

СЕЛЮК ДАНИЛ

Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
e-mail: suikelt@gmail.com

ШЕВЧЕНКО ВАДИМ

Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
e-mail: v.v.shevchenko@kpi.ua

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОЧИЩЕННЯ ВИРОБІВ

Ультразвукове очищення забезпечує можливість якісно очистити деталі в технологічному процесі різних виробництв. Порівняно з іншими видами очищення воно володіє рядом переваг, зокрема високі показники якості отриманих поверхонь, менш токсичні миючі речовини, суттєве зменшення ручної праці. В роботі було розроблено автоматизовану систему для забезпечення процесу ультразвукової обробки деталей. У роботі проведено аналіз літературних джерел стосовно параметрів, які впливають на процес обробки та проаналізовано напрацювання в цій галузі. Систему реалізовано на базі мікроконтролера ESP-32. Для аналізу завершеності процесу очищення було використано два контрольовані параметри - прозорість та провідність розчину. Процес очищення вважався завершеним, якщо ці параметри припиняли змінюватися. Автори провели апаратну реалізацію розробленої системи та розроблено алгоритм її роботи. На початку роботи система проводить перевірку ванни на наявність рідини. Якщо вона відсутня датчик провідності покаже нескінченний опір. Далі система очікує 60 секунд та починає процес обробки. Якщо змінюється прозорість рідини, система запускає лічильник, значення якого змінюється, коли змінюється провідність на заданий крок. Якщо лічильник перестає змінюватись, процес зупиняється. Очищення вважається завершеним. Такий метод застосовний як для пластикових так і до металевих деталей. За результатами досліджень встановлено, що наявність мильного розчину суттєво змінює час очищення порівняно з водою, практично на 50%. Проте зміна температури в мильному розчині приводить до зміни швидкості лише на 10%. Зміна температури при використанні звичайної води суттєво впливає на час обробки і скорочує його на 30%. Аналіз результатів показав надійну та точну роботу системи в процесі очищення. В подальшому планується вдосконалити систему контролю додаванням нових вимірювальних величин для надання можливості більш ефективної оптимізації процесу очищення деталей.

Ключові слова: ультразвук, очищення, автоматизована система, кавітація, алгоритм.

SELIUK DANIL, SHEVCHENKO VADYM

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ULTRASONIC CLEANING PROCESS CONTROL SYSTEM

Ultrasonic cleaning provides the opportunity to effectively clean parts in various manufacturing processes. Compared to other cleaning methods, it has several advantages, including high quality surface finishes, less toxic cleaning agents, and significant reduction in manual labor. The work developed an automated system to ensure the ultrasonic processing of parts. The literature review was conducted regarding the parameters that affect the process and the achievements in this field were analyzed. The system is implemented on the ESP-32 microcontroller. Two controlled parameters – transparency and conductivity of the solution – were used to analyze the completion of the cleaning process. The cleaning process was considered complete when these parameters stopped changing. The authors carried out the hardware implementation of the developed system and developed its operation algorithm. At the beginning of the process, the system checks the bath for the presence of liquid. If it is absent, the conductivity sensor will show infinite resistance. The system then waits for 60 seconds and starts the processing. If the transparency of the liquid changes, the system starts a counter, the value of which changes when the conductivity changes by a set step. If the counter stops changing, the process stops. The cleaning is considered complete. This method is applicable for both plastic and metal parts. The research results showed that the presence of soapy solution significantly changes the cleaning time compared to water, almost by 50%. However, the change in temperature in the soapy solution leads to a change in speed by only 10%. The temperature change when using plain water significantly affects the processing time and reduces it by 30%. The analysis of the results showed reliable and accurate operation of the system during the cleaning process. In the future, it is planned to improve the control system by adding new measurement values to provide more efficient optimization of the parts cleaning process.

Keywords: ultrasonic, cleaning, automated system, cavitation, algorithm.

Постановка проблеми

Ультразвукове очищення забезпечує можливість якісно очистити деталі в технологічному процесі різних виробництв. Порівняно з іншими видами очищення воно володіє рядом переваг, зокрема високі показники якості отриманих поверхонь, менш токсичні миючі речовини, суттєве зменшення ручної праці [1].

Суть процесу очищення полягає в тому, що у миючий засіб, де знаходиться виріб, вносять ультразвукові коливання, які приводять до дії різних ефектів нелінійного характеру. Основним чинником є кавітація, додатковими – звукокапілярний ефект, звуковий тиск, акустичні течії, тощо [2].

В основному такий спосіб очищення дозволяє позбуватись таких домішок, як різного роду пилівки (пасти, жири, оливи, мастила), тверdotілий осад (нагар, пил, частинки металу, абразивні залишки, накип, флюси), корозійні продукти (окалина, іржа), різного роду покриття (смоли, емалі). Перед застосуванням очищення об'єкт необхідно проаналізувати в основному використовуючи три ознаки: адгезійна міцність контакту бруду до поверхні, стійкість до кавітації, характер взаємодії з миючими засобами.

Оскільки такий метод очищення є перспективним і актуальним в даній галузі проводиться велика кількість досліджень.

Аналіз останніх джерел

В численних публікаціях проводять аналіз основних напрямків досліджень в галузі ультразвукового очищення [1]. Автори описують основні залежності, якими користуються при дослідженні процесів кавітації та принципи побудови систем якісного ультразвукового очищення. Проте не розглядаються ефективні алгоритми управління таким процесом з метою підвищення його ефективності. Це обумовлено відсутністю чітких закономірностей проходження процесу ультразвукового очищення.

Метод визначення якості проходження процесу очищення з допомогою перевірки частотних індикаторів кавітації описали в роботі [3]. Було застосовано оптичну камеру для аналізу процесу виникнення кавітації. Проте для повного аналізу процесу очищення таких параметрів недостатньо.

Визначальним фактором в процесі очищення є кавітація. Вона залежить від наявності бульбашок газу в очисному розчині [4]. Автор проаналізував вплив температури та вмісту газу на інтенсивність кавітації у водопровідній воді. Стверджується що для максимального значення кавітації необхідно використовувати воду температурою нижче 20 °С. Це дозволить значно покращити процес очищення за рахунок якісного контролю не тільки кавітаційних, але і теплових параметрів процесу очищення. Також запропоновано новий підхід до методики вивчення кавітації за рахунок кількісного визначення її дози, яка була розрахована на основі кумулятивних широкосмугових акустичних шумових сигналів, що є результатом кавітаційної активності [5]. Такий підхід може бути використаний у системах керування лише як додатковий фактор.

Численні публікації присвячено дослідженню роботи пристроїв ультразвукового очищення для великих трубних об'єктів [6, 7]. Для цього було використано числову модель параметричного дослідження, яка дозволяє вибрати необхідну для очищення кількість генераторів та розрахувати параметри очищення. Процес очищення, на нашу думку, додатково можна покращити за рахунок застосування якісних алгоритмів управління.

Також у публікаціях проводять математичне та тривимірне обчислювальне моделювання впливу ультразвукової потужності, частоти та температури для прогнозування утворення мікробульбашок та теплопередачі під час ультразвукової обробки [8]. Представлено нові методи розробки ультразвукових очищувальних пристроїв для покращення самого процесу [9-11]. Використано аналіз гармонійного відгуку та обчислювальну динаміку рідин. В результаті автори провели повне моделювання на аналіз параметрів баку для забезпечення найкращої кавітації, а отже, і процесу очищення. Також в численних роботах автори досліджують акустичний тиск в процесі ультразвукового очищення [13] та вплив миючих розчинів на якість обробки [14]. Проте незважаючи на велику кількість досліджень мало уваги приділяється застосуванню ефективних алгоритмів керування процесом ультразвукового очищення, які не тільки впливають на ефективність процесу, але і на якість обробленої поверхні, особливо для пластикових деталей.

Враховуючи вище сказане можна зазначити, що створення ефективних систем ультразвукового очищення є актуальним питанням на сьогоднішній час і потребує детальних досліджень в цій галузі, оскільки всі наведені джерела розглядають лише певні аспекти процесу ультразвукового очищення. Тому не дивлячись на велику кількість досліджень питання забезпечення ефективності очищення та вплив параметрів на процес є досі відкритим.

Метою роботи є: розробити систему керування ультразвукового очищення деталей перед складанням приладів на основі ультразвукового генератора та мікроконтролера, використання якої дозволить підвищити якість продукції та продуктивність очищення.

Виклад основного матеріалу

Попередньо аналіз таких систем авторами розглядався у роботах [15]. Також детально проаналізовано реалізацію систем для управління процесом обробки деталей [16].

Для створення системи керування процесом ультразвукового очищення та її дослідження використано контролер ESP 32-63 з використанням системи датчиків для аналізу провідності миючого розчину та оптичної прозорості. Сам контролер володіє необхідним функціоналом для забезпечення процесу, та має низьку вартість порівняно з аналогами. На основі цих параметрів буде прийматися рішення про закінчення процесу очищення для різних миючих розчинів та деталей. Система ультразвукового очищення складається з контролера, миючої ванни, ультразвукового генератора, датчиків світлового потоку та провідності. Структурна схема пристрою приведена на рис. 1.

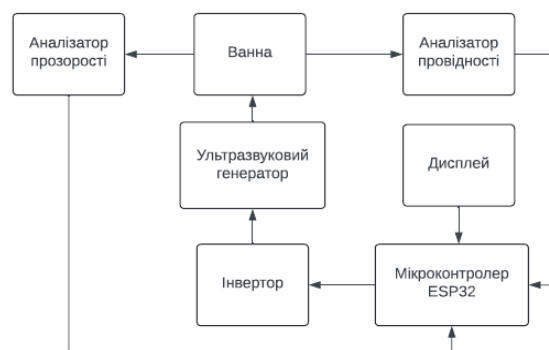


Рис. 1. Структурна схема системи керування процесом ультразвукового очищення

Для реалізації такої системи спроектовано інвертор, який регулює частоту ультразвукового генератора методом широтно-імпульсної модуляції і забезпечує процес очищення. Для аналізу закінченості процесу використано аналізатор прозорості (оптопару) та провідність рідини за допомогою дільника напруги та двох електродів.

Схема електрична принципова спроектованого пристрою приведена на рис. 2

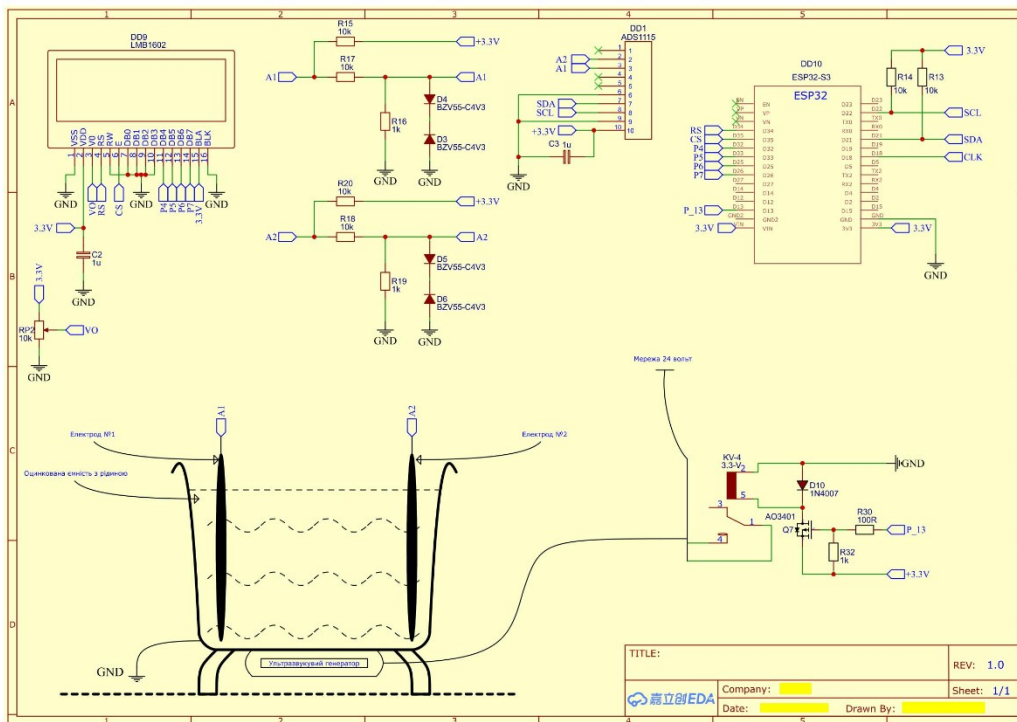


Рис 2. Схема електрична принципова спроектованого пристрою

Для роботи системи керування розроблено алгоритм за методикою статті [11]. Коли починається процес обробки розчин є прозорим та має певну провідність. З перебігом часу параметри прозорості та провідності змінюються. Обробку необхідно проводити доти, поки ці параметри змінюються в часі. Якщо зміни прозорості та провідності припиняються, можна вважати, що процес очищення завершено. Тобто система аналізу два параметри і якщо вони перестають змінюватися зупиняє ультразвукову обробку. Алгоритм розробленої системи приведено на рис. 3.

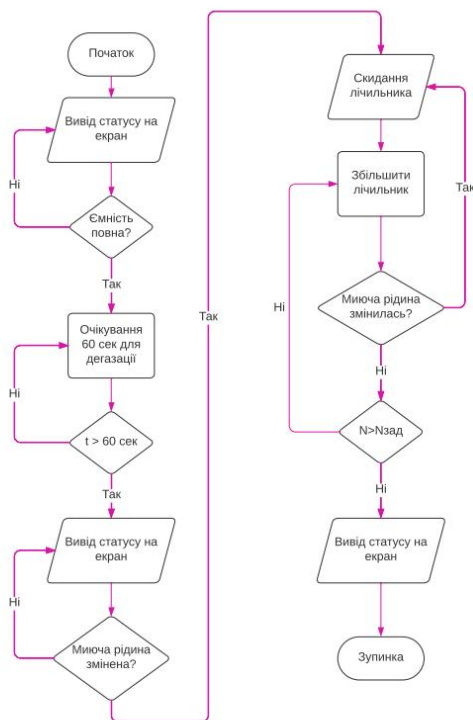


Рис 3. Алгоритм роботи системи керування

На початку роботи система проводить перевірку ванни на наявність рідини. Якщо вона відсутня давач провідності покаже нескінченний опір. Далі система очікує 60 секунд та починає процес обробки. Якщо змінюється прозорість рідини, система запускає лічильник, значення якого змінюється, коли змінюється провідність на заданий крок. Якщо лічильник перестає змінюватись, процес зупиняється. Очищення вважається завершеним. Такий метод застосовний як для пластикових так і до металевих деталей. Окрім цього контролер також проводить керування ультразвуковим генератором за допомогою інвертора, щоб забезпечити коливання заданої частоти і за допомогою налаштування індуктивно-ємнісного фільтру коливання приведені до синусоїдальної форми.

На розробленій установці проведено очищення серії однакових зразків, які занурили в мастило. Очищення проводили у воді та мильному розчині. Поточний графік зміни прозорості розчину в процесі обробки приведено на рис. 4., а провідності на рис. 5.

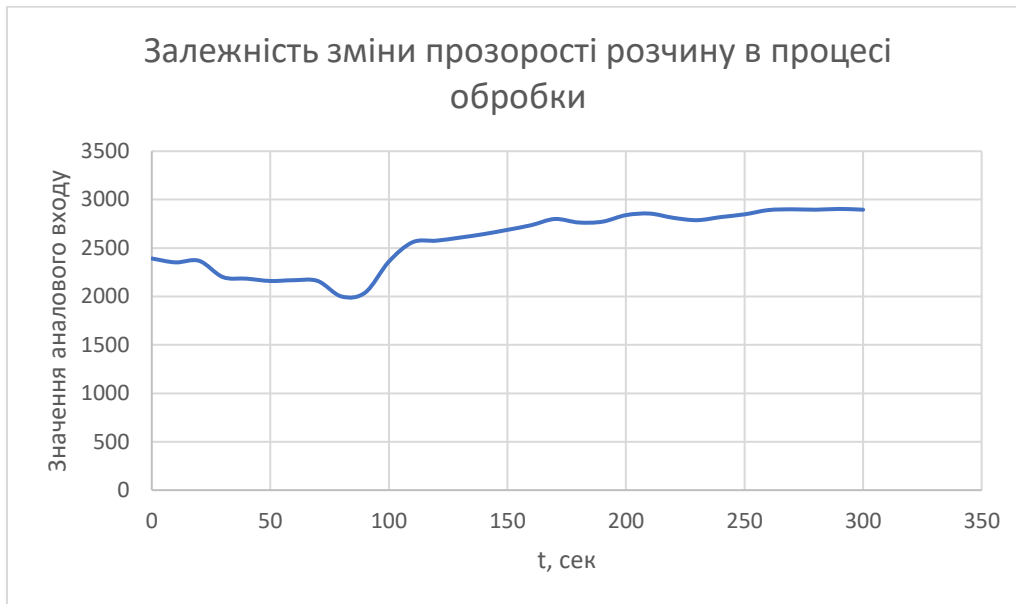


Рисунок 4. Залежність зміни прозорості розчину в процесі обробки



Рисунок 5. Залежність зміни провідності розчину в процесі обробки

Як видно з рисунків система припиняє процес очищення, коли вимірювані параметри перестають змінювати своє значення. Слід відмітити, якщо деталь має складнішу конфігурацію процес очищення також триватиме довше. Також, якщо деталь більше забруднена, або має твердіші частинки бруду, процес може тривати довше. Результати проведених досліджень для зразків приведені в таблиці 1.

Час, витрачений на обробку у воді та мильному розчині

Температура, °С	Час очищення у воді, сек	Час очищення у мильному розчині, сек
20	295	128
	288	126
	292	129
40	231	114
	232	118
	227	109

Відповідно до таблиці видно, що наявність мильного розчину суттєво змінює час очищення порівняно з водою, практично на 50%. Проте зміна температури в мильному розчині приводить до зміни швидкості лише на 10%. Зміна температури при використанні звичайної води суттєво впливає на час обробки і скорочує його на 30%.

Висновки

Розроблено систему керування процесом ультразвукового очищення деталей перед складанням приладів, на базі мікроконтролера ESP 32, що забезпечує підвищення якості очищення поверхні деталей, збільшує продуктивність та зменшує собівартість обробки. Розроблено алгоритм роботи системи, який забезпечує автоматичне припинення процесу обробки при відсутності зміни параметрів, що приводить до зменшення корозії при тривалій обробці. Для контролю процесу використано аналіз забрудненості та провідності миючого розчину на основі оптопар та електродів з подільником напруги. В подальшому планується вдосконалити систему контролю додаванням нових вимірювальних величин для надання можливості більш ефективної оптимізації процесу очищення деталей.

Література

11. Моркун В.С., Кравченко О.М. Основні напрямки вдосконалення керування процесом ультразвукового очищення // Вісник Криворізького національного університету. – 2016. – Вип. 38. – С. 77-81.
12. Matvienko S., Shevchenko V., Tereshchenko M., Kravchenko A., Ivanenko R. Determination of composition based on thermal conductivity by thermistor direct heating method // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – № 19-29. – DOI: 10.15587/1729-4061.2020.193429.
13. Saalbach K.-A., Twiefel J., Wallasche J. Self-sensing cavitation detection in ultrasound-induced acoustic cavitation // Ultrasonics. – 2019. – Vol. 94. – P. 401-410. – <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2018.06.016>.
14. Niemczewski B. Cavitation intensity of water under practical ultrasonic cleaning conditions // Ultrasonics Sonochemistry. – 2014. – Vol. 21. – № 1. – P. 354-359. – <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.07.003>.
15. Xu H., Xu J., Niu F., Yang P. Cavitation dose in an ultrasonic cleaner and its dependence on experimental parameters // Applied Acoustics. – 2016. – Vol. 101. – P. 179-184. – <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.08.020>.
16. Habiba L., Lowe S., Wrobel C., Gan T.-h. Ultrasonic Transducer Array Performance for Improved Cleaning of Pipelines in Marine and Freshwater Applications // Applied Sciences. – 2019. – Vol. 9. – P. 20-39. – <https://doi.org/10.3390/app9204353>.
17. Lowe P.S., Habiba L., Gan T.-h., Wrobel L.C. Numerical investigation of design parameters for optimization of the in-situ ultrasonic fouling removal technique for pipelines // Ultrasonics Sonochemistry. – 2019. – Vol. 56. – P. 94-104. – <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.03.027>.
18. Roohia R., Abedi E., Hashemi S.M., Marszałek K., Lorenzo J.M., Barbae J. Ultrasound-assisted bleaching: Mathematical and 3D computational fluid dynamics simulation of ultrasound parameters on microbubble formation and cavitation structures // Innovative Food Science and Emerging Technologies. – 2019. – Vol. 55. – P. 66-79. – <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.05.014>.
19. Tangsopa W., Thongsri J. Simulation of ultrasonic cleaning and ways to improve the efficiency // International Electrical Engineering Congress (iEECON). – Pattaya, Thailand. – 2017. – P. 1-4. – DOI: 10.1109/IEECON.2017.8075747.
20. Thongsri J., Tangsopa W. A Dual Frequency Ultrasonic Cleaning Tank Developed by Transient Dynamic Analysis // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11. – P. 699. – DOI: 10.3390/app11020699.
21. Tangsopa W., Thongsri J. A Novel Ultrasonic Cleaning Tank Developed by Harmonic Response Analysis and Computational Fluid Dynamics // Metals. – 2020. – Vol. 10. – P. 335. – DOI: 10.3390/app11020699.
22. Duran F. Design and implementation of an intelligent ultrasonic cleaning device // Intelligent Automation and Soft Computing. – January. – 2018. – Vol. 25. – № 3. – P. 441-450. – <https://doi.org/10.31209/2018.11006161>.
23. Lais H., Lowe P., Gan T., Wrobel L. Numerical modelling of acoustic pressure fields to optimize the ultrasonic cleaning technique for cylinders // Ultrasonics Sonochemistry. – 2018. – Vol. 45. – P. 7-16. – <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.045>.
24. Wood R., Lee J., Bussemaker M. Combined effects of flow, surface stabilisation and salt concentration in aqueous solution to control and enhance sonoluminescence // Ultrasonics Sonochemistry. – 2019. – Vol. 58. – P. 104683. – <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104683>.

25. Селюк Д.С., Шевченко В.В. Автоматизована система контролю сушіння виробів // Збірник праць XIX Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні”. – 20-21 грудня 2023 р. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2023. – С. 154-156.
26. Shevchenko V. Details Processing Control System at the Automated Manufacturing // In: Bezuglyi M., Bouraou N., Mykytenko V., Tymchuk G., Zaporozhets A. (eds) *Advanced System Development Technologies I. Studies in Systems, Decision and Control.* – Springer, Cham. – 2024. – Vol. 511. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-44347-3_10.

References

1. Morkun V.S., Kravchenko O.M. Osnovni napriamky vdoskonalennia keruvannia protsesom ultrazvukovoho ochyshchennia // *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu.* – 2016. – Vyp. 38. – S. 77-81.
2. Matvienko S., Shevchenko V., Tereshchenko M., Kravchenko A., Ivanenko R. Determination of composition based on thermal conductivity by thermistor direct heating method // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2020. – № 19-29. – DOI: 10.15587/1729-4061.2020.193429.
3. Saalbach K.-A., Twiefel J., Wallasche J. Self-sensing cavitation detection in ultrasound-induced acoustic cavitation // *Ultrasonics.* – 2019. – Vol. 94. – P. 401-410. – <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2018.06.016>.
4. Niemczewski B. Cavitation intensity of water under practical ultrasonic cleaning conditions // *Ultrasonics Sonochemistry.* – 2014. – Vol. 21. – № 1. – P. 354-359. – <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.07.003>.
5. Xu H., Xu J., Niu F., Yang P. Cavitation dose in an ultrasonic cleaner and its dependence on experimental parameters // *Applied Acoustics.* – 2016. – Vol. 101. – P. 179-184. – <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.08.020>.
6. Habiba L., Lowe S., Wrobel C., Gan T.-h. Ultrasonic Transducer Array Performance for Improved Cleaning of Pipelines in Marine and Freshwater Applications // *Applied Sciences.* – 2019. – Vol. 9. – P. 20-39. – <https://doi.org/10.3390/app9204353>.
7. Lowe P.S., Habiba L., Gan T.-h., Wrobel L.C. Numerical investigation of design parameters for optimization of the in-situ ultrasonic fouling removal technique for pipelines // *Ultrasonics Sonochemistry.* – 2019. – Vol. 56. – P. 94-104. – <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.03.027>.
8. Roohia R., Abedi E., Hashemi S.M., Marszałek K., Lorenzo J.M., Barbae J. Ultrasound-assisted bleaching: Mathematical and 3D computational fluid dynamics simulation of ultrasound parameters on microbubble formation and cavitation structures // *Innovative Food Science and Emerging Technologies.* – 2019. – Vol. 55. – P. 66-79. – <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.05.014>.
9. Tangsopa W., Thongsri J. Simulation of ultrasonic cleaning and ways to improve the efficiency // *International Electrical Engineering Congress (IEECON).* – Pattaya, Thailand. – 2017. – P. 1-4. – DOI: 10.1109/IEECON.2017.8075747.
10. Thongsri J., Tangsopa W. A Dual Frequency Ultrasonic Cleaning Tank Developed by Transient Dynamic Analysis // *Applied Sciences.* – 2021. – Vol. 11. – P. 699. – DOI: 10.3390/app11020699.
11. Tangsopa W., Thongsri J. A Novel Ultrasonic Cleaning Tank Developed by Harmonic Response Analysis and Computational Fluid Dynamics // *Metals.* – 2020. – Vol. 10. – P. 335. – DOI: 10.3390/app11020699.
12. Duran F. Design and implementation of an intelligent ultrasonic cleaning device // *Intelligent Automation and Soft Computing.* – January. – 2018. – Vol. 25. – № 3. – P. 441-450. – <https://doi.org/10.31209/2018.11006161>.
13. Lais H., Lowe P., Gan T., Wrobel L. Numerical modelling of acoustic pressure fields to optimize the ultrasonic cleaning technique for cylinders // *Ultrasonics Sonochemistry.* – 2018. – Vol. 45. – P. 7-16. – <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.045>.
14. Wood R., Lee J., Bussemaker M. Combined effects of flow, surface stabilisation and salt concentration in aqueous solution to control and enhance sonoluminescence // *Ultrasonics Sonochemistry.* – 2019. – Vol. 58. – P. 104683. – <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104683>.
15. Seliuk D.S., Shevchenko V.V. Avtomatyzovana sistema kontroliu sushinnia vyrobiv // *Zbirnyk prats XIX Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh “Efektyvnist ta avtomatyzatsiia inzhenernykh risheh u prykladobuduvanni”.* – 20-21 hrudnia 2023 r. – Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho. – 2023. – S. 154-156.
16. Shevchenko V. Details Processing Control System at the Automated Manufacturing // In: Bezuglyi M., Bouraou N., Mykytenko V., Tymchuk G., Zaporozhets A. (eds) *Advanced System Development Technologies I. Studies in Systems, Decision and Control.* – Springer, Cham. – 2024. – Vol. 511. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-44347-3_10.