УДК 681.518.5 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.6

А. О. ДЕРКАЧЕНКО
аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-0443-0329

О. В. ПОЛИВОДА
кандидат технічних наук,
доцент кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-6323-3739

# АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ВНУТРІШНІХ ПОВЕРХОНЬ ПРОМИСЛОВИХ АВТОКЛАВІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СФЕРИЧНОГО ПАРАЛЕЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ

*Стаття присвячена вирішенню актуальної проблеми підвищення ефективності та надійності діагностики внутрішніх поверхонь промислових автоклавів, які використовуються у багатьох галузях. Традиційні методи контролю часто є трудомісткими, суб'єктивними та не завжди забезпечують повне покриття, що зумовлює необхідність розробки автоматизованих систем діагностики. Метою дослідження є розробка автоматизованої системи для діагностики внутрішніх поверхонь промислових автоклавів з використанням сферичного паралельного механізму (СПМ). СПМ завдяки своїй кінематичній структурі забезпечує високу маневреність та орієнтацію діагностичного інструменту у широкому діапазоні кутів, що важливо для обстеження складних геометричних форм автоклавів. Проаналізовано існуючі методи автоматизованого сканування та планування траєкторій, зокрема методи на основі геометричних моделей та алгоритми пошуку шляху (A*, RRT). Розглянуто стратегії сканування внутрішніх поверхонь автоклавів, такі як лінійне, спіральне, кругове, зигзагоподібне та квадратне сканування, з урахуванням форми автоклава, характеристик датчика та мети діагностики. Для реалізації траєкторій сканування внутрішньої поверхні автоклава, обходу перешкод або фокусування на певних областях запропоновано застосовувати рішення зворотньої задачі кінематики для визначення потрібних положень приводів на кожному кроці руху. Наведено результати моделювання руху СПМ за типовими траєкторіями (спіраль, коло, зигзаг, квадрат). Розроблено структуру автоматизованої системи, що включає операторський інтерфейс, центральний контролер, модулі планування траєкторії та керування рухом СПМ, систему керування датчиком, блок керування приводами СПМ, систему збору та попередньої обробки даних, власне СПМ, діагностичний інструмент (датчик), систему аналізу та інтерпретації даних, а також систему збереження даних, архівування та формування звітів. Розроблена автоматизована система демонструє гнучкість та адаптивність до різних типів і розмірів промислових автоклавів та забезпечує підвищення ефективності, швидкості та об'єктивності контролю стану їх внутрішніх поверхонь. Перспективою подальших досліджень є розробка ефективних методів аналізу даних та оцінки параметрів дефектів.*

***Ключові слова:*** *автоматизована система діагностики, сферичний паралельний механізм, керування рухом, планування траєкторії, зворотня задача кінематики, промислові автоклави, стратегії сканування.*

A. O. DERKACHENKO
Postgraduate Student at the Automation, Robotics
and Mechatronics Department
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-0443-0329

O. V. POLYVODA
Candidate of Sciences in Technology,
Associate Professor at the Automation, Robotics
and Mechatronics Department
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-6323-3739

# AUTOMATED SYSTEM FOR DIAGNOSING INTERNAL SURFACES OF INDUSTRIAL AUTOCLAVES USING A SPHERICAL PARALLEL MECHANISM

*The article is devoted to the solution of the actual problem of increasing the efficiency and reliability of diagnostics of the internal surfaces of industrial autoclaves, which are used in many branches. Traditional control methods are often laborious, subjective and do not always provide complete coverage, which necessitates the development of automated diagnostic systems. The purpose of the study is to develop an automated system for diagnosing the internal surfaces of industrial autoclaves using a spherical parallel mechanism (SPM). The SPM, due to its kinematics structure, provides high maneuverability and orientation of the diagnostic tool in a wide range of angles, which is important for examining complex geometric shapes of autoclaves. Existing methods of automated scanning and trajectory planning are analyzed, in particular methods based on geometric models and path search algorithms (A*, RRT). Strategies for scanning the internal surfaces of autoclaves, such as linear, spiral, circular, zigzag and square scanning, are considered, taking into account the shape of the autoclave, sensor characteristics and diagnostic purpose. To implement trajectories for scanning the inner surface of the autoclave, avoiding obstacles or focusing on certain areas, it is proposed to use the solution of the inverse kinematics problem to determine the required positions of the drives at each step of the movement. The results of modeling the SPM movement along typical trajectories (spiral, circle, zigzag, square) are presented. The structure of an automated system has been developed, which includes an operator interface, a central controller, SPM trajectory planning and motion control modules, a sensor control system, a SPM drive control unit, a data collection and pre-processing system, the SPM itself, a diagnostic tool (sensor), a data analysis and interpretation system, as well as a data storage, archiving and report generation system. The developed automated system demonstrates flexibility and adaptability to different types and sizes of industrial autoclaves and provides increased efficiency, speed and objectivity of monitoring the condition of their inner surfaces. The prospect of further research is the development of effective methods for data analysis and evaluation of defect parameters.*

***Key words:*** *automated diagnostic system, spherical parallel mechanism, motion control, trajectory planning, inverse kinematics problem, industrial autoclaves, scanning strategies.*

## Постановка проблеми

Промислові автоклави є критично важливим обладнанням у багатьох галузях, включаючи харчову та хімічну промисловість. Забезпечення надійної та безпечної експлуатації автоклавів є важливим завданням, оскільки не виявлені вчасно пошкодження внутрішніх поверхонь автоклавів можуть призвести до суттєвих економічних втрат, зупинки виробництва та становити загрозу для життя персоналу [1]. Традиційні методи контролю стану внутрішніх поверхонь автоклавів такі як візуальний, ультразвуковий, радіографічний, магнітопорошковий, капілярний контроль та використання методу акустичної емісії [2] часто є трудомісткими, вимагають значного часу на підготовку та проведення діагностики, а також можуть бути суб'єктивними та не завжди забезпечувати повне охоплення всієї поверхні, що призводить до пропуску важливих дефектів, особливо у важкодоступних місцях. Тому розробка та впровадження автоматизованих систем діагностики внутрішніх поверхонь промислових автоклавів є особливо актуальною, оскільки це забезпечить значне підвищення ефективності, швидкості, точності та об'єктивності контролю. Перспективним напрямком у створенні таких автоматизованих систем є використання сферичних паралельних механізмів. Завдяки кінематичній структурі, СПМ забезпечують високу маневреність та можливість орієнтації пристрою або сенсору, який використовується для збору інформації про стан внутрішньої поверхні, в широкому діапазоні кутів, що є особливо важливим для дослідження поверхонь автоклавів зі складними геометричними формами.

## Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка автоматизованої системи діагностики внутрішніх поверхонь промислових автоклавів з використанням сферичного паралельного механізму для забезпечення ефективного сканування на основі впровадження сучасних методів та стратегій сканування поверхонь, застосування рішення зворотньої задачі кінематики для точного керування рухом діагностичного інструменту за траєкторіями сканування та забезпечення адаптивності системи до різних типів і розмірів автоклавів.

## Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розробка ефективних методів автоматизованого сканування внутрішньої поверхні автоклава з урахуванням складності форми є важливим завданням при реалізація систем реального часу для керування рухом приводів СПМ з метою точного позиціонування та орієнтації діагностичного інструменту у визначених точках траєкторії. Розробка алгоритмів планування траєкторії для автоматичного визначення оптимального шляху руху діагностичного інструменту всередині автоклава включає врахування складної геометрії внутрішньої поверхні, наявності перешкод, внутрішніх елементів конструкції, необхідності повного покриття досліджуваної області та мінімізації часу діагностики. Для планування траєкторії руху діагностичного інструменту, встановленого на сферичному паралельному механізмі, можуть застосовуватися методи на основі геометричних моделей та алгоритми пошуку шляху.

Методи на основі геометричних моделей [3] передбачають створення точної цифрової моделі внутрішнього простору автоклава, включаючи його геометричні характеристики та розташування можливих перешкод. На

основі таких моделей використовуються різні геометричні алгоритми для визначення шляху, вільного від перешкод. Наприклад, робочий простір розбивається на тривимірні кубічні елементи – вокселі. Вокселі позначаються як вільні або зайняті перешкодами. Планування шляху полягає у знаходженні послідовності вільних вокселів між початковою та кінцевою точками. Ще один підхід полягає в моделюванні не фізичного простору, а простору можливих конфігурацій маніпулятора, наприклад, кутів поворотних ланок. Перешкоди у фізичному просторі відображаються як заборонені області в конфігураційному просторі, в якому відбувається планування шляху. Для СПМ конфігураційний простір може бути складним через його кінематику. Методи на основі геометричних моделей дозволяють точно враховувати геометрію робочого простору і перешкод, а також можуть забезпечити оптимальні або близькі до оптимальних шляхи, залежно від використовуваного алгоритму. Проте, побудова точної геометричної моделі може бути складною, особливо для автоклавів складної форми або з невідомими внутрішніми елементами, а обчислювальна складність алгоритмів може зростати експоненційно зі збільшенням розмірності робочого простору.

Алгоритми пошуку шляху використовуються для знаходження оптимального або допустимого шляху між початковою та кінцевою точками в графі, де вузлами є можливі стани, наприклад, положення та орієнтація інструменту, а ребрами – можливі переміщення між цими станами. Прикладом таких алгоритмів є A* – евристичний алгоритм пошуку найкоротшого шляху [4], який використовує функцію оцінки

$$f(n) = g(n) + h(n), \tag{1}$$

де $g(n)$ – вартість шляху від початкової точки до поточного вузла $n$, $h(n)$– евристична оцінка вартості шляху від вузла $n$ до цільової точки. Вузлами графа можуть бути дискретизовані положення та орієнтації інструменту, а вартість ребер – відстань або час переміщення. RRT – ймовірнісний алгоритм [5], який досліджує простір конфігурацій, будуючи дерево випадкових станів, починаючи з початкової конфігурації. Нові стани генеруються випадково, після чого до дерева додається найближчий існуючий стан, якщо з’єднання з новим станом не призводить до зіткнення. Пошук шляху завершується, коли дерево досягає цільової конфігурації. Алгоритм RRT та його модифікації підходить для задач з високою розмірністю конфігураційного простору та складними перешкодами. Наведені алгоритми пошуку шляху добре опрацьовані та мають теоретичне обґрунтування, проте дискретизація робочого або конфігураційного простору може призвести до втрати точності або збільшення обчислювальної складності, ефективність алгоритму A* істотно залежить від якості евристичної функції, а RRT є ймовірнісним алгоритмом і не завжди гарантує знаходження оптимального шляху.

Вибір конкретних методів або їх комбінацій залежить від складності геометрії автоклава, наявності перешкод, вимог до повноти покриття, точності позиціонування та часу діагностики.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

Стратегія сканування визначає спосіб переміщення діагностичного інструменту по внутрішній поверхні автоклава для її повного дослідження. Вибір стратегії сканування починається з розділення внутрішньої поверхні автоклава на скінченну кількість точок або областей для проведення вимірювань або збору даних датчиком. Кількість та розташування цих точок визначають щільність сітки сканування, де щільніша сітка забезпечує детальніше покриття та вищу ймовірність виявлення дрібних дефектів, проте збільшує час сканування та обсяг даних для подальшої обробки. У деяких випадках доцільно використовувати адаптивну сітку, щільність якої змінюється залежно від попередніх даних або характеристик поверхні, збільшуючись в областях з підозрілими ознаками. Способи формування сітки залежать від форми автоклава: лінійне сканування передбачає рух інструменту паралельними лініями, що забезпечує покриття всієї поверхні, однак може бути неефективним для складних геометричних форм. Спіральне сканування полягає в русі інструменту по спіралі з наближенням до центру або віддаленням від нього, що може бути ефективним для циліндричних або сферичних поверхонь. Сканування за контуром передбачає рух інструменту вздовж заданих контурів або перерізів поверхні. Для автоклавів складної форми може знадобитися складніша параметризація поверхні та проектування для неї сітки.

Форма автоклава значною мірою визначає оптимальну траєкторію руху діагностичного інструменту. При автоматизованій діагностиці внутрішніх поверхонь найчастіше застосовується рух діагностичного інструменту по траєкторіях: спіраль, коло, зигзаг, квадрат, що обумовлюється їх оптимальними характеристиками для заданих форм автоклавів, типів датчиків та завдань діагностики. Приклади формування таких траєкторій для різних форм автоклавів та їх елементів наведено на рисунку 1.

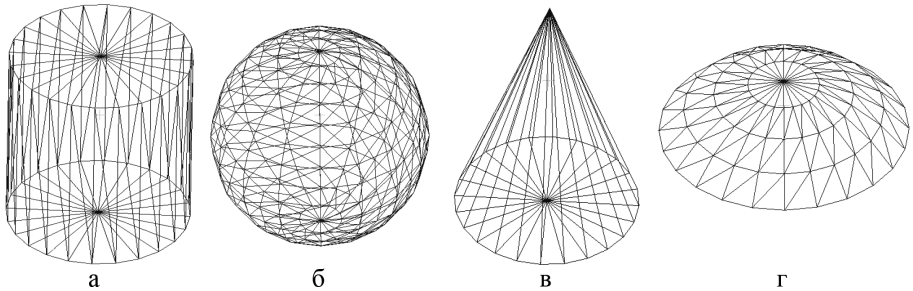
Спіральна траєкторія ефективна для обстеження поверхонь з осьовою симетрією, таких як циліндричні або конічні частини автоклавів, а також сферичні днища чи кришки, оскільки забезпечує поступове та рівномірне покриття поверхні, починаючи з центральної точки та розширюючись до краю елементу, що сканується. Такий підхід забезпечує рівномірне покриття та відносно однорідну щільність сканування по всій площі, що важливо для виявлення дефектів будь-якого розміру та розташування, а також ефективність для круглих або осьово-симетричних форм, що мінімізує холості переміщення порівняно з лінійним скануванням. Також спіральна траєкторія часто може бути реалізована як безперервний рух, що зменшує навантаження на механізм та скорочує час

сканування. Завдяки цим властивостям, спіральне сканування ідеально підходить для обстеження внутрішніх стінок циліндричних автоклавів (при комбінації руху вздовж осі з обертанням) та для сканування сферичних або злегка вигнутих поверхонь.

Кругові траєкторії застосовуються для детального обстеження локалізованих областей або для сканування поверхонь, що мають кругову симетрію в певному перерізі, таких як фланцеві з'єднання, отвори або кільцеві зварні шви. Рух по кругу може використовуватися для підтримки постійної відстані або кута між датчиком та поверхнею при обстеженні циліндричних або конічних об'єктів шляхом руху навколо їхньої осі на фіксованій висоті. Кругові траєкторії надають можливість детального обстеження локальних зон завдяки багаторазовому проходженню однієї й тієї ж області для глибшого аналізу, забезпечують спрощення підтримки постійних параметрів сканування, таких як фіксована відстань або кут між датчиком і поверхнею, що є важливим для деяких типів датчиків. Ще однією перевагою є простота програмування руху навколо циліндричних або круглих елементів конструкції.

Зигзагоподібна траєкторія – це варіант лінійного сканування, що застосовується для покриття плоских або близьких до плоских поверхонь, а також для сканування розгорток циліндричних поверхонь. Зміна напрямку руху на кінці кожної лінії забезпечує ефективне покриття всієї області без необхідності повернення до початкової точки кожної нової лінії. Сканування по зигзагоподібній траєкторії забезпечує повне покриття плоских областей при відповідній програмній реалізації послідовності лінійних рухів зі зміною напрямку. Застосовується зигзагоподібне сканування для обстеження плоских днищ або кришок автоклавів, а також циліндричних стінок, за умови можливості лінійного переміщення датчика вздовж та навколо осі циліндра.

Квадратна або прямокутна траєкторія використовується для покриття плоских або локалізованих областей при детальному скануванні невеликих ділянок з метою виявлення локальних дефектів або для калібрування датчика на певній ділянці поверхні, а також як базова комірка для складніших стратегій сканування великих площ. Перевагами такого підходу є детальне обстеження невеликих зон, систематичне покриття локальних прямокутних областей та простота програмування послідовності рухів по периметру квадрата або прямокутника із заданим кроком для локальних завдань. Застосовується для детального сканування областей навколо виявлених дефектів, зон підвищеної корозійної активності, а також для калібрувальних процедур на тестових ділянках.



а б в г

**Рис. 1. Приклади формування траєкторій сканування для різних форм автоклавів та їх елементів**

Використання сферичного паралельного механізму в структурі автоматизованої системи діагностики внутрішніх поверхонь промислових автоклавів є перспективним, що обумовлюється його високою маневреністю, здатністю орієнтувати діагностичний інструмент у широкому діапазоні кутів. Структура СПМ з кількома ступенями вільності обертального руху дозволяє ефективно досягати та сканувати важкодоступні ділянки, забезпечуючи повніше покриття поверхні порівняно з традиційними послідовними маніпуляторами, які можуть мати обмеження в орієнтації скануючого інструменту.

Застосування СПМ дозволяє реалізувати різні стратегії сканування, включаючи спіральне, кругове, лінійне або комбіновані траєкторії, адаптовані до конкретної форми автоклава та вимог до обстеження. Можливість точного програмування рухів СПМ сприяє автоматизації процесу сканування, зменшуючи час діагностики та вплив людського фактора, підвищуючи тим самим ефективність та об'єктивність контролю стану внутрішньої поверхні автоклавів.

Сферичний паралельний механізм складається з рухомої платформи, до якої кріпиться інструмент, та трьох пар послідовно з'єднаних ланок. Кожна пара з'єднується з платформою через шарніри C, C2, C3 (верхні ланки) та з обертальними шестернями A, A2, A3 (нижні ланки) через шарніри B, B2, B3. Обертання шестерень A, A2, A3, що є вхідними параметрами керування, визначає рух платформи. В [6] наведено детальний опис структури СПМ з позиціонуючою платформою та відповідна тривимірна кінематична модель.

Для сферичного паралельного механізму зв'язок між кутами приводів та положенням рухомої платформи є складним і описується нелінійними тригонометричними рівняннями. Не існує простих аналітичних виразів, які б дозволили визначити значення кутів приводів безпосередньо із заданих координат та орієнтації платформи.

Рішення зворотної задачі кінематики дозволяє визначити необхідні кути приводів (обертання шестерень A, A2, A3) для досягнення заданої позиції та орієнтації рухомої платформи і закріпленого на ній інструменту.

Для визначення обмежень руху шарнірів B, B2, B3 сферичного паралельного механізму вздовж вертикальної осі z, використовуються радіуси $R_0$, $R_1$, $R_3$, які визначають максимально можливу відстань проєкцій шарнірів B, B2, B3 від осі z обумовлену фізичними обмеженнями конструкції механізму. Радіуси $R_0$, $R_1$, $R_3$ є статичними параметрами, які розраховуються одноразово на основі початкової конфігурації механізму за виразами:

$$R_0 = \sqrt{R_C^2 - z_0^2}, \quad R_2 = \sqrt{R_C^2 - z_2^2}, \quad R_3 = \sqrt{R_C^2 - z_3^2}, \tag{2}$$

де $R_C$ – довжина ланки між шарнірами C і B, C2 і B2, C3 і B3, $z_0$, $z_2$, $z_3$– положення шарнірів C, C2, C3.

Для розрахунку кута повороту θ шестерні A необхідно визначити положення шарніра B вздовж осі $z$ або проєкцію на вісь $x$ – $B_X$ та проєкцію на вісь $y$ – $B_Y$ за формулами:

$$B_X = \frac{x_0^2(x_0^2 + R_1^2 - R_0^2 + y_0^2) - \sqrt{F} \cdot y_0}{2x_0(x_0^2 + y_0^2)}, \quad B_Y = \frac{y_0}{2} + \frac{R_1^2 y_0 - R_0^2 y_0 + \sqrt{F}}{2(x_0^2 + y_0^2)}, \tag{3}$$

де $R_1$ – довжина ланки між шарніром B і шестернею A, $x_0$ – положення шарніра C вздовж осі $x$, $y_0$ – положення шарніра C вздовж осі $y$,

$$F = -R_1^4 x_0^2 - x_0^6 - y_0^4 x_0^2 - 2x_0^4 y_0^2 + 2x_0^4 R_2^2 - x_0^2 R_2^4 + 2x_0^4 R_1^2 + 2x_0^2 y_0^2 R_2^2 + 2x_0^2 y_0^2 R_1^2 + 2x_0^2 R_1^2 R_2^2. \tag{4}$$

Для визначення положення шарнірів B2 та B3 застосовуються аналогічні (3) формули:

$$B_{2X} = \frac{x_2^2(x_2^2 + R_1^2 - R_2^2 + y_2^2) - \sqrt{F} \cdot y_2}{2x_2(x_2^2 + y_2^2)}, \quad B_{2Y} = \frac{y_2}{2} + \frac{R_1^2 y_2 - R_2^2 y_2 + \sqrt{F}}{2(x_2^2 + y_2^2)}, \tag{5}$$

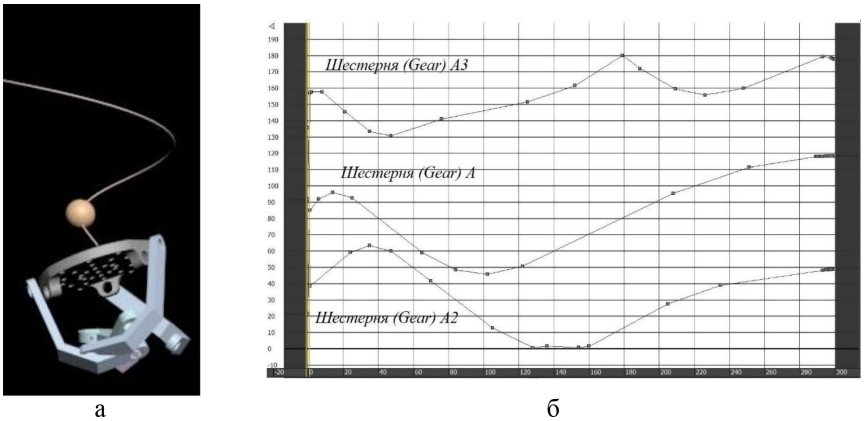
$$B_{3X} = \frac{x_3^2(x_3^2 + R_1^2 - R_3^2 + y_3^2) - \sqrt{F} \cdot y_3}{2x_3(x_3^2 + y_3^2)}, \quad B_{3Y} = \frac{y_3}{2} + \frac{R_1^2 y_3 - R_3^2 y_3 + \sqrt{F}}{2(x_3^2 + y_3^2)}. \tag{6}$$

де $x_2(x_3)$ – положення шарніра C2 (C3) вздовж осі $x$, $y_2(y_3)$ – положення шарніра C2 (C3) вздовж осі $y$.

$$\theta = \frac{180}{\pi}\arccos\left(\frac{B_X}{R_1}\right), \quad \theta_2 = \frac{180}{\pi}\arccos\left(\frac{B_{2X}}{R_1}\right), \quad \theta_3 = \frac{180}{\pi}\arccos\left(\frac{B_{3X}}{R_1}\right). \tag{7}$$

Формули (7) є результатом повного розрахунку зворотної кінематики і дозволяють обчислити повні кути повороту θ, $\theta_2$, $\theta_3$ для кожної з шестерень A, A2, A3. Кути θ, $\theta_2$, $\theta_3$ вказують на абсолютне положення кожної шестерні відносно умовної нульової точки, яка співпадає з нульовим кутом відповідного сервопривода. Значення кутів θ, $\theta_2$, $\theta_3$ є командами керування для сервоприводів, що приводять в рух СПМ.

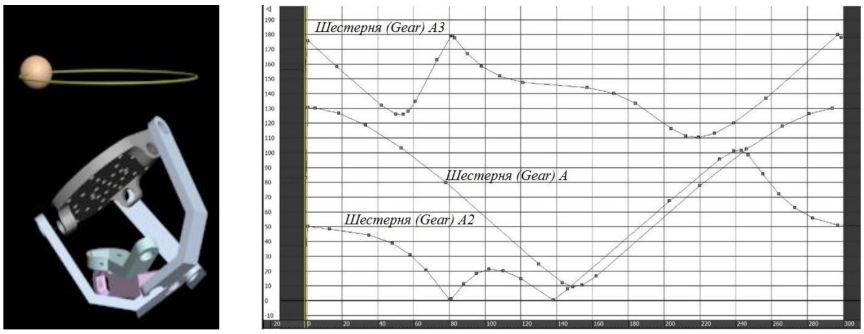
На рисунках 2–5 наведені закони переміщення для сферичного паралельного механізму, отримані при проведені розрахункового експерименту, який проводився для типових траєкторій: спіраль (рисунок 2), коло (рисунок 3), зигзаг (рисунок 4), квадрат (рисунок 5).




а б

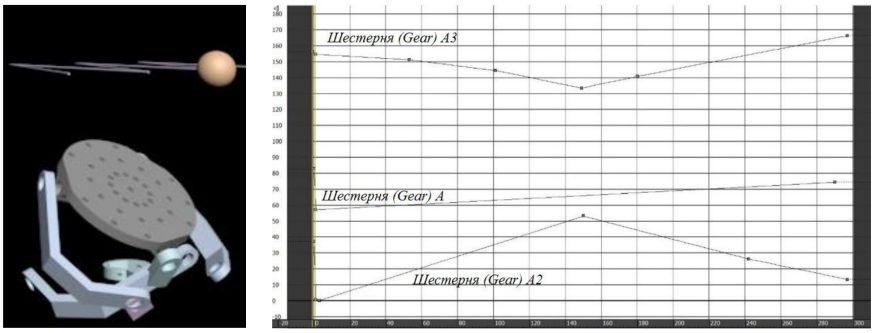
**Рис. 2. Моделювання процесу переміщення цілі по траєкторії спіраль: а) скріншот перспективи з ціллю при русі по траєкторії спіраль; б) експериментальні закономірності переміщення**

На основі проведених досліджень розроблена автоматизована система сканування внутрішньої поверхні автоклавів (рисунок 6), що ґрунтується на ефективних методах сканування, які враховують складність форми та можливі перешкоди, а також на розв'язанні зворотної задачі кінематики для керування сферичним паралельним



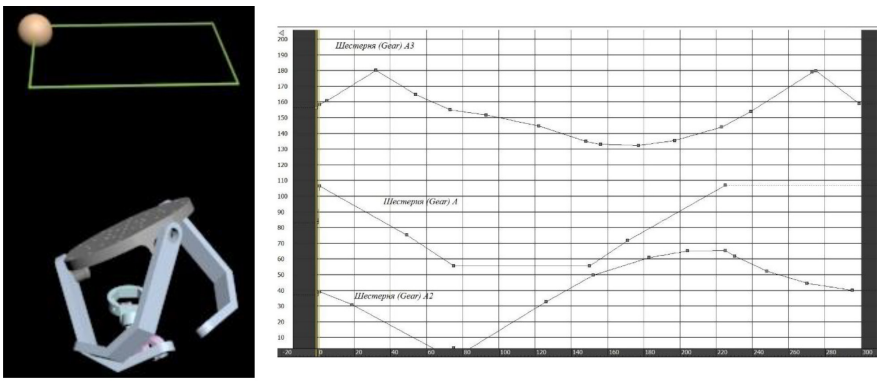

а б

**Рис. 3. Моделювання процесу переміщення цілі по траєкторії коло: а) скріншот перспективи з ціллю при русі по траєкторії коло; б) експериментальні закономірності переміщення**




а б

**Рис. 4. Моделювання процесу переміщення цілі по траєкторії зігзаг: а) скріншот перспективи з ціллю при русі по траєкторії зігзаг; б) експериментальні закономірності переміщення**




а б

**Рис. 5. Моделювання процесу переміщення цілі по траєкторії квадрат: а) скріншот перспективи з ціллю при русі по траєкторії квадрат; б) експериментальні закономірності переміщення**

механізмом, що забезпечує рух діагностичного інструменту по базових траєкторіях, завдяки чому система демонструє гнучкість та можливість адаптації до різних типів і розмірів промислових автоклавів.

Автоматизована система сканування поверхні автоклаву зі сферичним паралельним механізмом функціонує під керуванням операторського інтерфейсу (HMI), який забезпечує введення параметрів сканування, відображення процесу, візуалізацію результатів та генерацію звітів. Центральний контролер здійснює загальне керування системою, координує роботу всіх компонентів та зберігає конфігураційні дані. Керування рухом діагностичного інструменту забезпечується модулем планування траєкторії, який обирає стратегію сканування, генерує точки траєкторії та оптимізує рух, а також модулем керування рухом СПМ, що вирішує задачу зворотньої кінематики, здійснює інтерполяцію руху та керує приводами. Робота діагностичного датчика, у якості якого може застосовуватися візуальна камера, ультразвуковий або лазерний сканер, контролюється окремим модулем керування датчиком, яка налаштовує параметри, запускає та зупиняє збір первинних даних. Приведення в рух СПМ, що складається з механічної платформи, приводів, ланок та шарнірів, здійснює блок керування приводами СПМ.

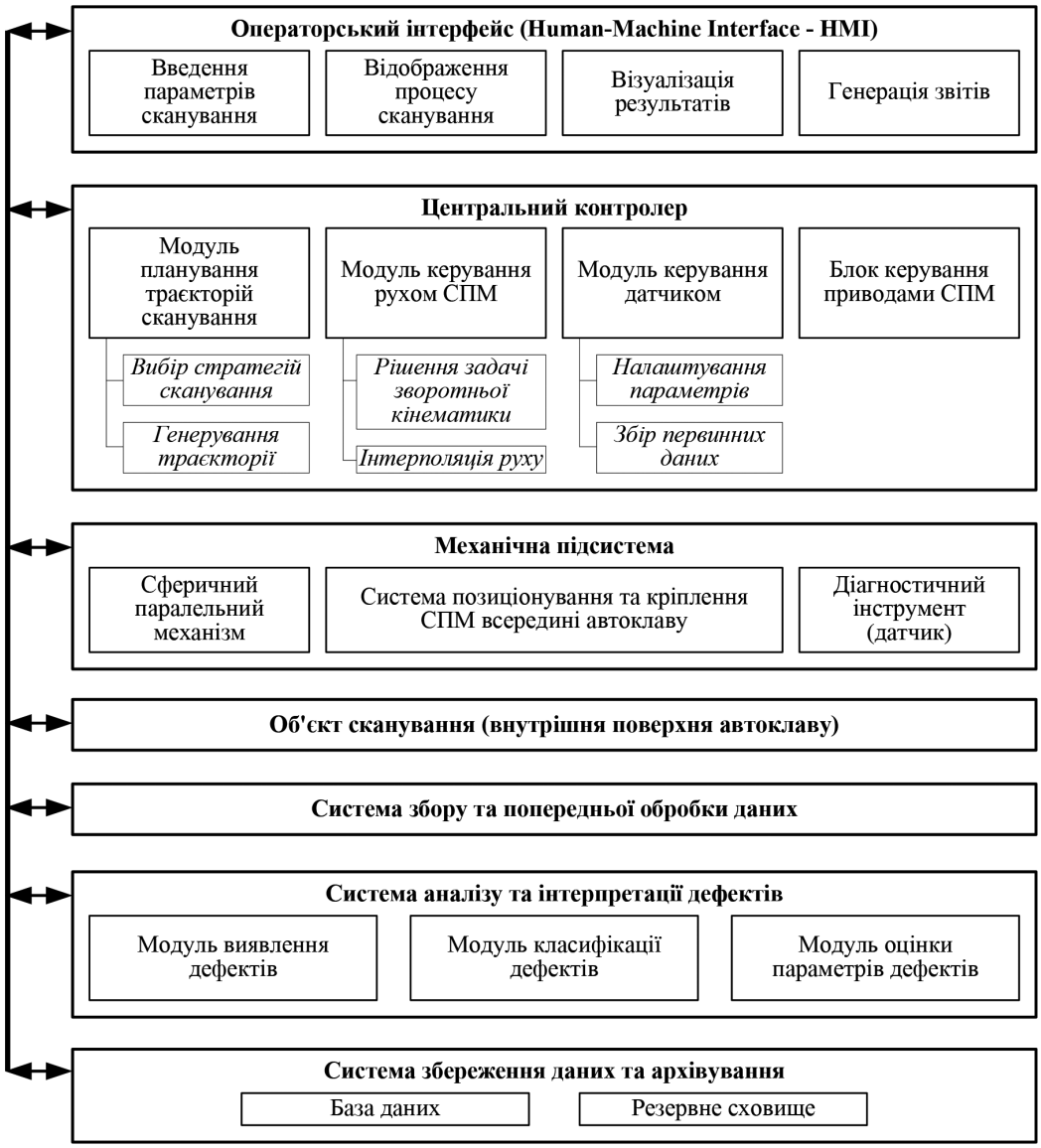



**Рис. 6. Структура автоматизованої системи діагностики поверхонь автоклавів з використанням сферичного паралельного механізму**

Отримані від датчика первинні дані надходять до системи збору та попередньої обробки даних, де відбувається фільтрація, калібрування та сегментація. Подальший аналіз та інтерпретація даних здійснюється для виявлення дефектів, їх класифікації та оцінки параметрів. На завершальному етапі система збереження даних та архівування забезпечує постійне та довгострокове зберігання сирих, оброблених і проаналізованих даних сканування, а також надає інструменти для пошуку, перегляду та експорту даних для подальшого аналізу та звітності про результати сканування внутрішньої поверхні автоклаву, яка є об’єктом дослідження.

## Висновки

Проведене дослідження підтвердило перспективність використання сферичного паралельного механізму в структурі автоматизованої системи діагностики внутрішніх поверхонь промислових автоклавів завдяки його високій маневреності та здатності орієнтувати діагностичний інструмент у широкому діапазоні кутів, що є важливим для сканування складних геометричних форм. Геометрія внутрішньої поверхні є визначальним фактором при виборі стратегії сканування. Мета діагностики (виявлення загальних дефектів, пошук конкретних типів дефектів, оцінка розмірів пошкоджень) визначає необхідну щільність сканування та складність траєкторії. У складних сценаріях діагностики може використовуватися комбінація розглянутих базових траєкторій або їх адаптація в режимі реального часу на основі даних, що надходять від датчика. При інтеграції СПМ в автоматизовані системи діагностики рухи СПМ повинні бути запрограмовані заздалегідь або генеруватися в режимі реального часу на основі даних від сенсорів. Для реалізації траєкторій сканування внутрішньої поверхні автоклава, обходу перешкод або фокусування на певних областях, необхідно постійно розраховувати зворотню задачу кінематики для визначення

потрібних положень приводів на кожному кроці руху. Розроблена автоматизована система діагностики з використанням СПМ демонструє гнучкість та можливість адаптації до різних типів і розмірів автоклавів. Перспективою подальших досліджень є розробка ефективних методів аналізу даних і оцінки параметрів дефектів для діагностики стану внутрішніх поверхонь промислових автоклавів.

**Список використаної літератури**

1. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження технічного регламенту обладнання, що працює під тиском»: прийнята 16 січня 2019 р. № 27. *Офіційний вісник України*. 2019. № 9. С. 90.
2. Поливода О. В. Лебеденко Ю. О. Ідентифікація систем автоматичного управління акустико-емісійною діагностикою. *Методи та прилади контролю якості*. 2020. № 1(44). С. 35–45. doi: 10.31471/1993-9981-2020-1(44)-35-45.
3. LaValle Steven M. Planning Algorithms. Cambridge University Press, 2006. 1007 p.
4. Russell S J., Norvig P. Artificial intelligence a modern approach. Boston: Pearson, 2018. 1166 p.
5. Palmieri L., Koenig S., Arras Kai O. RRT-Based Nonholonomic Motion Planning Using Any-Angle Path Biasing. *Robotics and Automation (ICRA) 2016 Proceedings of the IEEE International Conference*. 2016. pp 2775–2781. doi:10.1109/ICRA.2016.7487439
6. Lebedenko Y., Polyvoda O., Derkachenko A., Modlo Y., Demishonkova S., Pylypenko Y. Research of Control Systems for Robotic Spatial Planning Platforms. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine. 2022. pp. 1–4. doi: 10.1109/MEES58014.2022.10005765

**References**

1. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy “Pro zatverdzhennia tekhnichnoho rehlamentu obladnannia, shcho pratsiuie pid tyskom”: pryiniata 16 sichnia 2019 r. № 27. *Ofitsiinyi visnyk Ukrainy*. (2019). № 9. S.90.
2. Polyvoda O. V. Lebedenko Yu. O. (2020). Identyfikatsiia system avtomatychnoho upravlinnia akustyko-emisiinoiu diahnostykoiu. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*. № 1(44). S. 35–45. doi: 10.31471/1993-9981-2020-1(44)-35-45
3. LaValle Steven M. (2006) Planning Algorithms. Cambridge University Press. 1007 p.
4. Russell S J., Norvig P. (2018). Artificial intelligence a modern approach. Boston: Pearson. 1166 p.
5. Palmieri L., Koenig S., Arras Kai O. (2016). RRT-Based Nonholonomic Motion Planning Using Any-Angle Path Biasing. *Robotics and Automation (ICRA) 2016 Proceedings of the IEEE International Conference*. pp 2775–2781. doi: 10.1109/ICRA.2016.7487439
6. Lebedenko Y., Polyvoda O., Derkachenko A., Modlo Y., Demishonkova S., Pylypenko Y. (2022). Research of Control Systems for Robotic Spatial Planning Platforms. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine. pp. 1–4. doi: 10.1109/MEES58014.2022.10005765