління на основі нечіткої логіки. У якості очищуваного виробу обрано астроїд діаметром 150 мм, що має забруднення товщиною 5 мм на одній із сторін (рис. 4.7, б). Визначено 4 випромінювачі сталої потужності (рис. 4.7, а). Відшаровування забруднення фіксується у випадку наявності амплітудного тиску, що вище 50 % від максимально зафіксованого. Експериментально отримано, що повне очищення відбулося за чотири цикли. При цьому були задіяні всі випромінювачі, що відповідає традиційному підходу ультразвукового очищення.

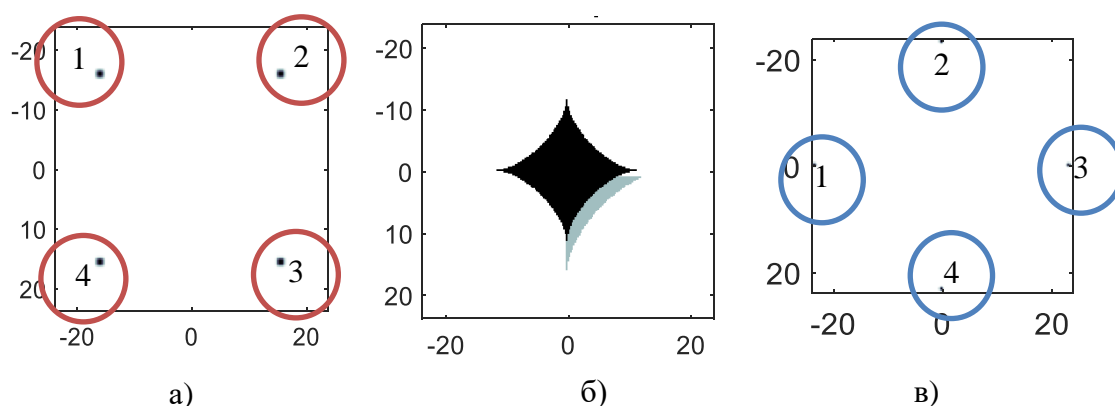


Рис. 4.7. Початкові умови експерименту

а – розташування випромінювачів; б – вигляд очищуваного виробу, в – розташування датчиків

При використанні нечіткого управління початкові умови експерименту було збережено. Для оцінювання перебігу процесу ультразвукового очищення було застосовано 4 датчики, позиції яких зображено на рис 4.7, в. Датчики одночасно є і випромінювачами, і приймачами ультразвуку. Зміна сигналів оцінювалась за різницею між амплітудами останніх сигналів, а кількість змін знаку сигналу стала основою для оцінювання «чистоти» сигналу. Ініціалізація відбувалась шляхом отримання відгуку після первинного випромінювання ультразвуку датчиками. Датчики задаються просторовими позиціями $z=[0, 0,25, 0,5, 0,75]$, а координати випромінювачів $z_0=[0,125, 0,375, 0,625, 0,875]$. У функції належності (4.1) задано наступні значення параметрів $\sigma_1 = 0,1$ та $\sigma_2 = 0,2$. Після первинної обробки за

аналізом максимального та мінімального значень у кожній точці забруднення отримано вигляд об'єкта очищування, що наведено на рис. 4.8. На наступному кроці оброблено обладнання з усіх 4 основних випромінювачів та знову було проведене ультразвукове оцінювання стану об'єкта.

Отримані на кроці №1 (табл.4.2) нормалізовані дані перетворювачів: зміна сигналу $\Delta x = [0,2292 \ 0,0598 \ 1,0 \ 0,4948]$ та значення останніх показів, що характеризують міру «чистоти» сигналу $x = [1,000 \ 0,9167 \ 0,6667 \ 0]$, добре узгоджуються, як із припущенням про найбільшу зміну сигналу датчика, що є найближчим до відшаровування забруднення, так і наявністю значної кількості відхилень у датчиків поряд. Після аналізу контролером показів датчиків за описаним вище алгоритмом отримано наступні нормалізовані значення інтенсивності для випромінювачів: $u = [0 \ 0,6015 \ 1,0 \ 0,2564]$.

Таблиця 4.2. Вхідні та вихідні параметри в процесі ультразвукового очищення

№ кроку	Δx	x	u	Збереження енергії, %
0	-	-	[1 1 1 1]	0
1	[0,2292 0,0598 1,0 0,4948]	[1,0 0,9167 0,6667 0]	[0 0,6051 1,0 0,4161]	49,47
2	[0,0918 0,0026 1,0 0,5896]	[1,0 1,0 0,5 0]	[0 0,6253 1,0 0,3537]	50,53
3	[0,2565 0,0084 1,0 0,6364]	[1,0 1,0 0,3636 0]	[0 0,5488 1,0 0,4900]	49,03
4	[0,1555 0,0104 1,0 0,2768]	[1,0 0,9091 0,2727 0]	[0 0,5159 1,0 0,2104]	56,84
Загалом	[0 0 0 0]			41

Отриманий результат відповідає наявній картині забруднення, оскільки забруднена ділянка обладнання найближче до 3 випромінювача ультразвуку. На наступному кроці інтенсивність кожного випромінювача задана з коефіцієнтом підсилення u . Результат роботи другого циклу очищення продемонстровано на рис. 4.8, б. Необхідність продовження очищення визначалося за модулем вектору відхилень сигналів між циклами. Для повного очищення знадобилося 4 цикли,

окрім початкового. Зменшення модуля вектору відхилень продемонстровано на рис. 4.9.

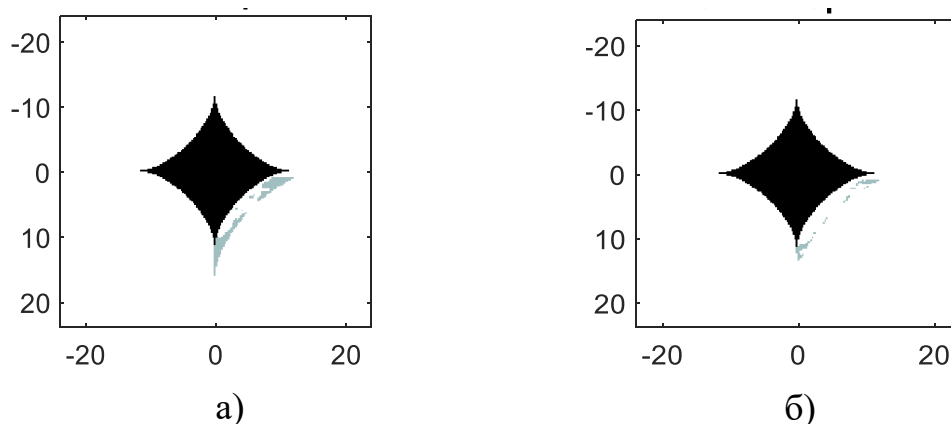


Рис. 4.8. Вигляд обладнання після а – першого; б - другого циклів очищення

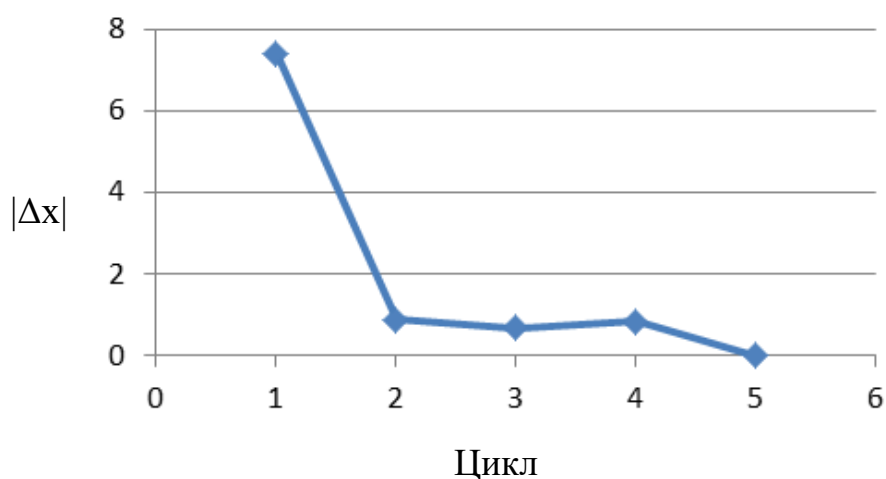


Рис. 4.9. Зменшення модуля вектору відхилень за циклами очищення

4.3 Аналіз використання оцінювання стану перебігу ультразвукового очищення у системі керування

Вхідним параметрами, які дозволять оцінити перебіг стану процесу ультразвукового очищення є два останніх вимірних значення часу надходження порогового сигналу та коефіцієнту нелінійності другого порядку.

Значення «зміни» сигналу розраховуємо як відносну різницю двох останніх вимірювань часу порогового надходження [135]

$$x_1 = \frac{t_2 - t_1}{t_2}, \quad (4.3)$$

де t_2, t_1 – час надходження порогового значення сигналу для поточного та минулого вимірювань, с.

«Чистота» сигналу є відношенням коефіцієнтів нелінійності 2-го порядку

$$x_2 = \frac{\beta_2^{(2)} - \beta_2^{(1)}}{\beta_2^{(2)}}, \quad (4.4)$$

де $\beta_2^{(2)}, \beta_2^{(1)}$ – значення поточного та попереднього коефіцієнтів нелінійності 2-го порядку.

Значення x_1, x_2 нормалізуємо на інтервалі $[-1,1]$. Оскільки знак вхідного параметра принциповий, то нормалізація проводилась не рівномірно, а як відношення знайденого значення до максимального за модулем з таким же знаком. Для обох вхідних змінних визначено п'ять лінгвістичних міток: значне додатне (LP), середнє додатне (MP), нуль (Z), середнє негативне (MN) та значне негативне (LN). Враховуючи, що на поточне значення сигналу отриманого даним сенсором має найбільший вплив стан найближчого оточення, то для функцій належності обрано вигляд відповідно до (4.1) із наступними значеннями для a : для (LP)– $a=1$, (MP)– $a=0,5$, для (Z)– $a=0$, для (MN)– $a=-0,5$ та для (LN)– $a=-1$.

З урахуванням описаної вище методики оцінювання перебігу процесу ультразвукового очищення сформовано базу правил для нечіткого контролера (табл. 4.3). Дана база є двовимірною та не залежить від кількості датчиків. Просторове розподілення враховане через функції належності вхідних параметрів.

При формуванні бази правил враховано, що головну роль відіграє час надходження порогового значення сигналу (x_1). Негативне значення цього параметру свідчить про забрудненість рідини, а позитивне про відшаровування забруднення. Для другого параметру, що є відносною зміною коефіцієнта нелінійності другого порядку (x_2) наступні залежності: від'ємне значення свідчить про те, що очищення відбувається та наближається до кінцевої стадії, а додатне – про наявність значної кількості забруднення.

Таблиця 4.3. База правил

x_2/x_1	\widetilde{LN}	\widetilde{MN}	\widetilde{Z}	\widetilde{MP}	\widetilde{LP}
\widetilde{LN}	\widetilde{S}	\widetilde{M}	\widetilde{M}	\widetilde{L}	\widetilde{L}
\widetilde{MN}	\widetilde{S}	\widetilde{M}	S	\widetilde{M}	\widetilde{L}
\widetilde{Z}	\widetilde{S}	\widetilde{S}	\widetilde{S}	\widetilde{M}	\widetilde{L}
\widetilde{MP}	\widetilde{S}	\widetilde{S}	\widetilde{S}	\widetilde{M}	\widetilde{L}
\widetilde{LP}	\widetilde{S}	\widetilde{S}	\widetilde{M}	\widetilde{L}	\widetilde{L}

Вихідна функція належності двовимірна та визначає значення для кожного випромінювача окремо. Вихідну функцію (рис. 4.6) нормалізовано на інтервалі $[0,1]$, оскільки чітке значення виходу - інтенсивність випромінювача - завжди невід'ємне.

Для підтвердження ефективності розробленої методики оцінювання перебігу процесу ультразвукового очищення проведено повне моделювання процесу із використанням контролера на базі ТНІМТ2 (код програми – Додаток В). У якості вхідних параметрів визначено розташування обладнання із забрудненням, 4 випромінювача і 4 датчики (рис. 4.10). На малюнку показані працюючі випромінювачі у вигляді концентрованих кіл – цикл очищення 1 (насиченість кольору прямо пропорційно пов'язана з інтенсивністю

випромінювання). Еліпси на межах області позначають розташування сенсорів. Забруднення відшаровувалось за інтенсивності випромінювання у точці забруднення більше 50 % порівняно з максимальною.

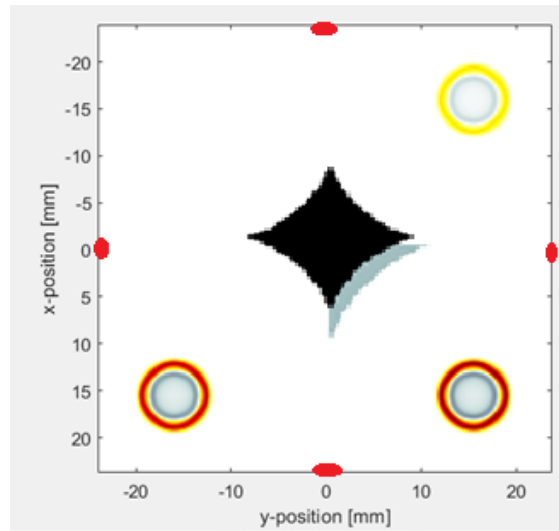


Рис. 4.10. Моделювання ультразвукового очищення

Очищення проводилося у 4 повні цикли, саме стільки тривало повне очищення при всіх увімкнених випромінювачах. На кожному кроці для кожного випромінювача визначався коефіцієнт потужності, що був нормалізований на $[0,1]$. У табл.4.4 наведено параметри, що були отримані для кожного циклу очищення, та визначена за ними потужність. Для врахування наявності забруднення у рідині з кожним циклом збільшувалась кількість зважених частинок у змодельованій системі. Для кращої ілюстрації вхідні параметри x_1 та x_2 у таблиці наведено не нормалізовані, а u – наведено саме нормалізоване, оскільки саме з такими коефіцієнтами потужності відбувається обробка у наступному циклі очищення.

Дані таблиці демонструють, що у кожному циклі максимальний коефіцієнт потужності у випромінювача, що найближче розташований до забруднення. При цьому спостерігається постійне зменшення модуля векторів x_1 та x_2 . Графічне зображення зменшення вхідних параметрів представлено на рис. 4.11.

Одним з параметрів припинення процесу очищення може бути граничне значення модуля для x_1 та x_2 . У даному випадку припинення чищення пов'язано із відсутністю змін у вхідних даних.

Таблиця 4.4. Вхідні та вихідні параметри тривимірного нечіткого інтервального контролера

№ кроку	x_1	x_2	u	Збереження енергії, %
0	-	-	[1 1 1 1]	0
1	[0,0010 0 0,0597 0,0970]	[0,2240 0,0055 0,0015 -3,4094]	[0 0,9175 1,0 0,3638]	42,97
2	[-0,0005 0 0,0010 0,0016]	[-0,1886 -0,3178 - 0,0137 0,0778]	[0 0,4930 1,0 0,6643]	46,07
3	[0 0 0,00051 0,00051]	[-0,0153 0,2671 0,0510 0,01]	[0 0,7260 1,0 0,1956]	51,96
4	[0 0 0 0]	[0 0 0 0]		100
Загалом				47

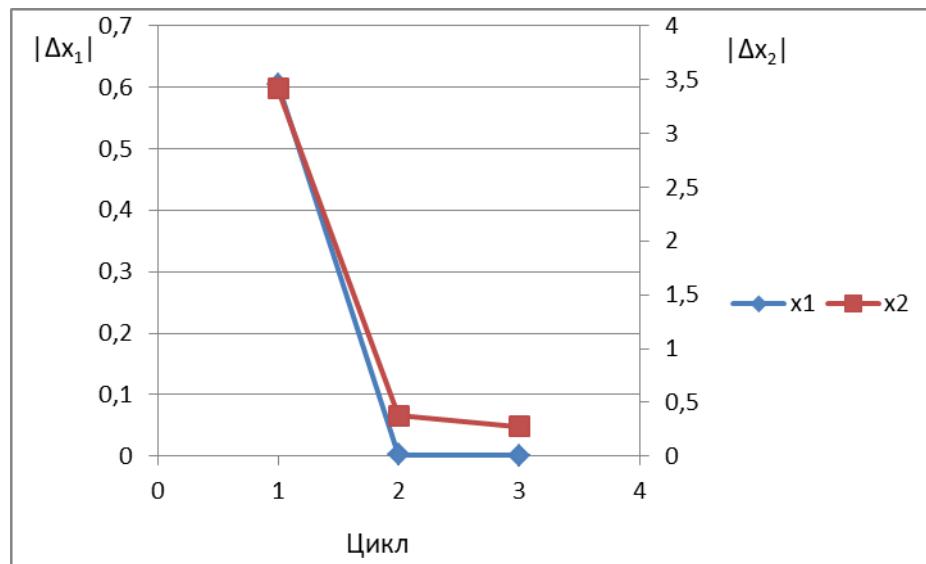


Рис. 4.11. Зменшення модуля x_1 та x_2 в процесі очищення.

За рахунок того, що не всі випромінювачі працювали на повну потужність та на один цикл відбулося скорочення тривалості очищення, економія енергії склала 47 %, що на 6 % покращило результат попереднього дослідження.

Отже, формування керування на основі оцінювання стану перебігу процесу очищення із використанням часу надходження граничного сигналу та коефіцієнту нелінійності другого порядку покращило значення економії енергії від 41 % до 47 %. порівняно з застосуванням оцінювання перебігу процесу очищення за повним аналізом всіх значень сигналу

4.4 Оцінка використання ультразвукових фазованих решіток для фомування виконуючих впливів

З метою підтвердження ефективності розробленого підходу щодо керування процесом ультразвукового очищення за допомогою фазованої решітки згідно розробленого алгоритму проведено моделювання цього процесу (Додаток Д). Визначено параметри розташування випромінювачів та датчиків, обладнання із забрудненням (рис. 4.12). Характеристиками очищуваного об'єкту та забруднення є густина та швидкість розповсюдження ультразвукової хвилі. Густина виробу $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$, швидкість розповсюдження ультразвукової хвилі у ньому $c = 5900 \text{ м/с}$, що відповідає металевому виробу. Забруднення задано такими параметрами: густина $\rho = 3100 \text{ кг/м}^3$ та швидкість розповсюдження ультразвукової хвилі $c = 2500 \text{ м/с}$, що відповідає параметрам корозії металу. Оточуюча рідина визначена густиною $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ та швидкістю розповсюдження ультразвукової хвилі $c = 1500 \text{ м/с}$, що відповідає параметрам води.

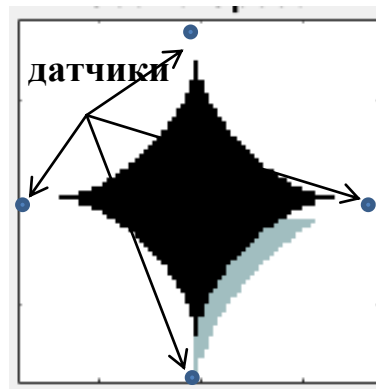


Рис. 4.12. Початкові умови експерименту

Оцінювання ефективності керування відбувалося шляхом фіксації сумарного значення максимального тиску в області забруднення та знаходження його відношення до загального тиску, що продукується випромінювачами.

Спочатку просимульовано процес ультразвукового очищення із спрямування всіх ультразвукових променів у центр ванни (рис. 4.13). Після цього розраховано результуюче поле, що є сумарним для всіх променів (рис. 4.14).

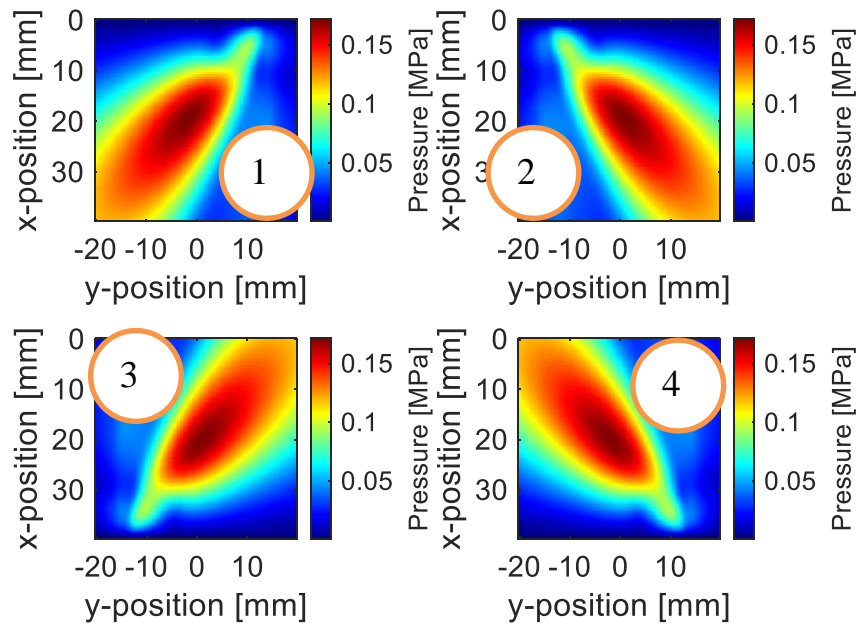


Рис. 4.13. Спрямування ультразвукових променів у ванні

Симуляція відбувалася у два етапи, оскільки перший цикл обробки є основою для формування оцінки перебігу процесу ультразвукового очищення, то у будь-якому випадку на першому етапі працюють всі випромінювачі із максимальною потужністю. На другому етапі для цього випадку також відбувалася обробка у напрямку центру ванни із максимальною потужністю. Отримані значення сумарної максимальної потужності у області забруднення склали 65,89 Па для кожного етапу, витрати енергії при цьому - відповідно $4 \cdot 10^6$ Па для кожного етапу. Як видно з рис. 4.14 при цьому максимальна концентрація потужності спостерігається у центрі ультразвукової ванни.

За відносний коефіцієнт корисної дії було прийнято відношення сумарного максимального тиску в області забруднення до загальних витрат енергії. Для випадку із відсутністю керування у напрямку забруднення цей коефіцієнт склав $42,78 / (4 \cdot 10^6) = 0,106 \cdot 10^{-4}$ відносних одиниць.

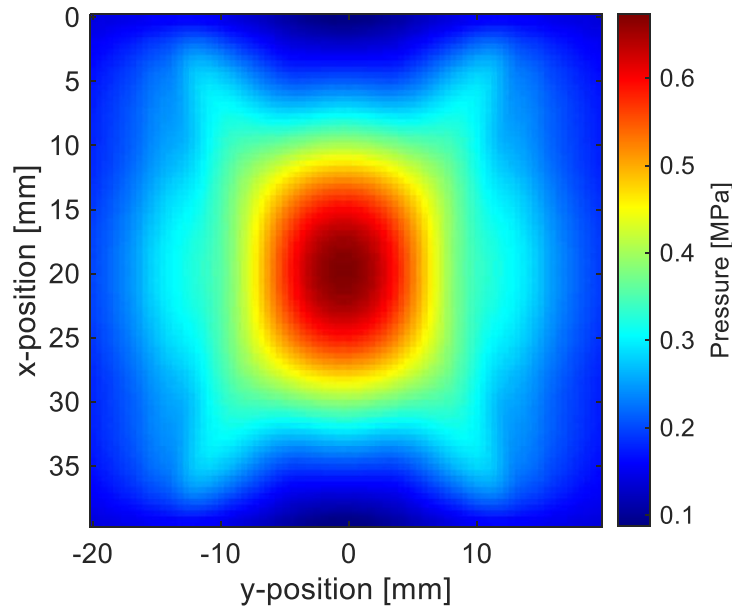


Рис. 4.14. Загальна картина розподілу поля тиску у ванні

Для того, щоб отримати зміщення потужності на ділянку, у якій знаходиться забруднення, та отримати таким чином скороченням витрат енергії на очищені ділянки, було проведено моделювання із застосуванням алгоритму роботи 3-D нечіткого інтервального контролеру для обчислення інтенсивностей для кожного з випромінювачів.

На основі описаного вище алгоритму було розраховано кути для переспрямування променів. На першому етапі працюють всі випромінювачі без обмежень. Після цього проведений аналіз максимальної потужності у кожній зоні забруднення і ділянки, на яких вона приймає значення більше ніж 50 % від максимально зафіксованого, вважаються очищеними.

Перед другим етапом обробки виробу ультразвуком відбувалося оцінювання перебігу процесу очищення на основі значень різниці часу повернення граничного значення сигналу та коефіцієнту нелінійності другого порядку. Ці значення у нормалізованому вигляді оброблені згідно алгоритму 3-D нечіткого інтервального контролера та отримані значення для інтенсивностей, які у нормалізованому вигляді склали $u=[0,0093 \ 0 \ 0,9854 \ 1]$. Відповідно до описаного алгоритму розрахунку кутів переспрямування склало для кута 3 ультразвукової фазованої решітки $44,3429^\circ$. Із цими параметрами було проведено повторну обробку обладнання, спрямування променів при якій наведено нарис. 4.15.

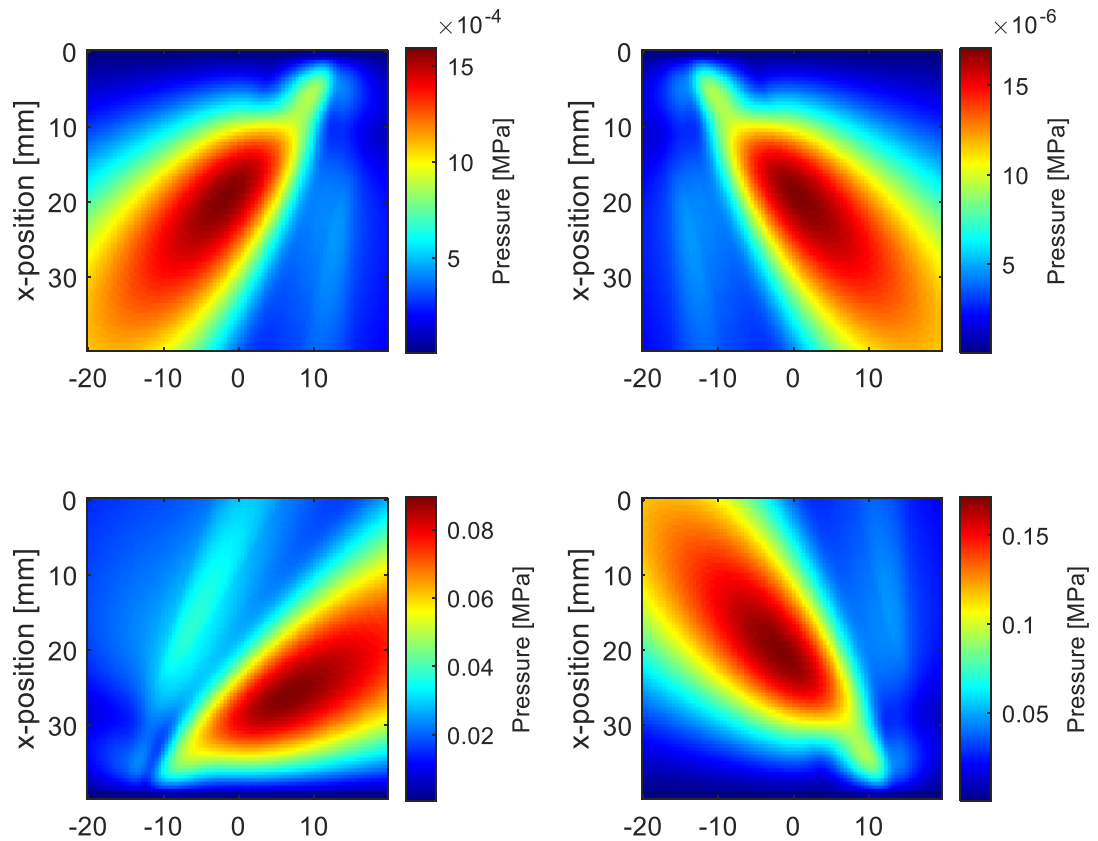


Рис. 4.15. Спрямування ультразвукових променів у ванні на другому етапі

Загальна картина розповсюдження максимальної потужності при цьому набула вигляду відповідно до рис. 4.16. Поле максимального тиску враховує лише спрямування променів без відбиття від виробу, оскільки це перетворює задачу до досить вимогливої за часом обчислення. Сумарний максимальний тиск у зоні забруднення склав 29,84 Па. Відносний коефіцієнт корисної дії при цьому $29,84 / (1,9947 \cdot 10^6) = 0,15 \cdot 10^{-4}$. Отже, отримано покращення значення концентрування потужності у зоні, де розташоване забруднення відносно загальних витрат енергії. Збільшення склало $(0,15 \cdot 10^{-4} - 0,106 \cdot 10^{-4}) / 0,106 \cdot 10^{-4} = 40 \%$.

Після цього проведено моделювання із врахуванням не лише кута спрямування, але й зміни фокусної відстані. До цього для всіх випромінювачів прийнята фокусна відстань у 8 мм. Згідно описаного вище алгоритму було проведено моделювання із зміненням фокусної відстані для кожного випромінювача в залежності від часу надходження граничного сигналу.

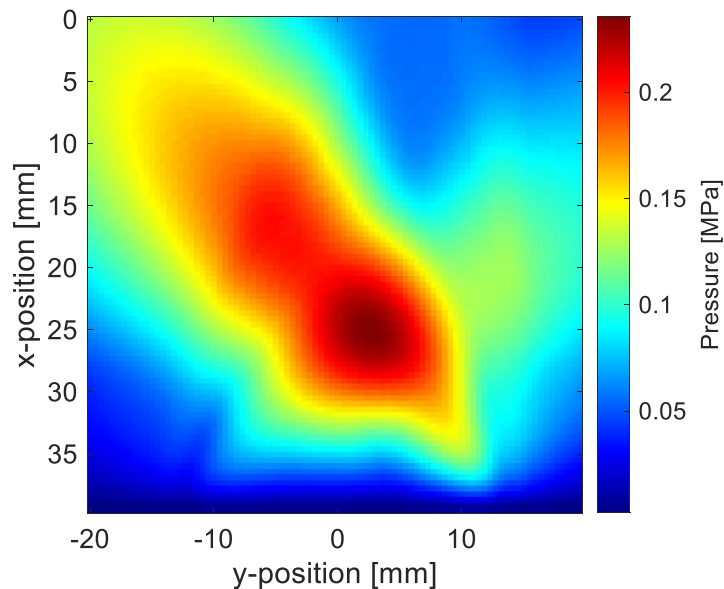


Рис. 4.16. Загальна картина розподілу поля тиску у ванні

При цьому значення максимальної потужності у зоні забруднення суттєво не змінилося.

Отже, для підвищення ефективності ультразвукового очищення доцільно використовувати ультразвукові фазовані решітки із формуванням керування із розрахованими згідно описаного алгоритму кутами спрямування променя.

4.5 Визначення впливу параметрів функції належності на ефективність процесу очищення

Для того, щоб визначити залежність параметрів функції належності, а саме σ_1 та σ_2 з формули (4.1) проведено спочатку моделювання із різними значеннями цих параметрів [136], а потім практичні дослідження із використанням ультразвукової ванни на 10 л виробництва «Титан Технікс», що виготовлена із нержавіючої сталі SS316. В якості сенсорів використано погрузні ультразвукові сенсори 40-14 DIN50 L092. Формування керування відбувалося згідно описаного алгоритму роботи тривимірного нечіткого контролера, що реалізований за допомогою програмної оболонки Matlab. За очищуване обладнання прийнято карбюратор автомобіля NISSENS 93135.

Параметри σ_1 та σ_2 у формулі (4.1) за своєю суттю відповідають за величину інтервалу між верхньою та нижньою границями функції належності. Для визначення оптимальних значень σ_1 та σ_2 проаналізуємо як змінюється вигляд функції належності при зміні значення параметрів σ .

З наведених графіків на рис. 4.17 чітко простежується пряма залежність між параметрами σ_1 та σ_2 та розмірами області, на якій функція прийматиме високе значення.

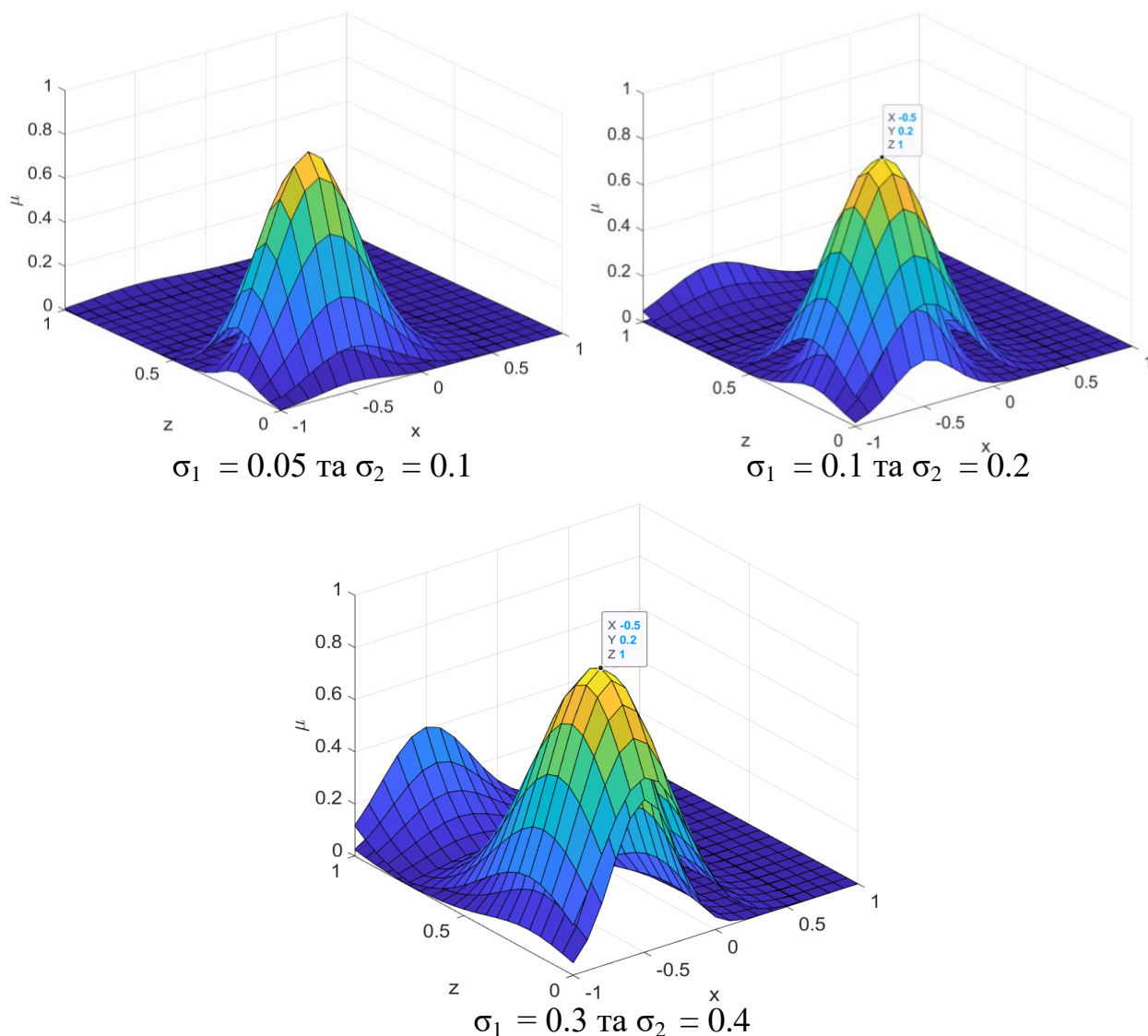


Рис. 4.17. Інтервальна функція належності при різних значеннях σ_1 та σ_2 .

А це у досліджуваному випадку ультразвукового очищення означає значущість впливу даних, що отримані з поточного сенсора на значення інтенсивності, що розраховується для визначеного випромінювача. Фізично формування цього співвідношення визначається кількістю сенсорів, тобто чим

більше датчиків, тим більший вплив на результат має відстань між датчиком та сенсором. Якщо ж датчиків менше, то, за рахунок параметрів просторової функції належності, відбувається розширення області впливу показників датчику на інтенсивність випромінювача. Отже, вибір значень для σ_1 та σ_2 визначається геометричними особливостями конструкції ультразвукової вани та співвідношенням кількості сенсорів та випромінювачів.

Зміна енергоефективності процесу очищення в залежності від зміни параметрів функції належності наведено у табл. 4.5.

Таблиця 4.5. Значення коефіцієнтів інтенсивностей в залежності від параметрів верхньої та нижньої границь функцій належності

σ_1	σ_2	Значення коефіцієнтів інтенсивностей		
		Крок 1	Крок 2	Крок 3
0,1	0,2	[0 0,7394 1,0 0,30]	[0 0,9623 1,0 0,3497]	[0,9242 1,0 0 0,1329]
0,05	0,3	[0 0,7599 1,0 0,2507]	[0 0,9980 1,0 0,3848]	[1,0 0,9804 0 0,7174]
0,2	0,3	[0 0,6729 1,0 0,2793]	[0 0,8609 1,0 0,1859]	[0,8293 1,0 0,1329 0]
1	2	[0 0,7808 1,0 0,0238]	[0 1,00 0,9996 0,1137]	[0,9803 1,0 0,0154 0]
2	4	[0 0,8692 1,0 0,0226]	[0,0062 1,0 0,9966 0]	[0,9512 1,0 0,0527 0]
0,1	4	[0 0,7341 1,0 0,2514]	[0 0,9679 1,0 0,2623]	[0 0,4224 0,9148 1,0]
4	10	[0 0,8757 1,0 0,057]	[0 1,0 0,9998 0,0070]	[0,8918 1,0 0,1121]

Отже, на початковому кроці значення залежностей майже однакові, але вже на 2 та 3 різниця стає більш суттєвою, тому виникає необхідність дослідити ще сумарне значення максимального тиску в області забруднення. Отримані значення наведено у табл.4.6.

Отже, встановлення великої різниці між значеннями нижньої та верхньої границь функції належності дозволяє збільшити сумарне значення максимального тиску у забрудненій області ($\sigma_1=0,1$ та $\sigma_2=4$).

Таблиця 4.6. Значення сумарного максимального тиску у забрудненій області в залежності від параметрів верхньої та нижньої границь функції належності

σ_1	σ_2	Значення тиску у забрудненій області по циклам	Сумарне значення максимального тиску у забрудненій області
0,1	0,2	495,313 273,120 276,608 155,242	1200,285
0,05	0,3	495,313 273,427 277,322 171,602	1217,666
0,2	0,3	495,313 271,987 275,251 154,485	1197,036
1	2	495,313 273,774 276,912 156,201	1202,202
2	4	495,313 275,404 275,454 156,256	1202,429
0,1	4	495,313 272,989 276,656 252,030	1296,99
4	10	495,313 275,514 276,167 156,065	1203,0605

Практичне дослідження підтвердило цю залежність, але при проектуванні ванни у загальному випадку треба враховувати співвідношення кількості датчиків та випромінювачів у наступних залежностях: чим більше кількість датчиків, тим меншим можна приймати значення σ_1 та σ_2 , навпаки.

4.6 Узагальнений аналіз адекватності моделі ультразвукового очищення на основі тривимірної нечіткої логіки

Для оцінки адекватності побудованої моделі ультразвукового очищення було проведено дослідження на базі ультразвукової лабораторії Криворізького національного університету. Було використано ультразвукову ванну на 10 л виробництва «Титан Технікс», що має чотири ультразвукові випромінювачі по 60 Вт у своїй основі. В якості сенсорів використано 4 погрузних ультразвукових сенсори 40-14 DIN50 L092. Дані сенсорів використовувались у власному програмному забезпеченні, створеному на базі Matlab. В якості очищуваного виробу було взято металеву астріду діаметром 150 мм та висотою 50 мм. На

одній із сторін астроїди за допомогою погруження у воду була штучно отримана «корозія» товщиною до 2 мм.

Оскільки розміри моделі, враховуючи обчислювальну вимогливість моделювання широмасштабних акустичних процесів, було масштабовано, то основним значущим параметром, перевірка якого здатна підтвердити є вихідний вектор інтенсивностей випромінювачів. Датчики та випромінювачі були розташовані у радіальній площині відповідно до структурної схеми (див. рис. 4.18). На відміну від дослідженої моделі ультразвукового очищення, де було прийнято, що очищення відбувається при досягненні у заданій ділянці певного значення максимального тиску, на практиці було використано візуальний метод оцінки забрудненості поверхні та прийняття рішення про досягнення кінцевого результату. Для повного очищення за традиційним методом, як і за методом із використанням тривимірною нечіткого інтервального контролеру, знадобилося – 3 цикли по 2 хвилини. Аналогічно змодельованому дослідженні, що було проведено у підрозділі 4.3, вхідними параметрами для програми оцінювання інтенсивності перебігу стану процесу ультразвукового очищення прийнято відносну різницю двох останніх вимірювань часу надходження порогового значення сигналу (4.3) та відношенням коефіцієнтів нелінійності 2-го порядку (4.4).

Значення x_1, x_2 було пронормалізовано на інтервалі $[-1,1]$. Для обох вхідних змінних визначено п'ять лінгвістичних міток: значне додатне (LP), середнє додатне (MP), нуль (Z), середнє негативне (MN) та значне негативне (LN) та функціями належності відповідно до (4.1) із наступними значеннями для a : для (LP)– $a=1$, (MP)– $a=0,5$, для (Z)– $a=0$, для (MN)– $a=-0,5$ та для (LN)– $a=-1$. База правил була прийнята згідно табл. 4.3.

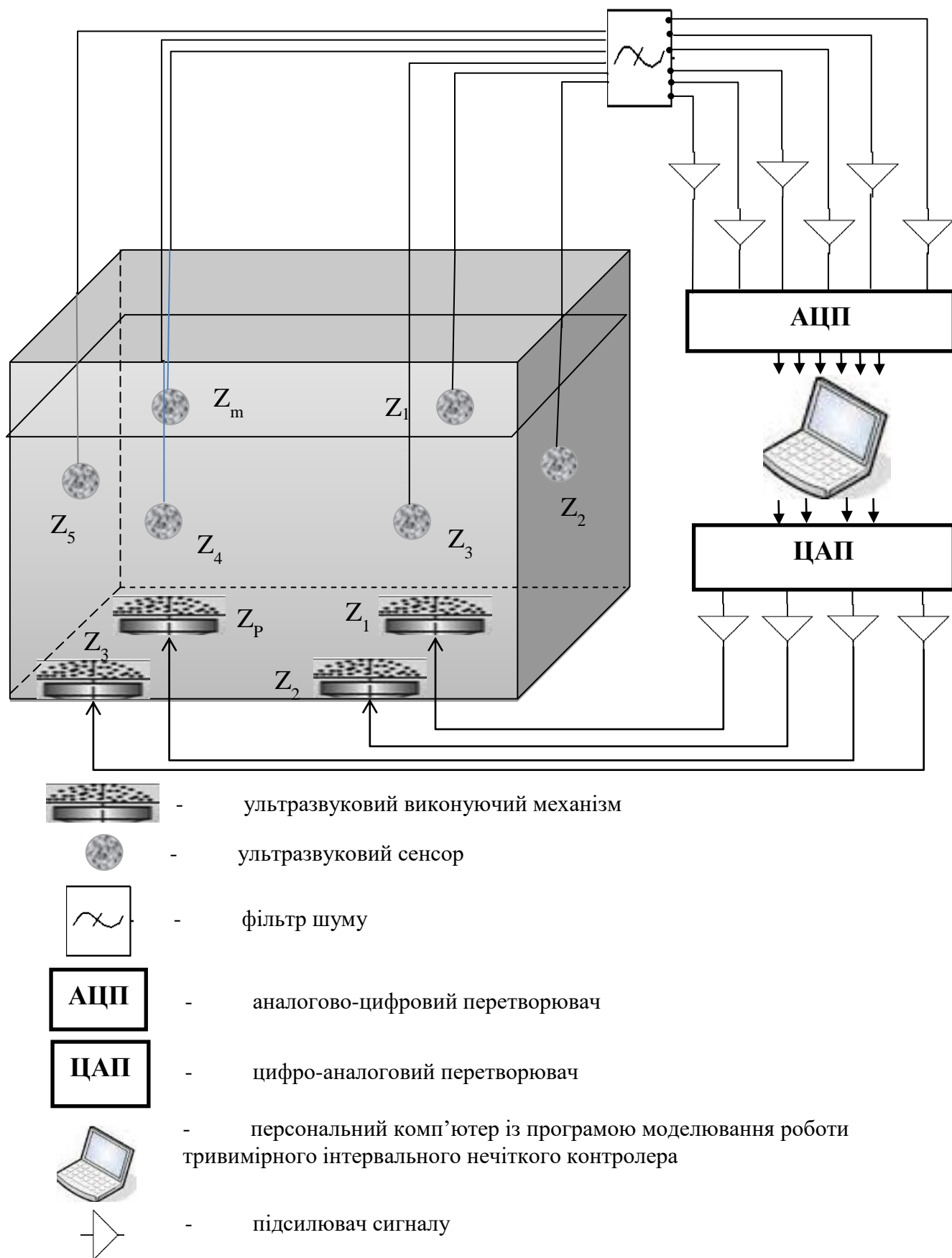


Рис. 4.18. Структурна схема процесу ультразвукового очищення на основі тривимірного нечіткого інтервального контролера

Було проведено 5 дослідів по 3 цикли очищення з метою отримання значень для перевірки достовірності запропонованої моделі ультразвукового очищення із використанням тривимірному нечіткого інтервального контролера. Отримані дані було оброблено за допомогою програмного забезпечення та занесені у таблицю (Додаток С).

За отриманими під час дослідів даними чітко простежується максимальний коефіцієнт інтенсивності випромінювача, що розташовано найближче до зони найбільшого забруднення та мінімальний у найвіддаленішій зоні. Єдине відхилення від цієї закономірності спостерігається, для досліду 4, коли перший вхідний вектор є нульовим, а значення другого також є досить малими. Спостерігається зменшення модулів вхідних даних, що свідчить про зниження зміни інтенсивності відшаровування бруду та наближенню деталі до повністю очищеного стану.

За отриманими даними для кожного досліду було розраховано коефіцієнт Фішера та порівняно з табличним значенням $F_T = F_{11,10,0.05} = 2,8$.

1. $F_1 = 3.415 > F_T = 2,8$.

2. $F_2 = 7.059 > F_T = 2,8$.

3. $F_3 = 3.259 > F_T = 2,8$.

4. $F_4 = 3.409 > F_T = 2,8$.

5. $F_5 = 3.973 > F_T = 2,8$.

У всіх дослідях $F_{\text{досл.}} > F_T$, що свідчить про прийнятну адекватність побудованої моделі керування ультразвуковим очищенням.

Також було проведено дослідження із ультразвуковим очищенням виробу при ввімкненні всіх випромінювачів із максимальною інтенсивністю. Це зайняло такий же час, як і при очищенні із використанням нечіткого контролера. За рахунок того, що при використанні нечіткого контролера спостерігається економія енергії у середньому на 37,57 %.

Висновок до розділу 4

Вперше розроблено алгоритм та програмне забезпечення для керування процесом ультразвукового очищення із використанням тривимірного нечіткого контролера та методу оцінювання перебігу процесу за аналізом лінійної та нелінійної складових ультразвукових відгуків. Проведені наступні етапи перевірки ефективності запропонованого алгоритму:

1. Моделювання із оцінюванням перебігу стану очищення на основі різниці між ультразвуковими віддзеркалення останніх вимірів та кількістю дисперсійних відхилень останнього сигналу. За алгоритмом роботи описаного контролера визначався коефіцієнт підсилення для кожного просторового виходу, значення якого нормалізоване в межах $[0,1]$. Паралельно було проведене моделювання процесу очищення для традиційного способу, при якому застосовуються на кожному циклі очищування всі випромінювачі, та способу із використанням тривимірного нечіткого інтервального контролера. Фіксувалося очищення ділянки при концентрації тиску у ній більше, ніж 0,5 Па. Для традиційного способу знадобилося 4 повних цикли (окрім ініціюючого). Така сама кількість циклів знадобилася і для запропонованого методу очищення. За рахунок того, що деякі значення коефіцієнтів підсилення менше 1, економія енергії склала для нового алгоритму 41 %.

2. Для усунення громіздких обчислень при порівнянні сигналів на другому етапі було проведено моделювання, в основі якого знаходилась методика оцінювання стану перебігу процесу очищення за часом надходження сигналу та коефіцієнтом нелінійності другого порядку. Враховуючи нові вхідні дані, було розширено вхідний інтервал до $[-1,1]$ та змінено таблицю правил. Моделюванням підтверджено доцільність використання методики оцінювання стану перебігу процесу очищення за часом надходження сигналу та коефіцієнтом нелінійності другого порядку. При цьому економія енергії, що використовувалась при ультразвуковому очищенні з використанням такого способу оцінювання перебігу

процесу збільшилася на 6 % відносно очищування із використанням оцінки на основі повного аналізу сигналів та відбулося скорочення часу очищення на 1 етап.

3. Моделювання очищення із використанням технології ультразвукової фазованої решітки продемонструвало підвищення концентрації потужності на 40 %, що дозволяє скоротити час на ультразвукову обробку устаткування та знизити витрати енергії.

4. Проведено практичні дослідження із використанням експериментальної установки, які довели адекватність побудованої моделі та продемонстрували економію енергії на 37 %.

Також проведено практичні дослідження щодо визначення коефіцієнтів у функції належності та було виявлено, що оптимальний результат отримується при значній різниці у параметрах границь функції належності. Розроблено тестовий зразок ультразвукової ванни із ефективним просторовим керуванням на основі вхідних даних, що отримані за допомогою аналізу ультразвукових відгуків. В якості програмного забезпечення використано програму у Matlab (Додаток В).

ВИСНОВКИ

Дисертаційне дослідження є закінченою науково-дослідною роботою, в якій вирішене актуальне наукове завдання, що полягає в розробці принципів, структури та системи ефективного керування ультразвуковим очищенням виробів складної конфігурації на основі тривимірною нечіткого інтервального контролера типу 2 з використанням методики оцінювання перебігу процесу ультразвукового очищення за лінійною та нелінійною складовою ультразвукових відгуків з метою зниження енерговитрат.

Основні наукові і практичні результати полягають в наступному:

1. Ультразвукове очищення є складним просторово розподіленим процесом, що має бути враховано при формуванні енергоефективного керування. Згідно проведеного аналізу виявлено відсутність систем керування процесом ультразвукового очищення, що враховують стан очищуваного виробу та формують керуючу дію розподілено в залежності від забрудненості окремих ділянок обладнання. Також відсутні методики оцінювання перебігу процесу ультразвукового очищення за зміною стану очищуваного обладнання.

2. Проведене моделювання процесу очищення із фіксацією сигналу ультразвукових відгуків при різній забрудненості виробу у площині та просторі з метою встановлення між ними залежності. Виявлено, що при зменшенні забруднення збільшується час надходження граничного значення сигналу та зменшується кількість значних амплітудних відхилень.

3. Враховуючи встановлені залежності та з використанням спектрального розкладу сигналу сформовано методику оцінювання перебігу процесу очищення за лінійною (час надходження граничного значення сигналу) та нелінійною (коефіцієнт нелінійності другого порядку) складовою, що підвищує енергоефективність процесу на 6 %. Складена база правил для майбутнього нечіткого контролера.

4. Розроблено алгоритм роботи тривимірного нечіткого інтервального контролера для керування просторово розподіленими процесами із нечіткою експертною оцінкою вхідних даних.

5. Змодельовано процес впровадження тривимірного нечіткого інтервального контролера для адаптивного керування процесом ультразвукового очищення та отримано скорочення витрат енергії на 41 %, порівняння із традиційним підходом керування лише за часовим показником.

6. Досліджено фізичні параметри ультразвукових фазованих решіток та визначено їхні оптимальні значення для використання у процесі очищення.

7. Для підвищення ефективності формування керуючої дії розроблено методику керування із використанням в якості виконуючого механізму ультразвукової фазованої решітки. Це дозволило переспрямувати акустичний тиск в напрямку найбільшої забрудненості.

8. Змодельовано процес очищення із використанням ультразвукової фазованої решітки в якості виконуючого механізму. Подібний підхід дозволив збільшити значення максимального акустичного тиску у зоні забруднення на 40 %, підвищивши таким чином ефективність очищення.

9. Проведено аналіз впливу параметрів функції належності на кінцевий результат та визначено оптимальні значення для тестового зразка.

10. Проведено практичні дослідження із використанням експериментальної установки, які довели адекватність побудованої моделі та продемонстрували економію енергії на 37 %.

Отже, розроблено та протестовано новий підхід для формування керування процесом ультразвукового очищення виробів складної конфігурації, який дозволяє формувати розподілену керуючу дію із врахуванням стану перебігу очищення. Це дозволило перерозподілити інтенсивність у напрямку тих ділянок, на яких спостерігається найбільше забруднення, скоротивши таким чином час та енерговитрати.

Список використаних джерел

1. Neppiras E. (1972) *Macrosonics in Industry 1. Introduction*. Ultrasonics. P. 9-13.
2. Колос А.А.(2014) Ультразвукова очистка деталей у фреонових композиціях. Вісник двигунобудівництва.№ 2. С. 192-196.
3. Ultrasonic cleaning and NDT / FPI lines for industry from FinnSonic. Режим доступу до ресурсу: <https://www.finnsonic.com/eng>. [Дата звернення: 03.01.2021].
4. Tangsopha W., Thongsri J. (2020) A Novel Ultrasonic Cleaning Tank Developed by Harmonic Response Analysis and Computational Fluid Dynamics. *Metals*. P. 335.
5. Habiba L., Lowe P. S., Wrobel L. C., Gan T.-H. (2019) Ultrasonic Transducer Array Performance for Improved Cleaning of Pipelines in Marine and Freshwater Applications. *Applied Sciences*, V. 9 (20). 4353. 2019.
6. Guoqiang M., Shoubin Z., Yanming Y., Liping Q., Guicai L., Jingxiu Z. (2019) Membrane fouling control and cleaning technology of ceramic membrane treating wastewater. 4th International Conference on Advances in Energy and Environment Research (ICAEER 2019). *E3S Web of Conferences* 118. 04023.
7. Патент на винахід. 53409 А. Україна, МПК (2012.01): 7 B08B3/12 C02F1/36 C02F1/48. Спосіб ультразвукової очистки виробів/ В.І. Чорний, О.Ф. Луговський, А.В. Мовчанюк, В.П. Фесіч; заявник і патентовласник Чорний В.І., Луговський О.Ф., Мовчанюк А.В., Фесіч В.П. – № 2002054074; заявл. 20.05.2002, опубл. 15.01.2003, Бюл. №1.
8. Kim S., Choi C., Cha Y., Chang J. (2021) The efficacy of convenient cleaning methods applicable for customized abutments: An in vitro study. *BMC Oral Health*, 21(1).
9. Yoo S., Chae J., Oh J., Lim J. (2021) Effect of ultrasonic cleaning of titanium turning scraps immersed in alkaline solution and subsequent preparation of ferrotitanium ingots. *Korean Journal of Metals and Materials*. 59(2). P. 113-120.

10. Harvey G., Gachagan A., Mutasa T. (2014) Review of High Power Ultrasound – Industrial Applications and Measurement Methods. IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. V. 61(3). P. 481-495.
11. Kovach S., «Understanding the Sonic Cleaning Process. Режим доступу до ресурсу: www.healthmark.info/CleaningVerification/SonoCheck/Understanding_the_Sonic_Cleaning_Process_6_2011.pdf. [Дата звернення: 15.09.2020].
12. Агранат Б.А. (1984) Ультразвукова технологія. М.:Машинобудування. С.503.
13. Розенберг Л.Д.(1990) Фізичні основи ультразвукової технології.М.:Наука. С.686.
14. Hesson J. R. Fundamentals of Ultrasonic Cleaning. Hessononic Ultrasonic. Режим доступу до ресурсу: www.hessononic.com. [Дата звернення: 15.10.2020].
15. Antony O. (1963) Technical Aspects of Ultrasonic Cleaning. Ultrasonics. P. 194-198.
16. Crawford A. (1963) A Practical Introduction to Ultrasonic Cleaning. Ultrasonics. P. 65-69.
17. Colclough W. (1968) The chemistry of solvents used for ultrasonic cleaning. Ultrasonics. P. 21-23.
18. Mason T. (2016) Ultrasonic cleaning: An historical perspective. Ultrasonics sonochemistry 29. P. 519-523.
19. Nigmatzyanov R. I., Kazantsev V. F., Prihod'ko V. M., Sundukov S. K., Fatyukhin D. S. (2019) Improvement in Ultrasound Liquid Machining by Activating Cavitation Clusters. ISSN 1068-798X. Russian Engineering Research, V. 8. P. 699–702.
20. Моркун В. С., Кравченко О. (2019) Основні напрямки вдосконалення керування процесом ультразвукового очищення. Вісник Криворізького національного університету. № 49. С. 3-9.

21. Yamashita T., Ando K. (2019) Low-intensity ultrasound induced cavitation and streaming in oxygen-supersaturated water: Role of cavitation bubbles as physical cleaning agents. *Ultrasonics Sonochemistry*. V. 52. № 1. P. 268-279.
22. Niemczewski B. (2014) Cavitation intensity of water under practical ultrasonic cleaning conditions. *Ultrasonics Sonochemistry*. V. 21(1). P. 354-359
23. Saalbach K.-A., Twiefel J., Wallaschek J. (2019) Self-sensing cavitation detection in ultrasound-induced acoustic cavitation *Ultrasonics*. V. 94, P. 401-410.
24. Xu H., Tu J., Niu F., Yang P. (2016) Cavitation dose in an ultrasonic cleaner and its dependence on experimental parameters. *Applied Acoustics*, V. 101. P. 179–184.
25. Rajani C., Salmi A. K., Rauhala T., Hæggström E., Myllymäki P. (2018) «Detecting industrial fouling by monotonicity during ultrasonic cleaning. AALBORG. 1551-2541.
26. Duran F., Teke M.(2018) Design and implementation of an intelligent ultrasonic cleaning device. *Intelligent Automation and Soft Computing*. P. 441-450.
27. Моркун В., Кравченко О. (2020) Моделювання процесу очищення виробів складної конфігурації високоенергетичним ультразвуком. *Вісник Криворізького національного університету*. № 50. С. 62-68.
28. Comsol. Режим доступу до ресурсу: <https://www.comsol.com/> [Дата звернення: 05.08.2021].
29. Howe M. S. (2007) *Hydrodynamics and sound*. Cambridge: Cambridge Univ. Press. P. 463.
30. BEMPP. Режим доступу до ресурсу: <https://bempp.com/>. [Дата звернення: 05.08.2021].
31. Smigaj W., Betcke T., Arridge S., Phillips J., Schweiger M. (2015) Solving boundary integral problems with BEM++. *ACM Trans. Math. Softw.* V. 41. № 2. Article 6.
32. Clawpack. Режим доступу до ресурсу: <https://www.clawpack.org/>. [Дата звернення: 05.08.2021].

33. LeVeque R. J. (2002) Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems. Cambridge: Cambridge University Press. P. 687.
34. Stepanishen P. R. (1971) The time-dependent force and radiation impedance on a piston in a rigid infinite planar baffle. J. Acoust. Soc. Am. V. 49. P. 841-849.
35. Stepanishen P. R. (1971) Transient radiation from pistons in an infinite planar baffle. J. Acoust. Soc. Am. V. 49. P. 1629–1638.
36. Tupholme G. E. (1969) Generation of acoustic pulses by baffled plane pistons. Mathematika. V. 16. P. 209–224.
37. mu-diff. Режим доступа до ресурсу: <http://mu-diff.math.cnrs.fr/>. [Дата звернення: 05.08.2021].
38. Thierry B., Xavier A., Chokri C., Alzubaidi H. (2015) Mu-diff: an Open-Source Matlab Toolbox for Computing Multiple. Computer Physics Communications. V. 192, P. 348-362.
39. Ultrasim. Режим доступа до ресурсу: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/1335-ultrasim>. [Дата звернення: 05.08.2021].
40. Holm S., Teigen F., Ødegaard L., Berre V., Erstad J., K. Epasinghe (1998) ULTRASIM. User's Manual ver 2.1, Program for Simulation of Ultrasonic Fields. OSLO.
41. SimSonic. Режим доступа до ресурсу: <http://www.simsonic.fr>. [Дата звернення: 06.08.2021].
42. M. S. University. (2013) FOCUS Quick Start Guide. Режим доступа до ресурсу: <https://www.egr.msu.edu/~fultras-web/files/documentation/quick-start.pdf>. [Дата звернення: 06.08.2021].
43. DREAM. Режим доступа до ресурсу: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/4502-dream-discrete-representation-array-modelling-toolbox>. [Дата звернення: 07.08.2021].
44. Lingvall F. (2007) User Manual for the DREAM Toolbox. Режим доступа до ресурсу:

http://www.signal.uu.se/Toolbox/dream/userman_html/userman.xml. [Дата звернення: 08.08.2021].

45. Zabolotskaya E. A., Khokhlov R. V. (1969) Quasi-planes waves in the nonlinear acoustic of confined beams. *Sov. Phys. Acoust.* V. 15(1), P. 35-40.

46. Kuznetsov V. (1971) Equations of nonlinear acoustics. *Sov. Phys. Acoust.* V. 16, P. 467-470.

47. Lee Y.-S. (1993) Numerical solution of the KZK equation for pulsed finite amplitude sound beams in thermoviscous fluids. The University of Texas at Austin: Ph.D. dissertation.

48. High intensity focused ultrasound simulator. Режим доступу до ресурсу: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/30886-high-intensity-focused-ultrasound-simulator>. [Дата звернення: 09.08.2021].

49. Pennes H. (1948) Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm. *J Appl Physiol.* № 1, P. 93-122.

50. Pozzi S., Borrazzov C., Carnì M., Castro E. Di, Valentini S., Caccia B. (2016) A computational tool for evaluating HIFU safety. *Ann Ist Super Sanità.* V. 52. № 2. P. 256-260.

51. Моркун В., Кравченко О. (2020) Моделювання параметрів ультразвукового поля в процесі очищення виробів складної конфігурації. *Гірничий вісник.* № 107. С. 3-10 .

52. Bradley B. T. C. (2013) Acoustic attenuation compensation in photoacoustic tomography using time-variant filtering. *J. Biomed. Opt.* V. 18, № 3, P. 036008.

53. Bradley B. T. C, Cox B. T. (2010) k-Wave: MATLAB toolbox for the simulation and reconstruction of photoacoustic wave. *Journal of Biomedical Optics.* V. 15 (2). 021314.

54. Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A. (2014) Iron ore flotation process control and optimization using high-energy. *Metallurgical and Mining Industry.* V. 6, № 2, pp. 36-42.

55. Kohout B., Palacios L., Dapp R., Zapf M., Ruiter N. V. (2012) Sound field simulation tool for arbitrary rectangular transducer array matrices. 2012 IEEE International Ultrasonics Symposium. Dresden. Germany. pp. 568-571.

56. Discrete REpresentation Array Modelling. Режим доступа до ресурсу: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/4502-dream-discrete-representation-array-modelling-toolbox?s_tid=FX_rc1_behav. [Дата звернення: 26.08.2021].

57. k-Wave. Режим доступа до ресурсу: <http://www.k-wave.org/index.php>. [Дата звернення: 10.08.2021].

58. Lyndgaard C., Rasmussen M., Engelsen S., Thaysen D., Berg F. (2014) Moving from recipe-driven to measurement-based cleaning procedures: Monitoring the Cleaning-In-Place process of whey filtration units by ultraviolet spectroscopy and chemometrics. *J. Food Eng.* № 126, P. 82-88.

59. Berg T., Ottosen N., Berg F., Ipsen R. (2017) Inline UV-Vis spectroscopy to monitor and optimize cleaning-in-place (CIP) of whey filtration plants. *LWT.* № 75, P. 164-170.

60. Wallhäußer E., Hussein M., Becker T. (2012) Detection methods of fouling in heat exchangers in the food industry. *Food Control.* № 27. P. 1-10.

61. Tlili M., Rousseau P., Ben Amor M., Gabrielli C. (2008) An electrochemical method to study scaling by calcium sulphate of a heat transfer surface. *e. Chem. Eng. Sci.* № 63, P. 559–566.

62. Simeone A., Watson N., Sterritt I., Woolley E. (2016) A Multi-sensor Approach for Fouling Level Assessment in Clean-in-place Processes. *Procedia CIRP.* № 55, P. 134-139.

63. Simeone A., Deng B., Watson N., Woolley E. (2018) Enhanced Clean-In-Place Monitoring Using Ultraviolet Induced Fluorescence and Neural Networks. *Sensors.* № 18. P. 3742.

64. Pereira A., Mendes J., Melo L. (2009) Monitoring cleaning-in-place of shampoo films using nanovibration technology. *Sensors Actuators B Chem.* № 136. P. 376–382.

65. Úbeda M., Hussein W., Hussein M., Hinrichs J., Becker T. (2015) Acoustic sensing, and signal processing techniques for monitoring milk fouling cleaning operations. *Eng. Life Sci.* № 16. P. 67-77.
66. Escrig J., Woolley E., Simeone A., Watson N. (2020) Monitoring the cleaning of food fouling in pipes using ultrasonic measurements and machine learning. *Food Control.* V. 116, 107309.
67. Wallhäußer E., Hussein W., Hussein M., Hinrichs J., Becker T. (2011) On the usage of acoustic properties combined with an artificial neural network—A new approach of determining presence of dairy fouling. *J. Food Eng.* № 103. P. 449–456.
68. Rivera F. J. C., Mishra D. K., Ozadali F., Benyathiar P. (2021) Real-Time Detection of Fouling-Layer with a Non-Intrusive Continuous Sensor (NICS) during Thermal Processing in Food Manufacturing. *Sensors* 2021. № 21. P. 1271.
69. Withers P. (1996) Ultrasonic, acoustic, and optical techniques for the non-invasive detection of fouling in food processing equipment. *Trends Food Sci. Technol.* V.7. № 9. P. 293–298.
70. Tamachkiarow A., Flemming H.-C. (2003) On-line monitoring of biofilm formation in a brewery water pipeline system with a fibre optical device. *Water Sci. Technol.* V. 47. № 5. P. 19-24.
71. A. Simeone, E. Woolley, J. Escrig ta N. Watson (2020) Intelligent Industrial Cleaning: A Multi-Sensor Approach Utilising Machine Learning-Based Regression. *Sensors.* V. 20(13). № 3462.
72. Papa I., Lopresto V., Langella A. (2021) Ultrasonic inspection of composites materials: Application to detect. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture.* V.4. № 1. P. 37-42.
73. Majhi S., Mukherjee A., George N., Karaganov V., Uy B. (2021) Corrosion monitoring in steel bars using Laser ultrasonic guided waves and advanced signal processing. *Mechanical Systems and Signal Processing.* № 149, P. 107176.
74. Liao Z., Zhang X., Liu T., Jia J., Tu S.-T. (2020) Characteristics of high-temperature equipment monitoring using dry-coupled ultrasonic waveguide transducers. *Ultrasonics.* V. 108. P. 106236.

75. Porkuian O., Morkun V., Morkun N.(2020) Measurement of the ferromagnetic component content in the ore suspension solid phase. *Ultrasonics*. V. 105. P. 106103. 2020.

76. Franco E. E., Barrera H. M., Formigoni P. O., Buiochi F. (2021) Shear-wave corner retroreflector device for ultrasonic measurement of viscosity. *Ultrasonics*. V. 117. № 106538.

77. Bhuvaneshwary N., Jayapriya V., Mounika V., Pravallika S. (2022) Collision Avoidance in Vehicles Using Ultrasonic Sensor. *International Conference on Expert Clouds and Applications. Lecture Notes in Networks and Systems*. V.9.

78. Liu K., Yang L., Wang M., Yang S. (2021) Optimization of High Precision Magnetostrictive Linear Displacement Sensor. *IEEE Sensors Journal*. V. 21. № 17. V. 18535-18543.

79. Yim H. J., Bae Y. H., Jun Y. (2021) Hydration and microstructural characterization of early-age cement paste with ultrasonic wave velocity and electrical resistivity measurements. *Construction and Building Materials*. V. 303, № 124508.

80. Yang Z., Tian Y., Li W., Zhou H., Zhang W., Li J. (2017) Experimental Investigation of the Acoustic Nonlinear Behavior in Granular Polymer Bonded Explosives with Progressive Fatigue Damage. *Materials (Basel)*. V. 10(6). P. 660.

81. Yang Z.-F., Tian Y., Zhou H.-Q., Xu Y., Zhang W.-B. (2016) Nonlinear Ultrasonic Response of TATB-Based Polymer. *19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016*. P. 1-8.

82. Christofides P. (2010) *Nonlinear and Robust Control of PDE Systems: Methods and Applications to Transport-Reaction Processes*. Boston: Birkhuser.

83. Ray W. H. (1989) *Advanced process control*. Boston: Butterworths.

84. Maida A., Diaf M., Corriou J. (2010) Boundary control of a parallel-flow heat exchanger by input-output linearization. *Journal of Process Control*. № 20. P. 1161-1174.

85. Shang H., Guay M. (2005) Feedback control of hyperbolic distributed parameter systems. *Chemical Engineering Science*. № 60. P. 969-980.

86. Maida A., Corriou J.-P. (2011) Boundary Control of Nonlinear Distributed Parameter Systems by Input-Output Linearization. Preprints of the 18th IFAC World Congress. Milano (Italy). August 28 - September 2, 2011.
87. Zadeh L. (1965) Fuzzy sets. *Information & Control*. № 8, P. 338-353.
88. Zhao H., Zhou R., Guo Y., Jin J., Yu S., Sun F. (2021) Design and Experimental Validation of a Fuzzy Cascade Controller for a Zero-Power Permanent Magnetic Suspension System with Variable Flux Path Control. *Actuators 2021*. № 10. P. 118.
89. Vembarasan V. (2022) Passivity based on synchronization of T-S fuzzy energy resources system. *J. Math. Computer Sci.* № 25. P. 269-283.
90. Wang Y., Li K. (2021) A Fuzzy Adaptive Firefly Algorithm for Multilevel Color Image Thresholding Based on Fuzzy Entropy. *International Journal of Cognitive Informatics and Natural Intelligence*. V. 15. № 4. P. 1-20.
91. Fannakh M., Elhafyani M., Zouggar S., Zahboune H. (2021) Overall fuzzy logic control strategy of direct driven PMSG wind turbine connected to grid. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. V. 11. № 6. P. 5515-5129.
92. Jiang Y., Duan R., Liu P. (2020) Fuzzy Control of Floating Raft Active Vibration Isolation System under Narrowband Interference,» *International Journal of Acoustics and Vibration*. V. 25. № 4. P. 557-565.
93. Wu Y., Yang W., Tieshan L., Zhixin Y. (2021) New fault tolerant control scheme for non-linear systems by T-S fuzzy model approach. *IET Control Theory & Applications*. V. 15. № 106. P. 1915-1929.
94. Muthugala M., Palanisamy P., Samarakoon S., Padmanabha S., Elara M., Terntzer D. (2021) Raptor: A Design of a Drain Inspection Robot. *Sensors*. V. 21. № 5742. P. 1-17.
95. Errouha M., Motahhir S., Combe Q., Derouich A. (2021) Intelligent control of induction motor for photovoltaic water pumping system. *SN Applied Science*. V. 3(9). № 777. P. 1-14.

96. Riansyah A., Mulyono S., Roichani S. (2021) Applying fuzzy proportional integral derivative on Internet of things for figs greenhouse. *IAES International Journal of Artificial Intelligence (IJ-AI)*. V. 10. № 3. P. 536-544.
97. Medina-Santiago A., Morales-Rosales L., Hernández-Gracidas C., Algreto-Badillo I., Pano-Azucena A, Orozco Torres J. (2021) Reactive Obstacle–Avoidance Systems for Wheeled Mobile Robots Based on Artificial Intelligence. *Appl. Sci*. V. 11. № 6468. P. 1-21.
98. Zhou H., Nguyen V., Jiao R., Huan H. (2021) Application of machine learning method to control the vibration of the car’s suspension system. *Vibroengineering procedia*. № 38. P. 44-49.
99. Benzian S., Ameer A., Rebai A. (2021) Design an Optimal Fractional Order PID Controller Based on New Algorithms and a Fuzzy Logic Controller to Regulate Type 1 Diabetes Patients. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*. V. 54. № 3. P. 381-394.
100. Zadeh L. (1975) The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. *Information Science*. № 8. P. 199-249. 1975.
101. Mendel J., John R., Liu F. (2006) Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems Made Simple. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. V. 14. № 6. P. 808-821.
102. Namvar H., Bamdad S. (2021) Resilience-based efficiency measurement of process industries with type-2 fuzzy sets. *International Journal of Fuzzy Systems*. V. 23. № 4. P. 1122-1136.
103. Shukla A. K., Yadav M., Kumar S., Muhuri P. K. (2020) Veracity handling and instance reduction in big data using interval type-2 fuzzy sets. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. V. 88. № 103315.
104. Huidong W., Jinli Y., Xiaoyun Z., Yao Z. (2021) An Area Similarity Measure for Trapezoidal Interval Type-2 Fuzzy Sets and Its Application to Service Quality Evaluation. *International Journal of Fuzzy Systems*. V. 23, P. 2252–2269.
105. Dilmi I., Abderrahmen B., Ali D., Larbi C.-A. (2021) Interval Type-2 Fuzzy Logic-Second Order Sliding Mode Based Fault Detection and Active Fault-

Tolerant Control of Brushless DC Motor. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*. V. 54. № 3. P. 475-485.

106. Chengdong L., Guiqing Z., Wang G., Yi J. (2013) Data-driven modeling and optimization of thermal comfort and energy consumption using type-2 fuzzy method. *Soft Computing*. V. 17. № 11. P. 2075-2088.

107. Ireneusz D. (2015) Type-2 fuzzy logic controller for position control of shape memory alloy wire actuator. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. V. 27. № 14. P. 1917-1926.

108. Dominikowski B. (2019) Intelligent measurements of dynamic change current of traction battery of an electric vehicle using interval fuzzy sets of type-2 with the application takagi-sugeno-kanga. *Przeglad Elektrotechniczny*. V. 95. № 11. P. 47-51.

109. Li H., Zhang X., Li S. (2007) A Three-Dimensional Fuzzy Control Methodology for a Class of Distributed Parameter Systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. V. 15. № 3. P. 470-481.

110. Xianxia Zhang, Zhi-Qiang Fu, Li Shao-Yuan, Zou Tao, Wang Bing. (2017). A time/space separation based 3D fuzzy modeling approach for nonlinear spatially distributed systems. *International Journal of Automation and Computing*. № 15. P. 1-14.

111. Medak D., Posilovic L., Subasic M., Budimir M., Loncaric S. (2021) Automated defect detection from ultrasonic images using deep learning. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. V. 68. № 10. P. 3126-3134.

112. Honarvar F., Patel S., Vlasea M., Amini H., Varvani-Farahani A. (2021) Nondestructive Characterization of Laser Powder Bed Fusion Components Using High-Frequency Phased Array Ultrasonic Testing. *Journal of Materials Engineering and Performance*. V. 30. № 9. P. 6766-6776.

113. Zhang Y., Pei Y., Zhang G., Zhang S., Zhang W. (2021) Design of Ultrasound Computer Tomography System Based on Annular Phased Array. *Yadian Yu Shengguang/Piezoelectrics and Acousto-optics*. V. 43, № 4, P. 518-522.

114. Wang C., Qi B., Lin M., Zhang Z., Makihata M., Liu B., Xu S. (2021) Continuous monitoring of deep-tissue haemodynamics with stretchable ultrasonic phased arrays. *Nature Biomedical Engineering*. V. 5. № 7. P. 749-758.
115. Sukhanov D., Rosliakov S. (2021) Particle levitation and control in midair using wideband ultrasonic waves. *Applied Acoustics*. V. 178. 108004.
116. Seok C., Adelegan O. J., Biliroglu A. O., Yamaner F. Y., Oralkan O. (2021) A wearable ultrasonic neurostimulator - part II: A 2D CMUT phased array system with a flip-chip bonded ASIC. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*. V. 15. № 4. P. 705-718.
117. Zubair M., Dickinson R. (2021) Calculating the effect of ribs on the focus quality of a therapeutic spherical random phased array. *Sensors (Switzerland)*. V. 21(4). № 1211. P. 1-18.
118. Kazuyuki N., Naoyuki K. (2012) 3-D Modelings of an Ultrasonic Phased Array Transducer and Its Radiation Properties in Solid. *Ultrasonic Waves*. P. 59-80.
119. Tangsopha W., Thongsri J., Busayaporn W. (2017) Simulation of ultrasonic cleaning and ways to improve the efficiency. Pattaya. Thailand. 8-10 March 2017.
120. Tabei M., Mast T., Waag R. (2002) A k-space method for coupled first-order acoustic propagation equations. *Journal of the Acoustical Society of America*. V. 1, № 111, P. 53-63.
121. Taneja H. (2008) Chapter 18: Fourier integrals and Fourier transforms. *Advanced Engineering Mathematics*. New Delhi. India. I. K. International Pvt Ltd. V. 2. P. 192.
122. Lord R. (1986) *Theory of Sound*. MacMillan & Co. Ltd: London.
123. Morkun V., Morkun N., Pikilniak A. (2019) *The Propagation of Ultrasonic Waves in Gas-containing Suspensions*. Cambridge Scholars Publishing.
124. Morkun V., Kravchenko O. (2021) Evaluation of ultrasonic cleaning process. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. V. 3. P. 117-123.

125. Morkun V., Kravchenko O. (2022) Spatial control over ultrasonic cleaning of mining equipment using a phased array technology. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. V. 2. P. 31-36.

126. Morkun V., Kravchenko O. (2020) Adaptive control over ultrasonic cleaning of mining equipment. *Ukrainian School of Mining Engineering – 2020. E3S Web of Conferences* 201. P. 01005.

127. Morkun V., Kravchenko O. (2021) Three-Dimensional Fuzzy Control of Ultrasonic Cleaning. *Acta Mechanica et Automatica*. V. 15. № 3. P. 169-176.

128. Liang Q., Mendel J. (2000) Interval type-2 fuzzy logic systems: Theory and design. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. V. 8. № 5. P. 535-550.

129. Mamdani E. (1974) Application of fuzzy logic algorithms for control of simple dynamic plant. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. V. 121. № 12. P. 1585-1588.

130. Mendel J. (2007) Advances in type-2 fuzzy sets and systems. *Information Sciences*. V. 177, P. 84-110.

131. Karnik N., Mendel J. (2001) Centroid of a type-2 fuzzy set. *Inform.Sci* V. 132. P. 195-220.

132. Sensor Array Analyzer.

<https://de.mathworks.com/help/phased/ref/sensorarrayanalyzer-app.html>. [Дата звернення: 09.08.2021].

133. Demi L. (2018) Practical Guide to Ultrasound Beam Forming: Beam Pattern and Image Reconstruction Analysis. *Appl. Sci*. V. 8. № 1544. P. 1-15.

134. Treeby B. E., Jaros J., Rendell A.P., Cox B.T. (2012) Modeling nonlinear ultrasound propagation in heterogeneous media with power law absorption using a k-space pseudospectral method. *Acoustical Society of America*. V. 131 (6). P. 4324–4336.

135. Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A. (2014) Modeling of ultrasonic waves propagation in inhomogeneous medium using fibered spaces method (k-space). *Metallurgical and Mining Industry*. V. 6, № 2, pp. 43-48, 2014.

136. Morkun V., Kravchenko O. (2021) Spatial ultrasonic cleaning process control based on its current state evaluation. *Second International Conference on*

Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters. P. 07016.

137. Кравченко О.М (2022) Дослідження параметрів функцій приналежності тривимірного інтервального нечіткого контролера для ультразвукового очищення. Вісник Криворізького національного університету. № 54. С. 173-179

Додаток А

Моделювання очищення виробу шляхом зменшення товщини забруднення



Рис. А.1. Функціональний алгоритм моделювання процесу очищення із зміною товщини забруднення

Лістинг коду для розділу 2.2

```

clearvars;

% створення сітки експерименту
Nx = 216; % кількість комірок сітки у X-напрямку
Ny = 216; % кількість комірок сітки у Y-напрямку
dx = 50e-3; % розмір комірки у X-напрямку, м
dy = dx; % розмір комірки у Y-напрямку, м
kgrid = kWaveGrid(Nx, dx, Ny, dy); % створення сітки

% цикл із поступовим зменшенням товщини забруднення

for kk=1:4
    % визначення очищувальної рідини
    medium.sound_speed = 1500 * ones(Nx, Ny); %швидкість розповсюдження
    ультразвуку [м/с]
    medium.density = 1000 * ones(Nx, Ny); % густина [кг/м^3]
    % визначення очищеного виробу
    for i=1:Nx
        for j=1:Ny

            if (((i)^2)+((j))^2)<110^(2))
                medium.density(i,j) = 7800; % густина [кг/м^3]
                medium.sound_speed(i,j) = 5900; %швидкість розповсюдження ультразвуку
                [м/с]
            end

        end
    end
    % визначення забруднення
    for i=1:Nx
        for j=1:Ny

            if (((i)^2)+((j))^2)<(110+40-10*kk)^(2)) && ((i)^2)+((j)^2)>=110^(2)
                medium.density(i,j) = 3100; % густина [кг/м^3]
                medium.sound_speed(i,j) = 2500; %швидкість розповсюдження УЗ[м/с]
            end

        end
    end

    % створення часового масиву
    t_end = 4e-6;
    kgrid.makeTime(medium.sound_speed/1.5);

    % визначення дискового випромінювача
    source.p_mask = zeros(Nx, Ny);
    disc_magnitude = 2; %Тиск [Па]
    disc_x_pos = Nx-15; % Координата X
    disc_y_pos = Ny-15; % Координата Y
    disc_radius = 6; % Радіус, комірок
    disc_2 = disc_magnitude * makeDisc(Nx, Ny, disc_x_pos, disc_y_pos,
    disc_radius);
    source.p0 = disc_2;
    display_mask = source.p_mask;
    % визначення параметрів сітки

```

```

input_args = {'PMLAlpha', 1e3, 'DisplayMask', display_mask, 'PMLSize',
3, 'PlotLayout', true, 'PlotPML', false};
% визначення розташування датчика
sensor.mask = zeros(Nx, Ny);
sensor.mask(Nx-15, Ny-15) = 1;
% очищення змінної з результатами симуляції
clear sensor_data1;
% запуск симуляції
sensor_data1 = kspaceFirstOrder2D(kgrid, medium, source, sensor,
input_args{:});
%масштабування часу
[t, t_sc, t_prefix] = scaleSI(kgrid.t_array(:));

%виведення показників датчика
p_lim = 1;
figure;
plot(t_sc * kgrid.t_array(2000:end), sensor_data1(1, 2000:end), 'k-');
xlabel(['Time [' t_prefix 's']]);
ylabel('p');

end

```

Результати моделювання наведено в основному тексті роботи.

Моделювання очищення виробу шляхом зменшення густини забруднення

Функціональний алгоритм подібний до рис.А.1. із зміною блоку 4, в якому тепер не товщина, а густина буде зменшуватись із збільшенням kk .

Лістинг коду для розділу 2.3

```

clearvars;

% створення сітки експерименту
Nx = 216; % кількість комірок сітки у X-напрямку
Ny = 216; % кількість комірок сітки у Y-напрямку
dx = 50e-3; % розмір комірки у X-напрямку, м
dy = dx; % розмір комірки у Y-напрямку, м
kgrid = kWaveGrid(Nx, dx, Ny, dy); % створення сітки

% цикл із поступовим зменшенням густини забруднення

for kk=1:4
% визначення очищувальної рідини
medium.sound_speed = 1500 * ones(Nx, Ny); %швидкість розповсюдження
ультразвуку [м/с]
medium.density = 1000 * ones(Nx, Ny); % густина [кг/м^3]
% визначення очищеного виробу
for i=1:Nx
for j=1:Ny

if (((i))^2+((j))^2)<110^2)
medium.density(i,j) = 7800; % густина [кг/м^3]
medium.sound_speed(i,j) = 5900; %швидкість розповсюдження ультразвуку
[м/с]

end

end
end
% визначення забруднення
for i=1:Nx
for j=1:Ny

```

```

if ((i)^2)+((j)^2)<(110+30)^(2)) && ((i)^2)+((j)^2)>=110^(2)
medium.density(i,j) = 3100-700*kk; % густина [kg/m^3]
medium.sound_speed(i,j) = 2500-333*kk; % швидкість розповсюдження УЗ
[m/s]
end
end
end

% створення часового масиву
t_end = 4e-6;
kgrid.makeTime(medium.sound_speed/1.5);

% визначення дискового випромінювача
source.p_mask = zeros(Nx, Ny);
disc_magnitude = 2; %Тиск [Па]
disc_x_pos = Nx-15; % Координата X
disc_y_pos = Ny-15; % Координата Y
disc_radius = 6; % Радіус, комірок
disc_2 = disc_magnitude * makeDisc(Nx, Ny, disc_x_pos, disc_y_pos,
disc_radius);
source.p0 = disc_2;
display_mask = source.p_mask;
% визначення параметрів сітки

input_args = {'PMLAlpha', 1e3, 'DisplayMask', display_mask, 'PMLSize',
3, 'PlotLayout', true, 'PlotPML', false};
% визначення розташування датчика
sensor.mask = zeros(Nx, Ny);
sensor.mask(Nx-15, Ny-15) = 1;
% очищення змінної з результатами симуляції
clear sensor_data1;
% запуск симуляції
sensor_data1 = kspaceFirstOrder2D(kgrid, medium, source, sensor,
input_args{:});
%масштабування часу
[t, t_sc, t_prefix] = scaleSI(kgrid.t_array(:));

%виведення показників датчика
p_lim = 1;
figure;
plot(t_sc * kgrid.t_array(2000:end), sensor_data1(1, 2000:end), 'k-');
xlabel(['Time [' t_prefix 's']]);
ylabel('p');

end

```

Модельовання очищення виробів складної конфігурації

Для дослідження впливу конфігурації було ускладнено форму очищуваного виробу та описано наявність забрудненого отвору. Початкові умови та демонстрація розповсюдження ультразвукових хвиль наведено на рис. А.2.

Лістинг коду для розділу 2.4

```

clearvars;

% створення сітки експерименту
Nx = 216; % кількість комірок сітки у X-напрямку
Ny = 216; % кількість комірок сітки у Y-напрямку
dx = 50e-3; % розмір комірки у X-напрямку, м

```

```

dy = dx; % розмір комірки у Y-напрямку, м
kgrid = kWaveGrid(Nx, dx, Ny, dy); % створення сітки

% цикл із поступовим зменшенням густини забруднення

for kk=1:4
    % визначення очищувальної рідини
    medium.sound_speed = 1500 * ones(Nx, Ny); %швидкість розповсюдження
    ультразвуку [м/с]
    medium.density = 1000 * ones(Nx, Ny); % густина [кг/м^3]
    % визначення очищеного виробу
    for i=1:Nx
    for j=1:Ny

        if (((i)^(2))+((j)^(2))<110^(2))
            medium.density(i,j) = 7800; % густина [кг/м^3]
            medium.sound_speed(i,j) = 5900; %швидкість розповсюдження ультразвуку [м/с]
        end

        end
        end
        % визначення забруднення
        if (((i)^(2))+((j)^(2))<(110+39-13*kk)^(2)) && ((i)^(2))+((j)^(2))>=110^(2))
            medium.density(i,j) = 3100; % густина [кг/м^3]
            medium.sound_speed(i,j) = 2500; %швидкість розповсюдження ультразвуку
            [м/с]
        end

        if (tan(j/i)>1/(3^0.5)) && (tan(j/i)<3^0.5) && (((i)^(2))+((j)^(2))<(110)^(2))
        && (((i)^(2))+((j)^(2))>(80)^(2))
            medium.density(i,j) = 3100; % густина [кг/м^3]
            medium.sound_speed(i,j) = 2500; %швидкість розповсюдження ультразвуку
            [м/с]
        end

        end
        end
        % створення часового масиву
        t_end = 4e-6;
        kgrid.makeTime(medium.sound_speed/1.5);

        % визначення дискового випромінювача
        source.p_mask = zeros(Nx, Ny);
        disc_magnitude = 2; %Тиск [Па]
        disc_x_pos = Nx-15; % Координата X
        disc_y_pos = Ny-15; % Координата Y
        disc_radius = 6; % Радіус комірок
        disc_2 = disc_magnitude * makeDisc(Nx, Ny, disc_x_pos, disc_y_pos,
        disc_radius);
        source.p0 = disc_2;
        display_mask = source.p_mask;
        % визначення параметрів сітки

        input_args = {'PMLAlpha', 1e3, 'DisplayMask', display_mask, 'PMLSize',
        3, 'PlotLayout', true, 'PlotPML', false};
        % визначення розташування датчику
        sensor.mask = zeros(Nx, Ny);
        sensor.mask(Nx-15, Ny-15) = 1;
        % очищення змінної з результатами симуляції
        clear sensor_data1;
        % запуск симуляції
        sensor_data1 = kspaceFirstOrder2D(kgrid, medium, source, sensor,
        input_args{:});
        %масштабування часу
        [t, t_sc, t_prefix] = scaleSI(kgrid.t_array(:));

```

```

%виведення показників датчика
p_lim = 1;
figure;
plot(t_sc * kgrid.t_array(2000:end), sensor_data1(1, 2000:end), 'k-');
xlabel(['Time [' t_prefix 's']]);
ylabel('p');

```

end

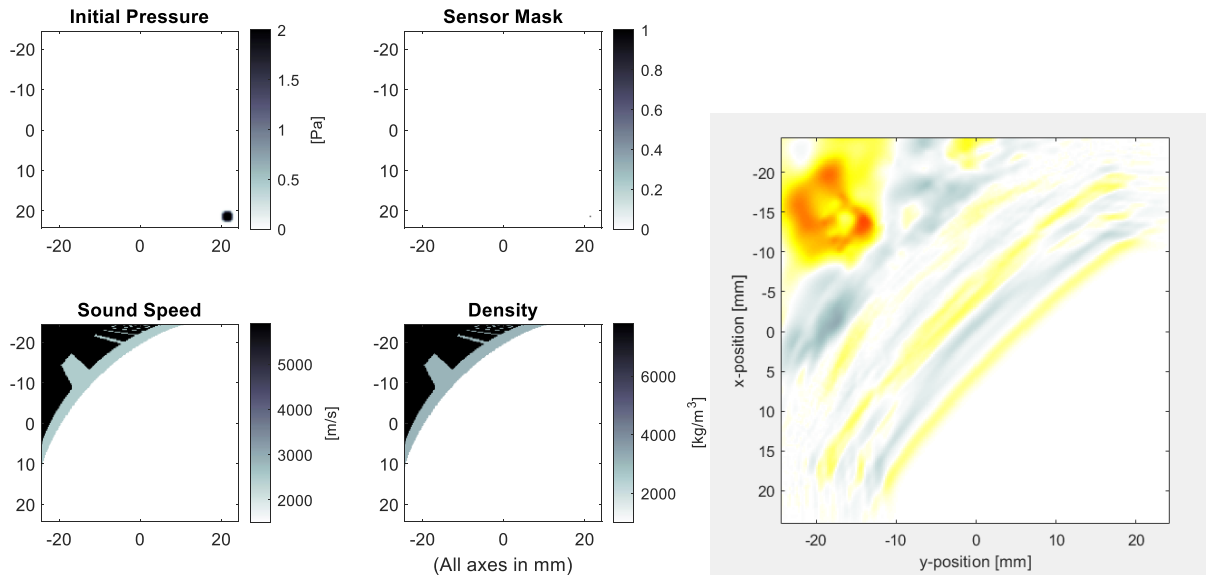


Рис. А.2. Початкові умови та ілюстрація розповсюдження ультразвукового поля при моделюванні очищення ділянки виробу складної конфігурації

Моделювання очищення у просторі із фіксацією сигналі у чотирьох заданих позиціях

Для дослідження впливу відстані між сенсором та забрудненням розглянуто моделювання очищення у тривимірній системі координат. При цьому змінюється як вигляд початкових умов, так і перебігу симуляції. k-Wave дозволяє досліджувати розповсюдження хвиль у вигляді трьох проекцій (рис А.3).

Лістинг коду для розділу 2.5

```

clearvars;

%
=====
% SIMULATION
%
=====

% створення сітки експерименту
Nx = 64; % кількість комірок сітки у X-напрямку
Ny = 64; % кількість комірок сітки у Y-напрямку
Nz = 64; % кількість комірок сітки у Z-напрямку
dx = 0.1e-3; % розмір комірки у X-напрямку, м
dy = 0.1e-3; % розмір комірки у Y-напрямку, м

```

```

dz = 0.1e-3; % розмір комірки у Z-напрямку, м
kgrid = kWaveGrid(Nx, dx, Ny, dy, Nz, dz); % створення сітки

% цикл із поступовим зменшенням товщини забруднення
for kk=1:3
    % визначення очищувальної рідини
    medium.sound_speed = 1500 * ones(Nx, Ny); %швидкість розповсюдження
    ультразвуку [м/с]
    medium.density = 1000 * ones(Nx, Ny); % густина [кг/м^3]
    % визначення очищуваного виробу
    for i=1:Nx
        for j=1:Ny

            if (((i-32))^(2))^(1/3)+(((j-32))^(2))^(1/3)<15^(2/3))
                medium.density(i,j,1:Nz-20) = 7800; % % густина [кг/м^3]
                medium.sound_speed(i,j,1:Nz-20) = 5900; %швидкість розповсюдження
                ультразвуку [м/с]

            end

        end
    end

    % визначення забруднення
    for i=Nx/2+5:Nx
        for j=Ny/2:Ny

            if (((i-32))^(2))^(1/3)+(((j-32))^(2))^(1/3)<(24-kk*3)^(2/3)) && (((i-
            32))^(2))^(1/3)+(((j-32))^(2))^(1/3)>=15^(2/3))
                medium.density(i,j,1:Nz-20) = 3100; % густина [кг/м^3]
                medium.sound_speed(i,j,1:Nz-20) = 2500; %швидкість розповсюдження
                ультразвуку [м/с]

            end

        end
    end

    % створення початкового поля тиску з використанням функції makeBall
    % джерело 1
    ball_magnitude = 10; % тиск[Pa]
    ball_x_pos = Nx/2; % координата X
    ball_y_pos = Ny-5 % координата Y
    ball_z_pos = 32; % координата Z
    ball_radius = 3; % розмір випромінювача
    ball_1 = ball_magnitude * makeBall(Nx, Ny, Nz, ball_x_pos, ball_y_pos,
    ball_z_pos, ball_radius);
    % джерело 2
    ball_magnitude = 10; % тиск[Pa]
    ball_x_pos = Nx-5; % координата X
    ball_y_pos = Ny/2; % координата Y
    ball_z_pos = 32; % координата Z
    ball_radius = 3; % розмір випромінювача
    ball_2 = ball_magnitude * makeBall(Nx, Ny, Nz, ball_x_pos, ball_y_pos,
    ball_z_pos, ball_radius);
    % джерело 3
    ball_magnitude = 10; % тиск[Pa]
    ball_x_pos = 5; % координата X
    ball_y_pos = Ny/2; % координата Y
    ball_z_pos = 32; % координата Z
    ball_radius = 3; % розмір випромінювача
    ball_3 = ball_magnitude * makeBall(Nx, Ny, Nz, ball_x_pos, ball_y_pos,
    ball_z_pos, ball_radius);

```



```

    % джерело 4
    ball_magnitude = 10; % тиск[Pa]
    ball_x_pos = Nx/2; % координата X
    ball_y_pos = 5; % координата Y
    ball_z_pos = 32; % координата Z
    ball_radius = 3; % розмір випромінювача
    ball_4 = ball_magnitude * makeBall(Nx, Ny, Nz, ball_x_pos, ball_y_pos,
ball_z_pos, ball_radius);

    % Об'єднання джерел
    source.p0 = ball_1 + ball_2+ball_3 + ball_4;

    % визначення точок зняття сигналу
    sensor.mask = zeros(Nx, Ny, Nz);
    sensor.mask(Nx/2, Ny-8, 32) = 1; % датчик 1
    sensor.mask(8, Ny/2, 32) = 1; % датчик 2
    sensor.mask(Nx-8, Ny/2, 32) = 1; % датчик 3
    sensor.mask(Nx/2, 8, 32) = 1; % датчик 4

    % вхідні параметри
    input_args = {'PMLSize', 5, 'PlotLayout', true, 'PlotPML', false, ...
'DataCast', 'single', 'CartInterp', 'nearest'};

    % Запуск симуляції
    sensor_data = kspaceFirstOrder3D(kgrid, medium, source, sensor,
input_args{:});

    %
    =====
    % Візуалізація
    %
    =====

    % тримірний графік розташування випромінювачів

    voxelPlot(double(source.p0 + sensor.mask));
    view([50, 20]);
    %масштабування часу
    [t, t_sc, t_prefix] = scaleSI(kgrid.t_array(:));
    figure;
    %виведення графіків для 4 датчиків
    for t1=1:4
        p_lim = 1;
        subplot(4,1,t1)
        plot(t_sc * kgrid.t_array(500:end), sensor_data(t1,500:end), 'k-');
        xlabel(['Time [' t_prefix 's']]);
        ylabel('p');
        ylim([-0.5 0.5])
    end

end

```

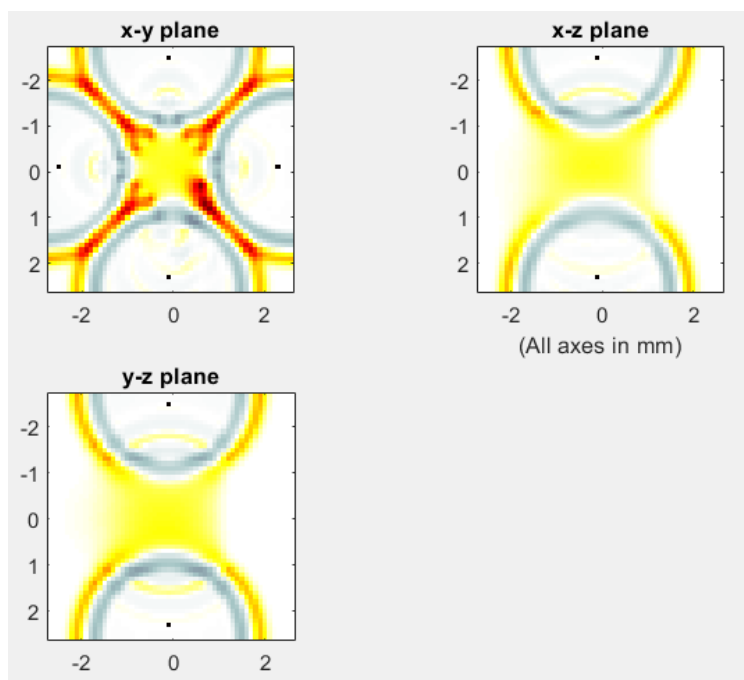


Рис. А.3. Ілюстрація розповсюдження ультразвукового поля при моделюванні очищення у просторі

Додаток Б

Моделювання ультразвукових відгуків в процесі очищення з урахуванням поступового забруднення рідини

Вважаємо, що забруднення рідини в процесі його відшаровування від виробу під час очищення частково перетворюється в зважені частинки у рідині, а частково осідає на дно ванни.

Лістинг коду для розділу 3.3

```
clearvars;

% =====
% Моделювання
% =====

% створення сітки експерименту
Nx = 216; % кількість комірок сітки у X-напрямку
Ny = 216; % кількість комірок сітки у Y-напрямку
dx = 50e-3; % розмір комірки у X-напрямку, м
dy = dx; % розмір комірки у Y-напрямку, м
kgrid = kWaveGrid(Nx, dx, Ny, dy); % створення сітки

for kk=1:4
    % визначення очищувальної рідини
    medium.sound_speed = 1500 * ones(Nx, Ny); %швидкість розповсюдження
    ультразвуку [м/с]
    medium.density = 1000 * ones(Nx, Ny); % густина [кг/м^3]

    % визначення очищуваного виробу
    medium.density(Nx-60:Nx,1:Ny) = 7800; % густина [кг/м^3]
    medium.sound_speed(Nx-60:Nx,1:Ny) = 5900; %швидкість розповсюдження
    ультразвуку [м/с]
    % визначення забруднення
    medium.density(Nx-60-40+10*kk:Nx-60,1:Ny) = 3100; % густина [кг/м^3]
    medium.sound_speed(Nx-60-40+10*kk:Nx-60,1:Ny) = 2500; %швидкість
    розповсюдження ультразвуку [м/с]

    % визначення забруднення рідини
    if kk>1
        for d=1:Nx-60-40+10*kk
            for dd=1:Ny
                if (rand(1)*1000<(11*10*kk/(Nx-60)))
                    medium.density(d,dd) = 3100; % густина [кг/м^3]
                    medium.sound_speed(d,dd) = 2500; %швидкість розповсюдження ультразвуку
                    [м/с]
                end
            end
        end
    end

    % створення часового масиву
    kgrid.makeTime(medium.sound_speed);

    % визначення дискового випромінювача
    source.p_mask = zeros(Nx, Ny);
```

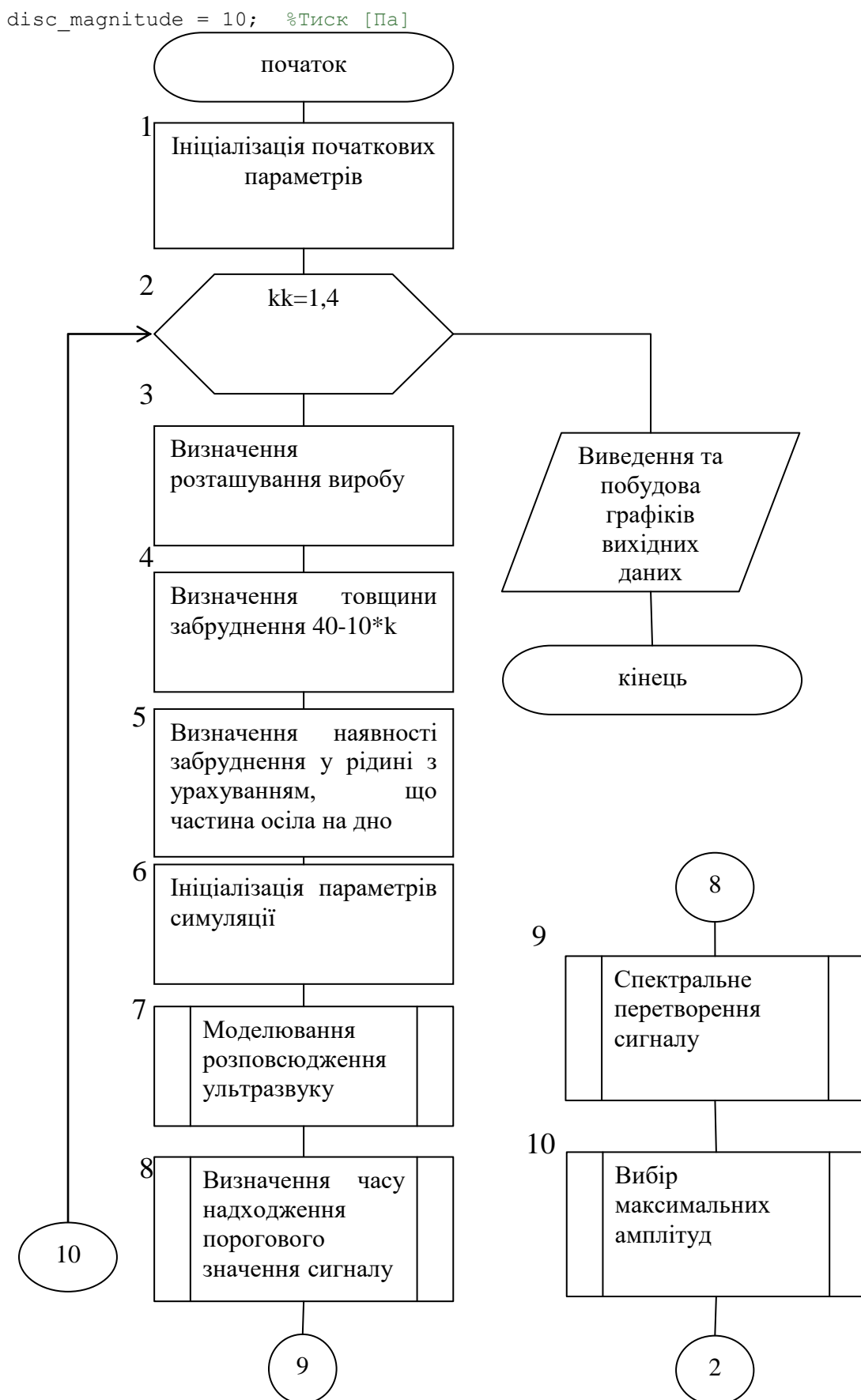


Рис. Б.1. Функціональний алгоритм моделювання очищення з обробкою за допомогою спектрального аналізу вихідних даних

```

disc_x_pos = 5; % Координата X
disc_y_pos = Ny/2; % Координата Y
disc_radius = 6; % Радіус, копірок
disc_2 = disc_magnitude * makeDisc(Nx, Ny, disc_x_pos, disc_y_pos,
disc_radius);

source.p0 = disc_2;
display_mask = source.p_mask;

% визначення сенсора
sensor.mask = zeros(Nx, Ny);
sensor.mask( 5,Ny/2) = 1;

input_args = {'PMLAlpha', 7, 'DisplayMask', display_mask, 'PMLSize',
10, 'PlotLayout', true, 'PlotPML', true};
% очищення змінної з результатами симуляції
clear sensor_data1;
% запуск симуляції
sensor_data1 = kspaceFirstOrder2D(kgrid, medium, source, sensor,
input_args{:});
%масштабування часу
[t, t_sc, t_prefix] = scaleSI(kgrid.t_array(:));

%визначення часу надходження граничного сигналу
if (kk==1)
star=length(sensor_data1)/2;
end

rr=start1(sensor_data1,star);
if (kk==1)
star=rr;
end
rr_all(kk)=rr;
x1(kk,:)=sensor_data1 (rr:rr+100);
%вибір сигналу для перетворення Фур'є;
z=sensor_data1 (rr:rr+100);

% % Спектальний вигляд сигналу
FftL=2^nextpow2(100);

Fd=FftL/2;
FftS(kk,:)=abs(fft(z,FftL)); % Амплітуди перетворення Фур'є
FftS(kk,:)=2*FftS(kk,:)./FftL; % Нормування спектру за амплітудою
[px(kk,1,:),px(kk,2,:)] = spectral_analyze(FftS(kk,1:10)); % Вибір
максимальних амплітуд
end

%візуалізація даних
figure

%графік початкового сигналу

for kk=1:4

subplot(4,1,kk)
plot(t_sc * kgrid.t_array(rr:rr+100),x1(kk,:));

end
%графік перетворення Фур'є

```

```

figure
for kk=1:4
F=0:Fd/FftL:Fd/2-1/FftL
subplot(4,1,kk);
plot(F,FftS(kk,1:length(F)));
end
%графік найбільших значень амплітуд для різної товщини забруднення

```

```
ff=['+' 'X' 'o' '*' 'h' '*'];
```

```

figure
for kk=1:4
for d=1:3
l(d)=px(kk,1,d)
end
plot(1:3,1,ff(kk),'LineWidth',5);
hold on
end
legend('d=60','d=40','d=20','d=0');
hold off
px

```

В результаті отримано значення спектрального розкладу сигналів для різного ступеня забрудненості виробу та рідини (рис. Б.2 та рис. Б.3).

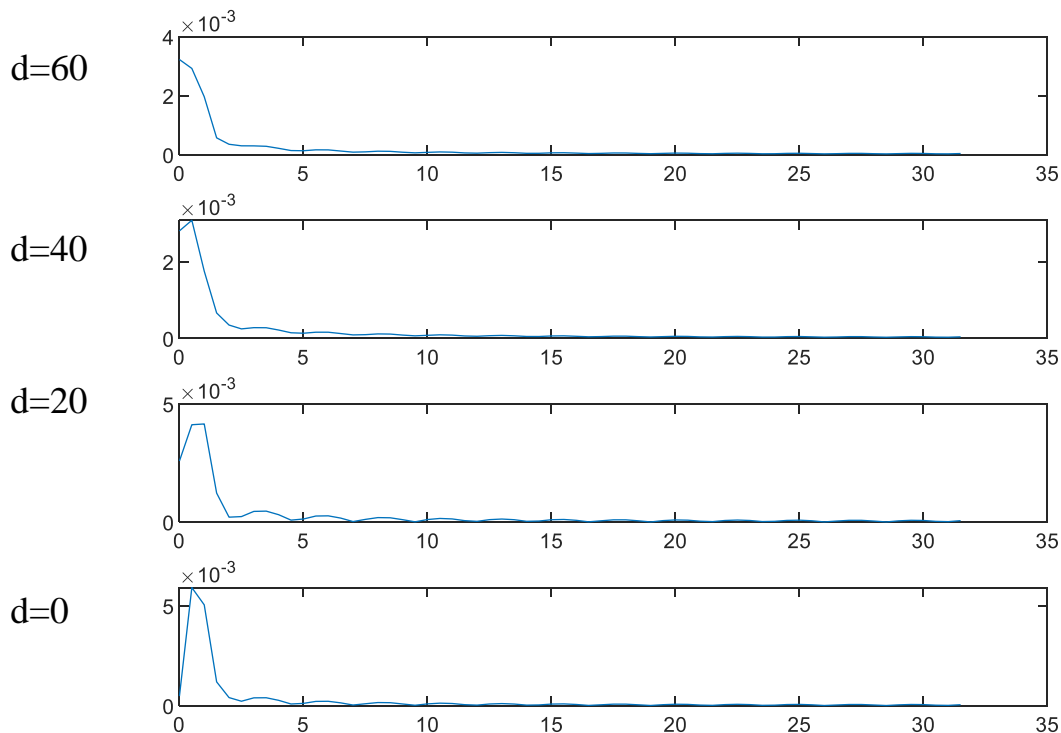


Рис. Б.2. Розклад в спектр сигналів при різному ступені забрудненості виробу та низькому ступені забрудненості рідини (<10 %), де d – товщина забруднення, комірок

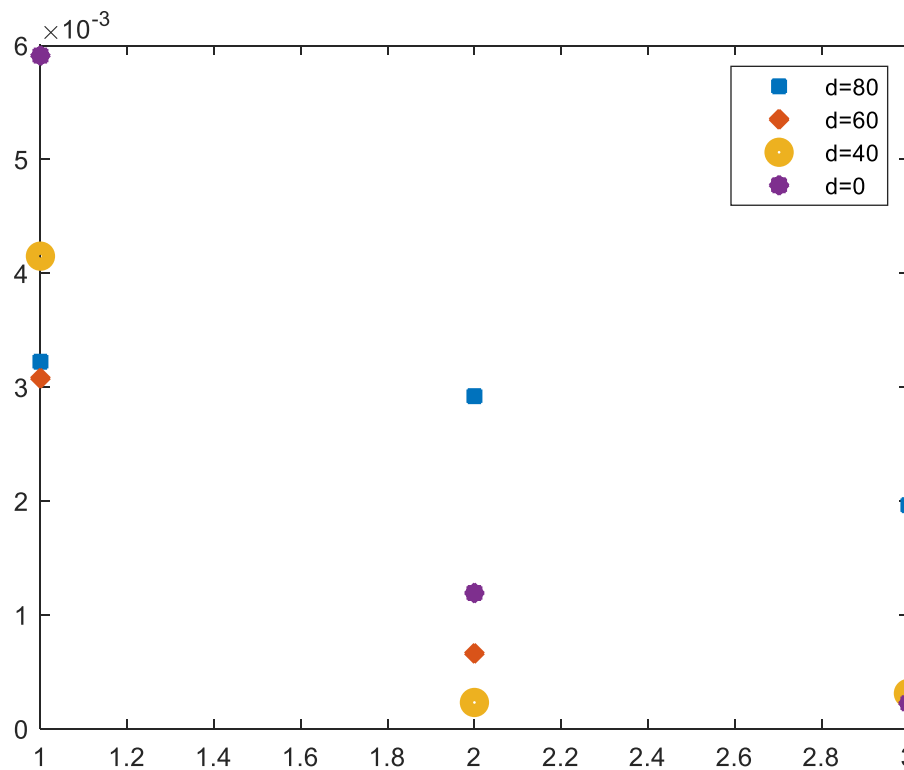


Рис. Б.3. Найбільші три гармоніки при різному ступені забрудненості виробу та низькому ступені забрудненості рідини (<10 %), де d – товщина забруднення, комірок сітки

Для виробів більш складної конфігурації (підрозділ 2.5) змінювався лише опис очищеного виробу, все інші операції залишалися подібними до алгоритму, що наведено на рис. Б.1. Результатом моделювання стало знаходження значень для коефіцієнтів нелінійності першого та другого порядку, що наведено в основній частині роботи.

Додаток В

Програма симуляції керування із використанням тривимірного нечіткого інтервального контролера

Функціональний алгоритм симуляції очищення наведено на рис. В.1. Спектральний аналіз виконується за допомогою вбудованого в MatLab швидкого перетворення Фур'є – FFT (блок 12 на рис. В.1.) Реалізація блоків 13 (функція користувача signal) та 14 (функція користувача fazzification) наведена на рис.В.2 та рис В.3.

Лістинг програми до підрозділу 4.3.

```
clearvars;

% =====
% Моделювання
% =====

% створення сітки експерименту

Nx = 216; % кількість комірок сітки у X-напрямку
Ny = 216; % кількість комірок сітки у Y-напрямку
dx = 50e-3; % розмір комірки у X-напрямку, м
dy = dx; % розмір комірки у Y-напрямку, м
kgrid = kWaveGrid(Nx, dx, Ny, dy); % створення сітки

% визначення очищувальної рідини

medium.sound_speed = 1500 * ones(Nx, Ny); %швидкість розповсюдження
ультразвуку [м/с]
medium.density = 1000 * ones(Nx, Ny); % густина [кг/м^3]

% визначення очищуваного виробу
for i=1:Nx
    for j=1:Ny

        if (((i-Nx/2)^2)^(1/3)+((j-Ny/2)^2)^(1/3)<50^(2/3))
            medium.density(i,j) = 7800; % густина [кг/м^3]
            medium.sound_speed(i,j) = 5100; %швидкість розповсюдження ультразвуку
[м/с]
        end
    end
end

% визначення забруднення
for i=Nx/2+5:Nx
    for j=Ny/2:Ny

        if (((i-Nx/2)^2)^(1/3)+((j-Ny/2)^2)^(1/3)<70^(2/3)) && ((i-
Nx/2)^2)^(1/3)+((j-Ny/2)^2)^(1/3)>=50^(2/3)
            medium.density(i,j) = 3100; % [кг/м^3]
            medium.sound_speed(i,j) = 2500; % [m/s]
        end
    end
end
```


end

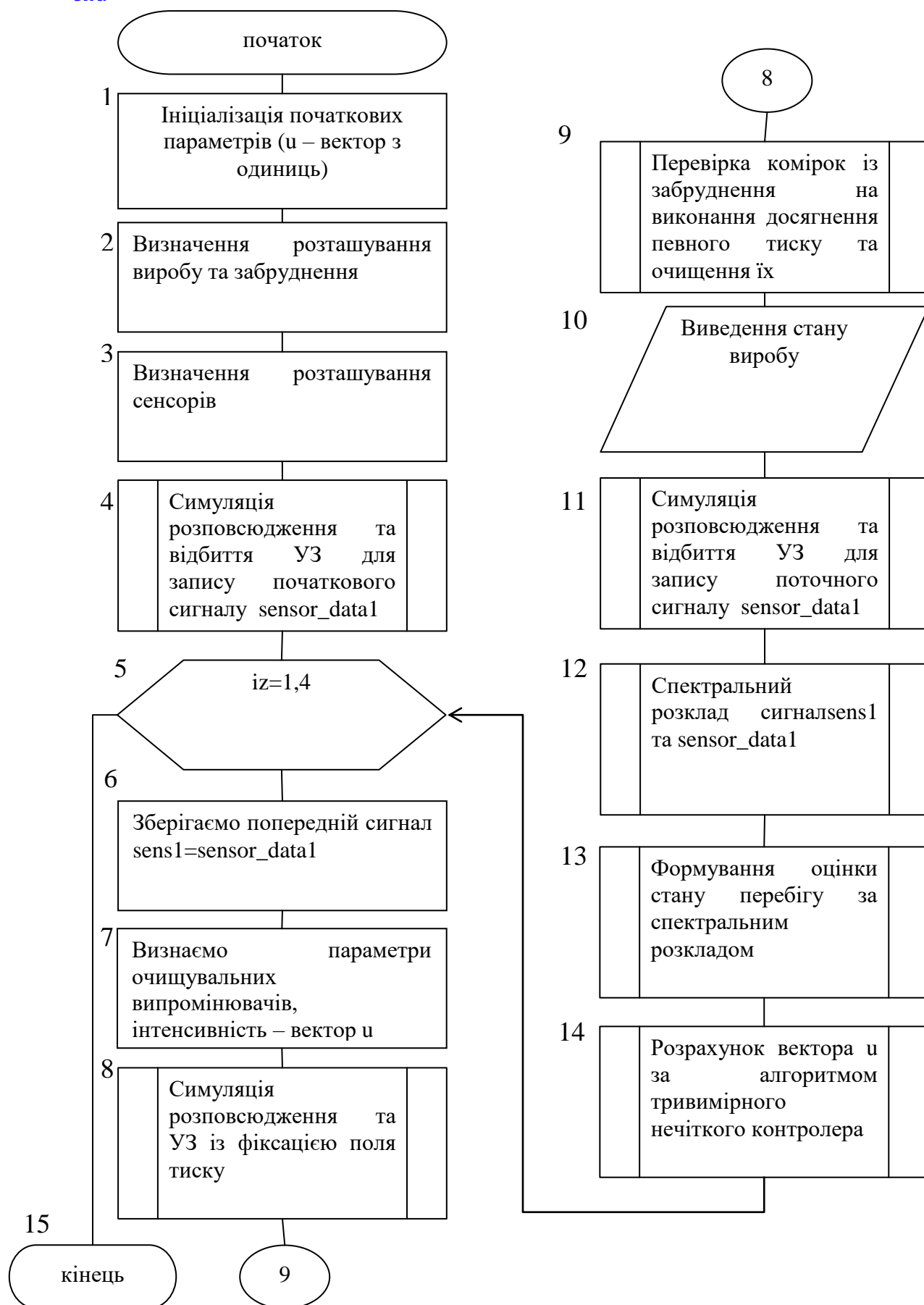


Рис. В.1. Функціональний алгоритм очищення на базі ТНІТ2 контролера

```

% створення часового масиву
t_end = 3e-6;
kgrid.makeTime(medium.sound_speed);

% ініціалізація початкового поля тиску
source.p_mask = zeros(Nx, Ny);
% ініціалізація значень інтенсивності
u=[1 1 1 1];

%перший випромінювач для сенсора
disc_magnitude = 1; %Тиск [Па]
disc_x_pos = Nx/2; % Координата X
disc_y_pos = 8; % Координата Y
disc_radius = 1; % Радіус, комірок
disc_2 = disc_magnitude * makeDisc(Nx, Ny, disc_x_pos, disc_y_pos,
disc_radius);

%другий випромінювач для сенсора
disc_magnitude = 1; %Тиск [Па]
disc_x_pos = Nx/2; % Координата X
disc_y_pos = 208; % Координата Y
disc_radius = 1; % Радіус, комірок
disc_3 = disc_magnitude * makeDisc(Nx, Ny, disc_x_pos, disc_y_pos,
disc_radius);

%третій випромінювач для сенсора
disc_magnitude = 1; %Тиск [Па]
disc_x_pos = 8; % Координата X
disc_y_pos = Ny/2; % Координата Y
disc_radius = 1; % Радіус, комірок
disc_4 = disc_magnitude * makeDisc(Nx, Ny, disc_x_pos, disc_y_pos,
disc_radius);

%четвертий випромінювач для сенсора
disc_magnitude = 1; %Тиск [Па]
disc_x_pos = 208; % Координата X
disc_y_pos = Ny/2; % Координата Y
disc_radius = 1; % Радіус, комірок
disc_5 = disc_magnitude * makeDisc(Nx, Ny, disc_x_pos, disc_y_pos,
disc_radius);
disc_sensor=disc_2+disc_3+disc_4+disc_5;

%визначення сенсорів
sensor.mask = zeros(Nx, Ny);
sensor.mask(Nx/2, 8) = 1;
sensor.mask(Nx/2, 208) = 1;
sensor.mask(208, Ny/2) = 1;
sensor.mask(8, Ny/2) = 1;
source.p0 =disc_sensor;
display_mask = source.p_mask;

%визначення параметрів симуляції
input_args = {'PMLAlpha', 7e3, 'DisplayMask', display_mask, 'PMLSize',
5, 'PlotLayout', true, 'PlotPML', false};

% запуск симуляції
sensor_data1 = kspaceFirstOrder2D(kgrid, medium, source, sensor,
input_args{:});

% запуск симуляції
for iz=1:4

```

```

iz
% зберігаємо попередні показники сенсора
sens1=sensor_data1;

% визначаємо основні очищувальні випромінювачі
disc_magnitude = 5*u(1); %Тиск [Па]
disc_x_pos = 40; % Координата X
disc_y_pos = 40; % Координата Y
disc_radius =3 ; % Радіус, комірок
disc_1 = disc_magnitude * makeDisc(Nx, Ny, disc_x_pos, disc_y_pos,
disc_radius);

disc_magnitude = 5*u(2); %Тиск [Па]
disc_x_pos = 176; % Координата X
disc_y_pos = 40; % Координата Y
disc_radius =3 ; % Радіус, комірок
disc_2 = disc_magnitude * makeDisc(Nx, Ny, disc_x_pos, disc_y_pos,
disc_radius);

disc_magnitude = 5*u(4); %Тиск [Па]
disc_x_pos = 40; % Координата X
disc_y_pos = 176; % Координата Y
disc_radius =3 ; % Радіус, комірок
disc_3 = disc_magnitude * makeDisc(Nx, Ny, disc_x_pos, disc_y_pos,
disc_radius);

disc_magnitude = 5*u(3); %Тиск [Па]
disc_x_pos = 176; % Координата X
disc_y_pos = 176; % Координата Y
disc_radius =3 ; % Радіус, комірок
disc_4 = disc_magnitude * makeDisc(Nx, Ny, disc_x_pos, disc_y_pos,
disc_radius);
%об'єднуємо випромінювачі та задаємо як початковий акустичний тиск
disc=disc_1+disc_2+disc_3+disc_4;
source.p0 =disc;

% створюємо шаблон для розповсюдження акустичного тиску
clear display_mask;
display_mask = source.p_mask;

% визначаємо комірки, в яких знімаються значення тиску
sensor.mask = [1, 1, Nx, Ny].';
sensor.record = {'p_min', 'p_max'};
% визначаємо параметри симуляції
input_args = {'PMLAlpha', 7e3, 'DisplayMask', display_mask, 'PMLSize',
5, 'PlotLayout', true, 'PlotPML', false};
% запуск симуляції-очищення
clear sensor_data;
sensor_data = kspaceFirstOrder2D(kgrid, medium, source, sensor,
input_args{:});

% комірки, в яких досягнуто певного значення тиску, вважаємо очищеними
for i=Nx/2+5:Nx
for j=Ny/2:Ny

if (((i-Nx/2)^2)^(1/3)+((j-Ny/2)^2)^(1/3)<70^(2/3)) && ((i-
Nx/2)^2)^(1/3)+((j-Ny/2)^2)^(1/3)>=50^(2/3))

if abs(sensor_data.p_min(i,j))>0.5 || abs(sensor_data.p_max(i,j))>0.5
medium.density(i,j) = 1000;
medium.sound_speed(i,j) = 1500;
end

```

```

end
end
end

% ЗАПУСКАЄМО СИМУЛЯЦІЮ ДЛЯ ОТРИМАННЯ СИГНАЛУ ПІСЛЯ ОЧИЩЕННЯ
source.p0 = disc_sensor;
clear display_mask;
display_mask = source.p_mask;
% assign the input options
input_args = {'PMLAlpha', 7e3, 'DisplayMask', display_mask, 'PMLSize',
5, 'PlotLayout', true, 'PlotPML', false};
clear sensor;
sensor1.mask = zeros(Nx, Ny);
sensor1.mask(Nx/2, 8) = 1;
sensor1.mask(Nx/2, 208) = 1;
sensor1.mask(208, Ny/2) = 1;
sensor1.mask(8, Ny/2) = 1;
sensor_data1 = kspaceFirstOrder2D(kgrid, medium, source, sensor1,
input_args{:});

% спектральний аналіз сигналу та формування вхідних параметрів
for kk=1:4

[sx1(kk), sx2(kk)]=signal(sensor_data1(kk,:), pp(kk));

end
iz
sx1
sx2

[px1, px2]=normal(px1, px2); % нормування вхідного сигналу
zd=[0 0.25 0.5 0.75 ]; % розташування сенсорів за відносними кутовими
координатами
z0=[0.125 0.375 0.625 0.875]; % розташування випромінювачів за відносними
кутовими координатами
u=fazzification(length(px1), px1, px2, zd, z0); % розрахунок інтенсивностей
випромінювачів за алгоритмом тривимірного нечіткого контролера
u=(u-min(u))/(max(u)-min(u)) % нормування інтенсивностей

end

```

Підпрограма формування оцінки із використанням швидкого перетворення

Фур'є

Вхідні параметри `inputArg1` – значення сигналу, `st` – стартова позиція, вихідні `rr` – час досягнення граничного значення, `del` – значення коефіцієнта нелінійності другого порядку

```

function [rr, del] = signal(inputArg1, st)
% Визначаємо час надходження граничного значення тиску
rr=start1(inputArg1, st);

% % Визначаємо сигнал для спектрального аналізу
z(:)=inputArg1 (rr:rr+100);

% %Спектральний розклад із використанням швидкого перетворення Фур'є

FftL=2^nextpow2(100);
Fd=FftL/2;
%l=abs(fft(z, FftL))
FftS(:)=abs(fft(z, FftL)); % Амплітуди перетворення Фур'є
FftS(:)=2*FftS(:)./FftL; % Нормування спектра за амплітудою

```

```
[px(1),px(2)]=spectral_analyze(FftS(1:20)); % Визначення максимальних амплітуд
del= px(2)/px(1)^2; % Обчислення нелінійного коефіцієнту другого порядку
%=====
end
```

Підпрограма розрахунку інтенсивності для кожного випромінювача за алгоритмом тривимірного нечіткого інтервального контролера

Вхідні параметри n – кількість випромінювачів, $x1$ – значення вхідного параметру 1, $x2$ – значення вхідного параметру 2, zd – розташування сенсорів, $z0$ – розташування випромінювачів. Вихідний параметр $u0$ – вектор інтенсивностей.

```
function [u0] = fuzzification(n,x1,x2,zd,z0)
% Таблиця правил
a=[-1 -1 0; -1 -0.5 0; -1 0 0; -1 0.5 0; -1 1 0;
-0.5 -1 0.5; -0.5 -0.5 0.5; -0.5 0 0; -0.5 0.5 0;-0.5 1 0;
0 -1 0.5; 0 -0.5 0; 0 0 0; 0 0.5 0; 0 1 0.5;
0.5 -1 1; 0.5 -0.5 0.5; 0.5 0 0.5; 0.5 0.5 0.5; 0.5 1 1;
1 -1 1; 1 -0.5 1; 1 0 1; 1 0.5 1; 1 1 1];

% скорочення розмірності
for i=1:n
% перевірка виконання правил
for j=1:length(x1)
for k=1:25

% інтервальна фазифікація
[mnx1,mvx1]=memberfunction(x1(j),a(k,1),zd(j),z0(i));
[mnx2,mvx2]=memberfunction(x2(j),a(k,2),zd(j),z0(i));
% пошук мінімальних значень ймовірностей

fi(i,k,j,1)= a(k,3);
fi(i,k,j,2)= min(mnx1,mnx2);
fi(i,k,j,3)= min(mvx1,mvx2);
end
end
end
fi;

% злиття правил для кожного входу
for i=1:n
% стиснення інформації із використанням алгоритму центроїда
for k=1:25
mu(i,k,1)= a(k,3);
mu(i,k,2)=0;
mu(i,k,3)=0;
ds1=0;
ds2=0;
for j=1:length(x1)-1
s1=(abs(2*abs(zd(j)-zd(j+1))-1)-1).^2+(fi(i,k,j,2)-fi(i,k,j+1,2)).^2;
s2=(abs(2*abs(zd(j)-zd(j+1))-1)-1).^2+(fi(i,k,j,3)-fi(i,k,j+1,3)).^2;
ds1=ds1+s1;
ds2=ds2+s2;
mu(i,k,2)=mu(i,k,2)+max(fi(i,k,j,2),fi(i,k,j+1,2))*s1;
mu(i,k,3)=mu(i,k,3)+max(fi(i,k,j,3),fi(i,k,j+1,3))*s2;
end
mu(i,k,2)=mu(i,k,2)/ds1;
mu(i,k,3)=mu(i,k,3)/ds2;
```

```

end
end

mu;

% акумуляція інформації - знаходимо максимум для кожного правила
b=[0 0.5 1];
for i=1:n
    % акумуляція інформації
    for l=1:3
        u(i,l,1)=b(l);
        u(i,l,2)=0;
        u(i,l,3)=0;
        for k=1:25
            if (mu(i,k,1)==u(i,l,1))
                u(i,l,2)=max(u(i,l,2),mu(i,k,2));
                u(i,l,3)=max(u(i,l,3),mu(i,k,3));
            end
        end
    end
end
end

% побудова центроїда за алгоритмом Карніка - менделя
% права границя
u;

for k=1:4
    yr=0;
    sf=0;
    for i=1:11
        [m1,m2]=outmemberfunction((i-1)*0.1,u(k,:,:));

        wr(i)=(i-1)*0.1;
        f(i)=(m1+m2)/2;

        sf=sf+f(i);
        yr=yr+f(i)*(i-1)*0.1;
    end
    yr=yr/sf;

yr1=yr;

R=fix(yr1/0.1);
for z=1:10

    yrr=0;
    srr=0;
    yrm=0;
    srm=0;

    for i=1:R
        [m1,m2]=outmemberfunction((i-1)*0.1,u(k,:,:));

        srr=srr+m1*wr(i);
        yrr=yrr+m1;
    end

    for i=R+1:10
        [m1,m2]=outmemberfunction((i-1)*0.1,u(k,:,:));
        srm=srm+m2*wr(i);
    end
end

```

```

yrm=yrm+m2;
end

yr2=(srr+srn)/(yrr+yrm);
if (yr2==yr1)
break;
else
yr1=yr2;
end

R=fix (yr1/0.1);
end

%ліва границя

y1=0;
sf=0;
for i=1:11
[m1,m2]=outmemberfunction((i-1)*0.1,u(k,,:));
wr(i)=(i-1)*0.1;
f(i)=(m1+m2)/2;
sf=sf+f(i);
yl=y1+f(i)*(i-1)*0.1;
end
yl=yl/sf;

y11=y1;

R=fix (y11/0.1);
for z=1:10

yrl=0;
srl=0;
ylm=0;
slm=0;
for i=1:R
[m1,m2]=outmemberfunction((i-1)*0.1,u(k,,:));
srl=srl+m2*wr(i);
yrl=yrl+m2;
end
for i=R+1:10
[m1,m2]=outmemberfunction((i-1)*0.1,u(k,,:));
slm=slm+m1*wr(i);
ylm=ylm+m1;
end
yl2=(srl+slm)/(yrl+ylm);
if (yl2==y11)
break;
else
y11=yl2;
end

R=fix (y11/0.1);
end

u0(k)=(yrl+y11)/2; %дефазифікація

end
end

```

Лістинг програми до підрозділу 4.4.

Моделювання процесу ультразвукового очищення із використанням тривимірнього нечіткого інтервального контролера та ультразвукової фазованої решітки

```
clearvars;

% =====
% SIMULATION
% =====
PML_Y_SIZE = 20; % [grid points] задаємо товщину ванни
PML_X_SIZE = 20;
% створюємо обчислювальну сітку
Nx = 128 - 2*PML_X_SIZE; % розмір сітки по x
Ny = 128 - 2*PML_Y_SIZE; % розмір сітки по y direction
dx = 50e-3; % розмір комірки по x
dy = dx; % розмір комірки по y
kgrid = kWaveGrid(Nx, dx, Ny, dy);
c0 = 1500; % [m/s]
rho0 = 1000; % [kg/m^3]

% параметри середовища (рідини)
medium.sound_speed = 1500 * ones(Nx, Ny); % [m/s]
medium.density = 1000 * ones(Nx, Ny); % [kg/m^3]

% параметри очищуваного обладнання
for i=1:Nx
    for j=1:Ny

        if (((i-Nx/2)^2)^(1/3)+((j-Ny/2)^2)^(1/3)<30^(2/3))
            medium.density(i,j) = 7800; % [kg/m^3]
            medium.sound_speed(i,j) = 5100; % [m/s]
        end
    end
end
% параметри забруднення
for i=Nx/2+5:Nx
    for j=Ny/2:Ny

        if (((i-Nx/2)^2)^(1/3)+((j-Ny/2)^2)^(1/3)<40^(2/3)) && ((i-
Nx/2)^2)^(1/3)+((j-Ny/2)^2)^(1/3)>=30^(2/3)
            medium.density(i,j) = 3100; % [kg/m^3]
            medium.sound_speed(i,j) = 2500; % [m/s]
        end
    end
end

% створення часового масиву
t_end = 3e-6;
kgrid.makeTime(medium.sound_speed*2);

% ініціалізація масиву сенсорів
source.p_mask = zeros(Nx, Ny);

u=[1 1 1 1];

%для оцінки стану
```



```

disc_magnitude = 1; % [Pa]
disc_x_pos = Nx/2; % [grid points]
disc_y_pos = 8; % [grid points]
disc_radius = 1; % [grid points]
disc_2 = disc_magnitude * makeDisc(Nx, Ny, disc_x_pos, disc_y_pos, disc_radius);

disc_magnitude = 1; % [Pa]
disc_x_pos = Nx/2; % [grid points]
disc_y_pos = 80; % [grid points]
disc_radius = 1; % [grid points]
disc_3 = disc_magnitude * makeDisc(Nx, Ny, disc_x_pos, disc_y_pos, disc_radius);

disc_magnitude = 1; % [Pa]
disc_x_pos = 8; % [grid points]
disc_y_pos = Ny/2; % [grid points]
disc_radius = 1; % [grid points]
disc_4 = disc_magnitude * makeDisc(Nx, Ny, disc_x_pos, disc_y_pos, disc_radius);

disc_magnitude = 1; % [Pa]
disc_x_pos = 80; % [grid points]
disc_y_pos = Ny/2; % [grid points]
disc_radius = 1; % [grid points]
disc_5 = disc_magnitude * makeDisc(Nx, Ny, disc_x_pos, disc_y_pos, disc_radius);
disc_sensor = disc_2 + disc_3 + disc_4 + disc_5;

%первинна оцінка стану
source.p0 = disc_sensor;
display_mask = source.p_mask;
input_args = {'PMLAlpha', 7e3, 'DisplayMask', display_mask, 'PMLSize',
5, 'PlotLayout', true, 'PlotPML', false};
sensor.mask = zeros(Nx, Ny);
sensor.mask(Nx/2, 8) = 1;
sensor.mask(Nx/2, 80) = 1;
sensor.mask(8, Ny/2) = 1;
sensor.mask(8, Ny/2) = 1;

% оцінювання стану до першого циклу очищення
sensor_data1 = kspaceFirstOrder2D(kgrid, medium, source, sensor, input_args{:});

% запуск 4 циклів очищення
for kk=1:4
    star(kk) = length(sensor_data1(kk, :))/2;
    [sx1(kk), sx2(kk)] = signal(sensor_data1(kk, :), star(kk));
    pp(kk) = star(kk);
end

for iz=1:2
    zx1 = sx1;
    zx2 = sx2;

    %****розрахунок кутів*****
    koltrans = 4;
    angle1 = [0 0 0 0];
    angle = [-45 45 45 -45];
    %розраховуємо кути та фокус
    for num=1:4
        nump = num - 1;
        nums = num + 1;

        if (nump < 1)
            nump = koltrans;

```

```

end
if (nums>koltrans)
nums=1;
end

if (u(nump)>u(num) && u(nump)>=u(nums))
angle1(num) = u(num)/u(nump)*45;
else
if (u(nums)>u(num) && u(nums)>=u(nump))
angle1(num) = -u(num)/u(nums)*45;
end
end
end
angle1
for num=1:4
if angle(num)<0
angle1(num)=-angle1(num)
end
angle(num)=angle(num)-angle1(num)
end

% розрахунок відстаней=====
trans_x=[1 1 102 102]; %координати випромінювача
trans_y=[72 1 1 72]; %координати випромінювача
focus(1:4)=sx1(1:4)/c0
sensor_data = zeros(Nx, Ny);
result=zeros(4,88,88);
for tr=1:4
if ( u(tr)==0)
u(tr)=0.0001;
end
if (trans_x(tr)<50)

[result1,j_vec,rrr]=beam_patterns
(trans_x(tr),trans_y(tr),angle(tr),focus(tr),u(tr)*10^6);
result(tr,:,:)= reshape(result1,[88,88]);
else
[result1,j_vec,rrr]=beam_patterns (103-
trans_x(tr),trans_y(tr),angle(tr),focus(tr),u(tr)*10^6);
result(tr,:,:)= reshape(result1,[88,88]);
result(tr,:,:)= result(tr,end:-1:1,:);
end
end

p1=reshape (result(1,:,:),[88,88]);
p2=reshape (result(2,:,:),[88,88]);
p3=reshape (result(3,:,:),[88,88]);
p4=reshape (result(4,:,:),[88,88]);
pu=result(1,:,:)+result(2,:,:)+result(3,:,:)+result(4,:,:);
result(1,end/2:end,1:end/2)=0;
result(2,end/2:end,end/2:end)=0;
result(3,1:end/2,end/2:end)=0;
result(4,1:end/2,1:end/2)=0;

% знаходимо поле загального акустичного тиску та виводимо всі графіки
res= result(1,:,:)+result(2,:,:)+result(3,:,:)+result(4,:,:);
p=reshape (res,[88,88]);
pupu=reshape (pu,[88,88]);
figure;
imagesc(j_vec,rrr, pupu);
xlabel('y-position [mm]');
ylabel('x-position [mm]');

```

```

colormap(jet(256));
c = colorbar;
ylabel(c, 'Pressure [MPa]');
axis image;

set(gca, 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 14)
figure;
subplot(2,2,1);

imagesc(j_vec, rrr, p1 );

xlabel( 'y-position [mm]');
ylabel('x-position [mm]');
% title('Total Beam Pattern Using Maximum Of Recorded Pressure 1');
colormap(jet(256));
c = colorbar;
ylabel(c, 'Pressure [MPa]');

axis image;
set(gca, 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 14)

subplot(2,2,2);

imagesc(j_vec, rrr, p2 );
xlabel( 'y-position [mm]');
ylabel('x-position [mm]');
% title('Total Beam Pattern Using Maximum Of Recorded Pressure 2');
colormap(jet(256));
c = colorbar;
ylabel(c, 'Pressure [MPa]');

axis image;
set(gca, 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 14)

subplot(2,2,3);

imagesc(j_vec, rrr, p3 );
xlabel( 'y-position [mm]');
ylabel('x-position [mm]');
% title('Total Beam Pattern Using Maximum Of Recorded Pressure 3');
colormap(jet(256));
c = colorbar;
ylabel(c, 'Pressure [MPa]');

axis image;
set(gca, 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 14)
subplot(2,2,4);

imagesc(j_vec, rrr, p4 );
xlabel( 'y-position [mm]');
ylabel('x-position [mm]');
% title('Total Beam Pattern Using Maximum Of Recorded Pressure 4');
colormap(jet(256));
c = colorbar;
ylabel(c, 'Pressure [MPa]');

axis image;
set(gca, 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 14)

```

```

    %**фіксуємо очищення при тиску більше 0,5*****
sum=0;

for i=Nx/2+5:Nx
    for j=Ny/2:Ny

if (((i-Nx/2)^2)^(1/3)+((j-Ny/2)^2)^(1/3)<40^(2/3)) && (((i-Nx/2)^2)^(1/3)+((j-
Ny/2)^2)^(1/3)>=30^(2/3))

    sum=sum+res(1,i,j);
    if abs(p(i,j))>0.5 || abs(p(i,j))>0.5
        medium.density(i,j) = 1000; % [kg/m^3]
        medium.sound_speed(i,j) = 1500;
    end
    % [m/s]
end

    end
end

fprintf('sum=',sum);
sum

source.p0 =disc_sensor;
clear display_mask;
% create a display mask to display the transducer
display_mask = source.p_mask;

%запускаємо сенсори на повторну оцінку стану

% assign the input options
input_args = {'PMLAlpha', 7e3,'DisplayMask', display_mask,'PMLSize',
5,'PlotLayout', true, 'PlotPML', false};
clear sensor;
sensor.mask = zeros(Nx, Ny);
sensor.mask(Nx/2, 8) = 1;
sensor.mask(Nx/2, 80) = 1;
sensor.mask(80, Ny/2) = 1;
sensor.mask(8, Ny/2) = 1;

% run the simulation
sensor_data1 = kspaceFirstOrder2D(kgrid, medium, source, sensor, input_args{:});
for kk=1:4

[sx1(kk),sx2(kk)]=signal(sensor_data1(kk,:),pp(kk));

end

%отримати відповідний коефіцієнт масштабування для масиву часу
[t, t_sc, t_prefix] = scaleSI(kgrid.t_array(:));
% % значення вхідних параметрів
for i = 1:4
    kx1(i)=(-zx1(i)+sx1(i))/(sx1(i));
    kx2(i)=(-zx2(i)+sx2(i))/(sx2(i));

end

% % Моделювання роботи тривимірною нечіткого контролера

[kx1,kx2]=normal(kx1,kx2);

```

```
zd=[0.25 0 0.5 0.75 ];  
z0=[0.875 0.125 0.375 0.625];  
u=fazzification(length(kx1),kx1,kx2,zd,z0)  
u=(u-min(u))/(max(u)-min(u))  
end
```

Додаток Д

Таблиця С.1. Вхідні та вихідні параметри З – D нечіткого інтервального контролера під час дослідів

№ кроку	x_1	x_2	u	Економія, %
Дослід 1				
0	-	-	[1 1 1 1]	0
1	[0,0321 0,456 0,756 0,1210]	[0,121 0,124 0,0015 1,378]	[0 0,6115 1,0 0,2452]	53,58 %
2	[-0,0012 0,21 0,0123 0,013]	[-0,0987 0,0887 0,2421 - 0,767]	[0 0,7598 1,0 0,2730]	49,18 %
3	[0,001 0,03 0,00297 0,0070]	[0,0055 0,00055 0,0015 0,0094]	[0 0,5082 1,0 0,4641]	50,69 %
Дослід 2				
0	-	-	[1 1 1 1]	0
1	[0,0012 0 0,0613 0,0603]	[0,5265 0,0051 -0,4215 - 0,5848]	[0 0,7875 1,0000 0,2252]	49,68 %
2	[0,0004 0 0,0383 0,0383]	[0,0470 0,0021 0,3881 0,7836]	[0 0,4774 1,0000 0,5131]	50,24 %
3	[0 0,001 0,0023 0]	[-0,0004 0,0029 0,0263 - 0,0008]	[0 0,4785 1,0000 0,5009]	50,52 %
Дослід 3				
0	-	-	[1 1 1 1]	0
1	[0,0005 0,002 0,0371 0,0360]	[0,5192 0,0031 -0,2596 - 0,2361]	[0 0,7838 1,0000 0,6749]	38,53 %
2	[0,001 0 0,0256 0,0154]	[0,0002 -0,0008 -0,0055 -0,0014]	[0 0,4910 1,0000 0,4571]	51,30 %
3	[0 0,0001 0,0023 0,001]	[-0,0004 0,0029 0,0263 - 0,0008]	[0 0,4307 1,0000 0,6509]	47,96 %
Дослід 4				
0	-	-	[1 1 1 1]	0
1	[0,0257 0,0232 0,1034 0,0738]	[0,3597 0,0208 -1,7690 0,1093]	[0 0,3864 1,0000 0,5472]	51,64 %
2	[0,0252 0 0,1021 0,0753]	[0,3678 0,0085 -0,6501 0,3043]	[0 0,2838 1,0000 0,7359]	49,51 %
3	[0 0 0 0]	[0,0030 -0,0001 -0,0243 -0,0476]	[0,0633 1,000 0,8283 0]	52,71 %
Дослід 5				
0	-	-	[1 1 1 1]	0
1	[0,0016 0,0005 0,0578 0,0567]	[0,5967 0,5005 0,0289 0,0172]	[0 0,4381 1,0000 0,5618]	50,00 %
2	[0 0 0,0052 0,0052]	[0,0006 -0,0001 -0,0069 -0,0123]	[0 0,3785 1,0000 0,6913]	48,26 %
3	[0 0 0,0005 0,0010]	[-0,0002 0,0005 -0,0319 -0,0679]	[0 0,4381 1,0000 0,2595]	57,56 %

Додаток Е



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

вул. Іоанна Павла II, 17, м. Київ, 01042; e-mail: uni@snu.edu.ua,
код ЄДРПОУ 02070714

11.08.2023 № 587/01 На № _____ від _____

ДОВІДКА

видана *Кравченко Ользі Михайлівні* про використання результатів дисертаційної роботи *«Енергоефективне керування процесами ультразвукового очищення забруднень на основі тривимірної нечіткої логіки»* в навчальному процесі Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля для студентів спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», а саме:

– залежності параметрів високоенергетичного ультразвуку при його поширенні у гетерогенному середовищі та залежності відгуків від конфігурації, щільності та віддаленості відбивача у процесі ультразвукового очищення;

– математичні моделі нелінійного просторового процесу ультразвукового очищення для виробів різної конфігурації та різного типу забруднення;

– метод оцінювання перебігу процесу ультразвукового очищення виробів складної конфігурації шляхом аналізу зміни часу досягнення граничного значення інтенсивності та визначеного на основі спектрального розкладу коефіцієнту нелінійності другого порядку віддзеркаленого від поверхні виробу зондуючого ультразвукового сигналу;

– метод керування просторово розподіленими випромінювачами ультразвуку в процесі очищення виробів на основі аналізу перебігу цього процесу на визначених ділянках їх поверхні та використанням тривимірного нечіткого інтервального контролера другого типу для формування інтенсивності впливу кожного випромінювача.

Вищезазначені матеріали використовуються в лекційних курсах, а також при проведенні практичних занять та виконанні лабораторних робіт.

Перший проректор



Дмитро МАРЧЕНКО

Додаток Ж



ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи

Кравченко Ольги Михайлівни

«Енергоефективне керування процесами ультразвукового очищення забруднень на основі тривимірної нечіткої логіки»

в навчальному процесі Львівського національного університету ім. Івана Франка

м. Львів

Довідку про те, що в навчальному процесі Львівського національного університету ім. Івана Франка для студентів технічних спеціальностей використовуються результати дисертаційної роботи аспірантки Кравченко О.М. **«Енергоефективне керування процесами ультразвукового очищення забруднень на основі тривимірної нечіткої логіки»**, а саме: теоретичне обґрунтування, алгоритми, програми та технічна реалізація адаптивного просторового керування розподіленими процесами ультразвукового очищення виробів складної конфігурації на основі тривимірного нечіткого контролера із базовою інтервальною функцією приналежності.

Вищезазначені матеріали знайшли відображення в лекційних курсах, а також використовуються при проведенні практичних занять та виконанні лабораторних робіт.

Доцент кафедри прикладної математики,
к.ф.-м. наук

Віталій Кухарський

Додаток 3

ЗАТВЕРДЖУЮ
Перший проректор Криворізького
національного університету
Владислав ЧУБАРОВ

«11» квітня, 2023р.



ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи

Кравченко Ольги Михайлівни

«Енергоефективне керування процесами ультразвукового очищення забруднень на основі тривимірної нечіткої логіки» в навчальному процесі Криворізького національного університету

м. Кривий Ріг


Ми, що нижче підписались, декан факультету інформаційних технологій, канд. техн. наук, доц. Музика І.О., завідувач навчально-методичного відділу Івашура С.Л., в.о. зав. кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій кандидат техн. наук Рубан С.А., склали цю довідку про те, що в навчальному процесі Криворізького національного університету для студентів спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології і робототехніка» використовуються результати дисертаційної роботи аспірантки Кравченко О.М. «Енергоефективне керування процесами ультразвукового очищення забруднень на основі тривимірної нечіткої логіки», а саме: теоретичне обґрунтування, алгоритми, програми та технічна реалізація адаптивного просторового керування складними розподіленими процесами на основі тривимірного нечіткого контролера із базовою інтервальною функцією приналежності на прикладі ультразвукового очищення.

Вищезазначені матеріали знайшли відображення в лекційному курсі, а також використовуються при проведенні практичних занять та виконанні лабораторних робіт в дисципліні третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти: «Інтелектуальні системи керування комп'ютерно-інтегрованим виробництвом» ОНП «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Декан ФІТ

Завідувач НМВ

В.о. завідувача кафедри АКНТ



Іван МУЗИКА

Світлана ІВАШУРА

Сергій РУБАН