

DOI: 10.31319/2519-2884.43.2023.13

УДК 62-4

Аніщенко М.В.¹, к.т.н., професор, ORCID: 0000-0002-2720-3671,
e-mail: Mykola.Anishchenko@kphi.edu.ua

Зибенков Д.О.², інженер АСУ ТП, e-mail: dimazybenkov@gmail.com

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків

²ТОВ ВБР-КОМ, м. Харків

Anishchenko Mykola¹, Candidate of technical sciences, Professor of the Department of Automated Electromechanical Systems

Zybenkov Dmytro², engineer

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv

²VBR-COMLLC, Kharkiv

РОБОТИЗОВАНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ОСЕРЕДОК УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ

У роботі представлені етапи розробки роботизованого технологічного осередку ультразвукової дефектоскопії якості зварювання виробів та результати експериментального дослідження і моделювання. Виконаний вибір необхідного обладнання. Технічне забезпечення осередку складають ультразвуковий дефектоскоп, промисловий робот, робочий стіл, індуктивні датчики, світлові бар'єри та система керування. Розроблено програмне забезпечення для реалізації алгоритмів керування. Підтверджено працездатність та ефективність розроблених алгоритмів і програм керування. За рахунок визначення оптимальних значень швидкостей переміщення та обертання ланок робота при їх одночасному русі підвищена швидкодія та продуктивність роботи осередку.

Ключові слова: роботизований технологічний осередок; промисловий робот; система керування; програмований логічний контролер; алгоритм керування; виконавча програма; моделювання.

The paper presents the stages of development of a robotic technological center for ultrasonic flaw detection of the quality of welding products and the results of experimental research and simulation. The selection of the necessary equipment has been made. The technical support of the cell consists of an ultrasonic flaw detector, an industrial robot, a work table, inductive sensors, light barriers and a control system. Software for implementing control algorithms was developed. The efficiency and effectiveness of the developed algorithms and control programs were confirmed. By determining the optimal values of the speeds of movement and rotation of the links during their simultaneous movement, the speed and productivity of the cell were increased.

Keywords: robotic technological cell; industrial robot; control system; programmable logic controller; control algorithm; executive program; simulation.

Постановка проблеми

Невід'ємною частиною виробничого процесу є технічний контроль, тобто перевірка відповідності продукції технічним вимогам. Технічний контроль виконується ручним, автоматизованим, або автоматичним способом. За впливом на можливість подальшого використання продукції технічний контроль поділяється на руйнівний та неруйнівний [1].

Ультразвукова дефектоскопія це найбільш універсальний спосіб неруйнівного контролю для виявлення дефектів в металевих і неметалевих матеріалах. Для ультразвукової дефектоскопії використовують проникаючу здатність пружних хвиль ультразвукового частотного діапазону. Для ідентифікації дефектів вимірюють наступні параметри: координати місця знаходження дефекту; амплітуду луно-сигналу від дефекту, яка пропорційна розміру дефекту; умовну протяжність зони дефекту; умовну висоту дефекту; кількість дефектів на одиницю довжини вимірювання; умовну найменшу відстань між дефектами [2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Використання промислових роботів для автоматизації технологічних процесів при виконанні ними як основних, так і допоміжних операцій, набуває значного поширення [3, 4].

Формулювання мети дослідження

У роботі ставиться завдання розробки роботизованого технологічного осередку ультразвукової дефектоскопії зварюваних виробів. Завдання включає вибір необхідного обладнання, розробку алгоритму роботи системи керування та написання програм керування та збору інформації. Крім власне ідентифікації наявності браку виробу система керування на основі персонального комп'ютера повинна забезпечити заходи безпеки під час виконання діагностики [5].

Виклад основного матеріалу

Ультразвукові хвилі можуть випромінюватися і поширюватися у безперервному режимі, у вигляді коротких імпульсів та у вигляді коливань різної тривалості і шпаруватості. Найчастіше для пошуку дефектів використовується луно-імпульсний метод дефектоскопії, з використанням коротких імпульсів і реєстрації луно-сигналів, що віддзеркалюються від дефектів [2].

Для перевірки технологічних виробів на наявність дефектів використовується ультразвуковий дефектоскоп «ЕРОСН 650» з генератором прямокутних імпульсів та цифровим приймачем. Він забезпечує високу надійність вимірювань та простоту експлуатації, має простий інтерфейс користувача та інтерфейс USB [6].

Досліджувана деталь (рис. 1) використовується у складі плунжерного насоса. Вона виготовляється шляхом дифузійного зварювання, якість якого необхідно перевірити. Дефектоскоп працює в масляному середовищі, тому він включений до початку руху, а його робота починається з моменту занурення в масляне середовище.

Для занурення у отвори щупа джерела випромінювання/приймача луно-сигналу використовується промисловий робот MitsubishiElectric MELFA RV-FR series. Деякі характеристики робота наведені в табл. 1 [7].

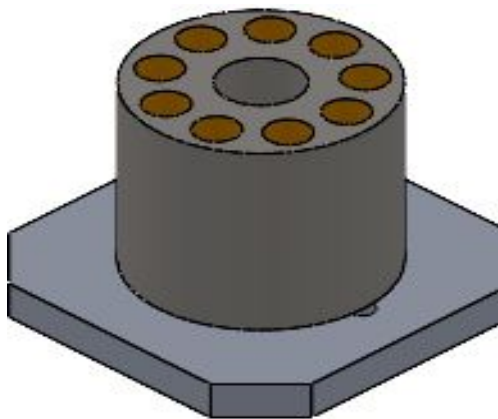


Рис. 1. Зовнішній вигляд деталі

Таблиця 1. Характеристики робота MitsubishiElectric MELFA RV-FR series

Найменування	Значення
Кількість ступенів свободи	6
Вантажопід'ємність, кг	2
Швидкість, мм/с	4955
Точність позиціонування, мм	0,02
Час циклу, с	0,6
Максимальний радіус робочої зони, мм	504

Організація роботизованого технологічного осередку (РТО) потребує використання додаткового оснащення у вигляді робочого столу (рис. 2). На робочому полі столу розмічені місця, в яких встановлюються досліджувані деталі, тобто координати центрів систем координат, що пов'язані з кожною деталлю, відомі. Для ідентифікації встановлення деталі на тій чи іншій позиції використовуються індуктивні датчики. Робот розташовується усередині стола. По периметру робочої зони для забезпечення безпечної роботи промислового робота розташовані світлові бар'єри.



Рис. 2. Розташування робота на робочому столі

Система керування РТО реалізована у вигляді крейта і включає:

- центральний процесорний пристрій для керування РТО;
- процесор керування роботом для реалізації траєкторії руху робота і зв'язку з контролером робота CR800;
- модуль зв'язку з периферійним обладнанням;
- модуль реєстрації даних для реєстрації, запису та спільного використання подій у системі керування РТК;
- модуль дискретних входів для прийому дискретних сигналів 0 або 24 В постійного струму від датчиків контактного типу, кнопок ручного керування, статусних сигналів від систем сигналізації, позиційних приводів, тощо.

Наступним етапом синтезу є розробка програмного забезпечення для реалізації алгоритмів керування РТО. Написані такі програми:

1. Програми переміщення робота для контролера робота з використанням системного пакету RT ToolBox3 мовою MELFA BASIC IV. RT ToolBox3 — середовище програмування для роботів MitsubishiElectric. Воно дозволяє створювати програми, використовуючи робототехнічні мови. Програми можна перевірити безпосередньо у середовищі моделювання. Це усуває необхідність виводити реальний виробничий осередок із технологічного процесу для тестування. У ході моделювання активна перевірка перешкод між роботом і периферійним пристроєм.

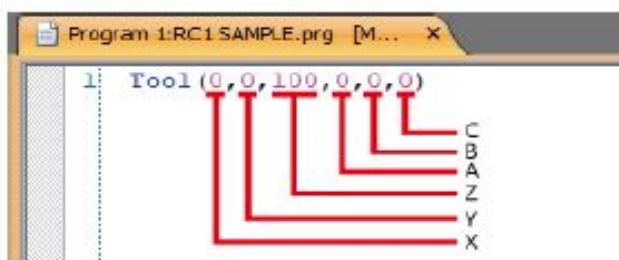


Рис. 3. Налаштування координат

Програмування контролера для керування переміщенням робота починається із оголошення змінних у програмі контролера робота. Наступним кроком розраховуємо та налаштуємо координати контрольних точок, де будуть знаходитись деталі. Координати осей X , Y і Z задаються в мм, а осей A , B і C — в градусах. Приклад налаштування зміни значення координати осі Z з 0 мм на 100 мм показаний на рис. 3.

На рис. 4 наведені розраховані координати деяких контрольних точок (центрів отворів деталей) при розміщенні деталі на робочому полі. Розташування деталей на робочому полі розраховано відповідно до координат центрів цих деталей. Для перевірки деталі, в залежності від її розташування, розраховується траєкторія руху промислового робота. Контролер робота CR800 реалізує дискретне позиційне керування.

$$\begin{aligned} P_{\text{Center}}(1) &= (-128.50, -249.70, +300.00, -180.00, +0.00, +0.00) \\ P_{\text{Center}}(2) &= (-128.70, -239.60, +300.00, -180.00, +0.00, +0.00) \\ P_{\text{Center}}(3) &= (+001.00, -279.00, +300.00, -180.00, +0.00, +0.00) \\ P_{\text{Center}}(4) &= (+001.80, -409.10, +300.00, -180.00, +0.00, +0.00) \\ P_{\text{Center}}(5) &= (+131.40, -368.65, +300.00, -180.00, +0.00, +0.00) \end{aligned}$$

Рис. 4. Координати центрів контрольних точок деталей встановлених на робочому полі

Керуюча програма являє собою послідовність чисельних значень координат на кожному кроці позиціонування приводу кожного ступеня рухливості. Відпрацювання керуючої програми полягає в одночасній подачі на всі приводи значень чергового кроку та відпрацювання приводами цього завдання. Після того, як всі приводи зупиняться, робочий орган маніпулятора займе відповідну чергову позицію у просторі та потрібну орієнтацію. Потім керуюча програма видасть команду виконання приводами наступного кроку тощо [8]. В результаті робочий орган маніпулятора переміщатиметься кроками по запланованій дискретній траєкторії, зупиняючись після кожного кроку для виконання ультразвукової дефектоскопії.

2. Виконавча програма з використанням системного пакету GXWorks3. GX Works3 — програмне забезпечення MELSOFT для програмування та обслуговування ПЛК Міцубісі. Пакет підтримує мови стандарту IEC 61131-3. Програміст може вибрати будь-яку з п'яти мов або користуватися їх комбінаціями: мова релейно-контакторних схем (Ladder — найбільш популярна), функціональних блоків (FB), мова послідовних функціональних схем (SFC), структурованого тексту (ST) та список інструкцій (IL). GX Works3 має безліч можливостей, таких як графічне конфігурування системи, вбудоване налаштування засобів позиціонування, консоль проектування системи, що дозволяє створювати проекти та програмувати контролери нового покоління MELSEC iQ-R.

Виконавча програма реалізується у програмованому логічному контролері (ПЛК) і забезпечує аналіз системою керування сигналів із дефектоскопу, системи безпеки та взаємодію із системою інтерфейсу. Контролер здійснює обробку даних, надає дозвіл для роботи системи керування.

Першим етапом реалізації виконавчої програми є об'явлення змінних, що використовуються для обробки даних контролером. Далі надається команда дозволу на дистанційну роботу промислового робота для відпрацювання керуючої програми.

Під час перевірки деталей контролер аналізує дані із дефектоскопу та надає інформацію з результатами цієї перевірки до системи інтерфейсу. Крім того ПЛК аналізує та передає до системи інтерфейсу вхідні та вихідні сигнали такі як: пауза виконання програми; робота; аварійна зупинка робота; стан світлових бар'єрів; стан перемикача режимів; готовність робота.

Як приклад на рис. 5 показаний фрагмент програми перевірки деталі у ПЛК.

3. Графічне відображення спроектованої системи та створення можливості керування за допомогою ЕОМ. Цей етап реалізовано у програмному пакеті CitectSCADA7.20. Середовище конфігурування Citect складається із чотирьох окремих програм (модулів):

- «Провідник Citect» дозволяє створювати проекти Citect та керувати ними;
- «Редактор проектів Citect» застосовується для створення баз даних та керування ними;
- «Побудовник графіки Citect» служить для створення та редагування графічних сторінок, зокрема об'єктів, що входять до складу графічних сторінок;
- «Редактор Cicode» застосовується для написання та редагування програм, написаних мовою Cicode, і є інтегрованим середовищем розробки.

Система інтерфейсу отримує дані від ПЛК та відповідає за графічне відображення інформації, щодо роботи системи керування. «Побудовник графіки Citect» дає змогу відображати деталь під час перевірки (рис. 1). Для дослідження різних типів деталей необхідно обрати тип деталі та вказати її параметри. Інтерфейс системи керування на ПК для перевірки деталей одного типорозміру має вигляд, зображений на рис. 6.

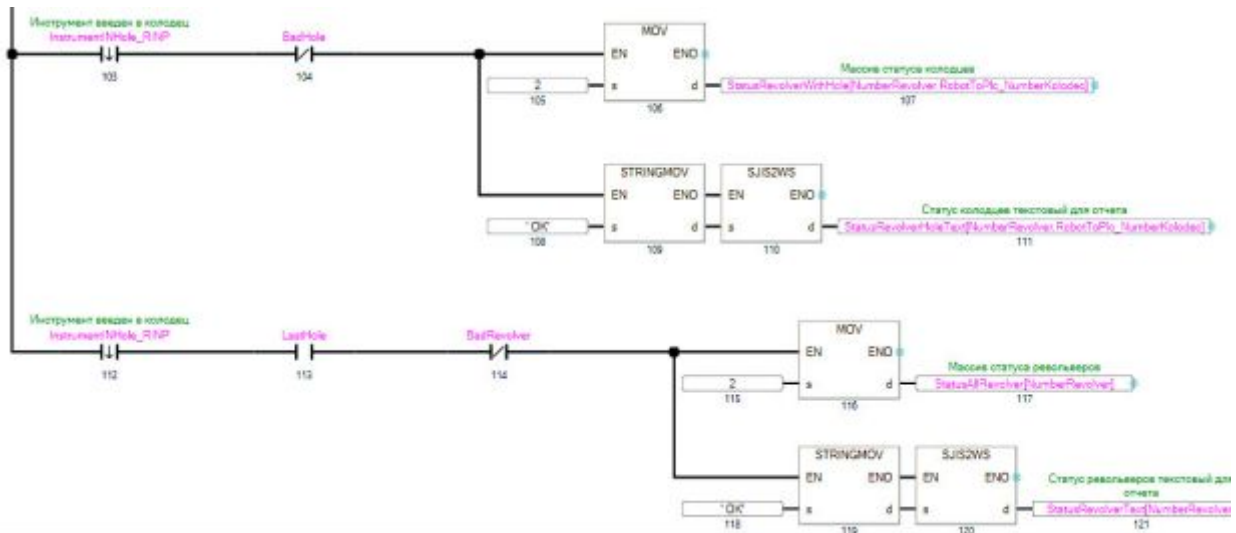


Рис. 5. Програма перевірки деталі у ПЛК

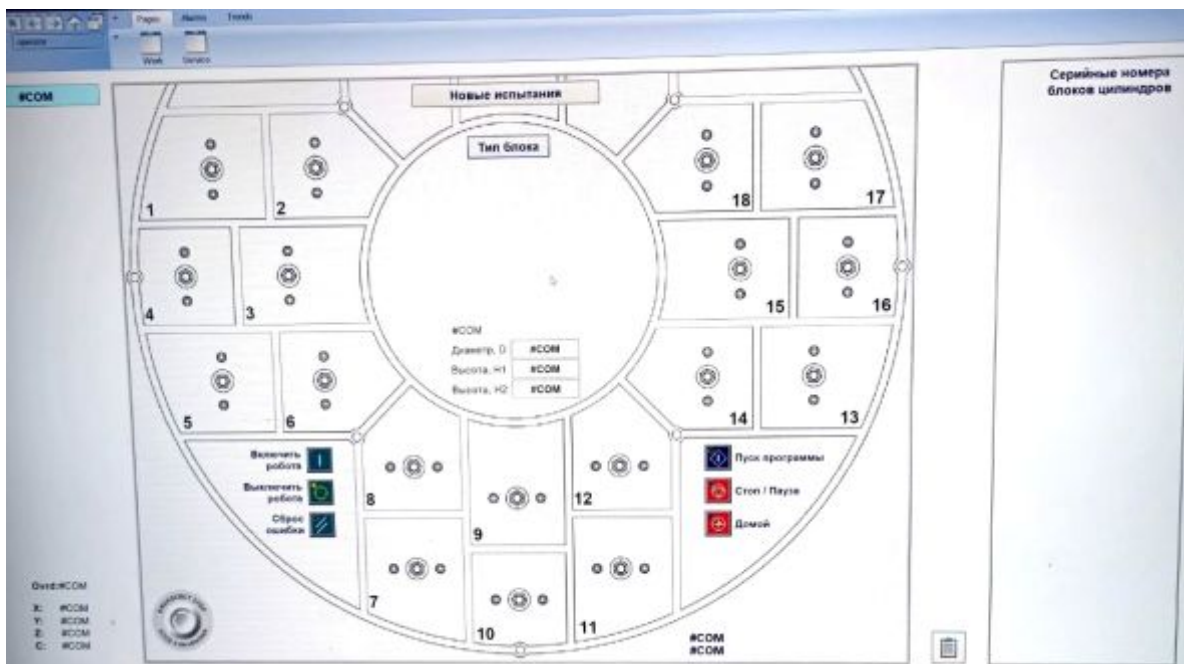


Рис. 6. Зовнішній вигляд системи інтерфейсу

Після виконання перевірки деталей система Citect SCADA формує звіт про успішність роботи. Деталь вважається бракованою при наявності хоча б одного отвору із браком. Навпроти кожного із перевірених отворів є відмітка «BAD» при виявленні браку, «OK» — якщо перевірка успішна. Приклад звіту виявленої бракованої деталі показано на рис. 7.

	Status	Serial number	Hole 1	Hole 2	Hole 3	Hole 4	Hole 5	Hole 6	Hole 7	Hole 8	Hole 9
1											
2											
3											
4	BAD	555	OK	OK	BAD	BAD	OK	BAD	OK	OK	OK
5											

Рис. 7. Звіт при виявленні бракованої деталі

Деталь вважається не бракованою у випадку, коли всі отвори деталі не мають браку. Приклад звіту для деталі без браку зображено на рис. 8.

	Status	Serial number	Hole 1	Hole 2	Hole 3	Hole 4	Hole 5	Hole 6	Hole 7	Hole 8	Hole 9
1	OK	302011	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
2	OK	302012	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
3	OK	302013	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
4	OK	302014	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
5	OK	302015	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
6	OK	302016	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
7	OK	302017	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
8	OK	302018	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Рис. 8. Звіт перевірки деталі без браку

4. Моделювання траєкторії руху робота та його позиціонування за координатами робочих точок реалізовано у програмному пакеті RT ToolBox3. RT ToolBox3 — це розширення для SolidWorks. Цей пакет надає допомогу на етапах планування, програмування та тестування проекту. Перевірка «досяжності» на ранніх стадіях планування допомагає підібрати найкращі робототехнічні системи для вирішення кожного завдання. Програмне забезпечення дозволяє моделювання створених програм для роботів. При цьому виконується перевірка рухів робота та вимірювання часу робочого циклу. Такі функції моделювання також ефективні під час проведення попередніх досліджень.

Емулятор RT ToolBox3 дозволяє відстежувати переміщення робота відповідно до виконавчої програми, отримувати координати в онлайн режимі, графіки відповідно до переміщення робота. Виконавча програма побудована таким чином, що робот починає виконання програми завжди із однієї контрольної точки «PPark». Така побудова дозволяє точно контролювати всі переміщення робота, незалежно від його основного маршруту.

На рис. 9 показано, як змінюється кожна з координат траєкторії руху робота в залежності від часу. На ньому зображено переміщення робота із довільного положення на робочому полі до вихідної точки «PPark» із координатами $(-400.00, -120.00, +400.00, -180.00, +0.00, +0.00)$. Подальше переміщення відповідно до точки PCenter(1) (рис. 4).

Процес перевірки деталі відбувається шляхом послідовної перевірки кожного отвору деталі. Перевірка складається із наступних кроків: переміщення робота до центру отвору; поковий рух в глибину отвору (зменшення координати Z); сканування отвору шляхом обертання щупа дефектоскопу навколо своєї осі (обертання за віссю A). Перевірка одного із отворів показана на рис. 10.

Для виконання циклу перевірки деталей необхідно оптимізувати час обробки кожної з деталей. Експериментальним шляхом було вибрано оптимальну швидкість переміщення та обертання ланок робота при їх одночасному русі.

Перевірка деталі складається із обстеження дев'яти отворів, після чого відбувається переміщення до наступної деталі. На рис. 11 зображено відпрацьовування переміщення робота за координатами XYZ . Робот здійснює переміщення за віссю Z однаково для кожного отвору деталі. За осями X та Y значення координат змінюються таким чином, щоб інструмент (щуп) був по середині отвору, що перевіряється. Цикл перевірки деталі завершується зміною координат XY $(-128.5; -249.7)$ на XY $(0.01; -400.9)$.

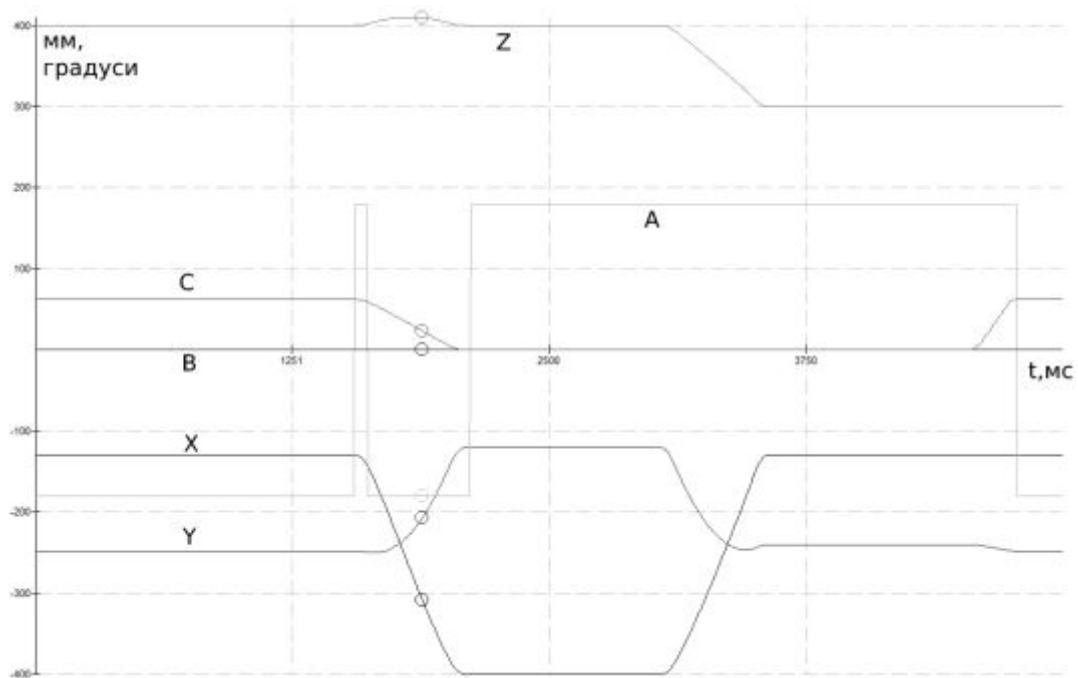


Рис. 9. Переміщення з точки «PPark» до точки PCenter(1)

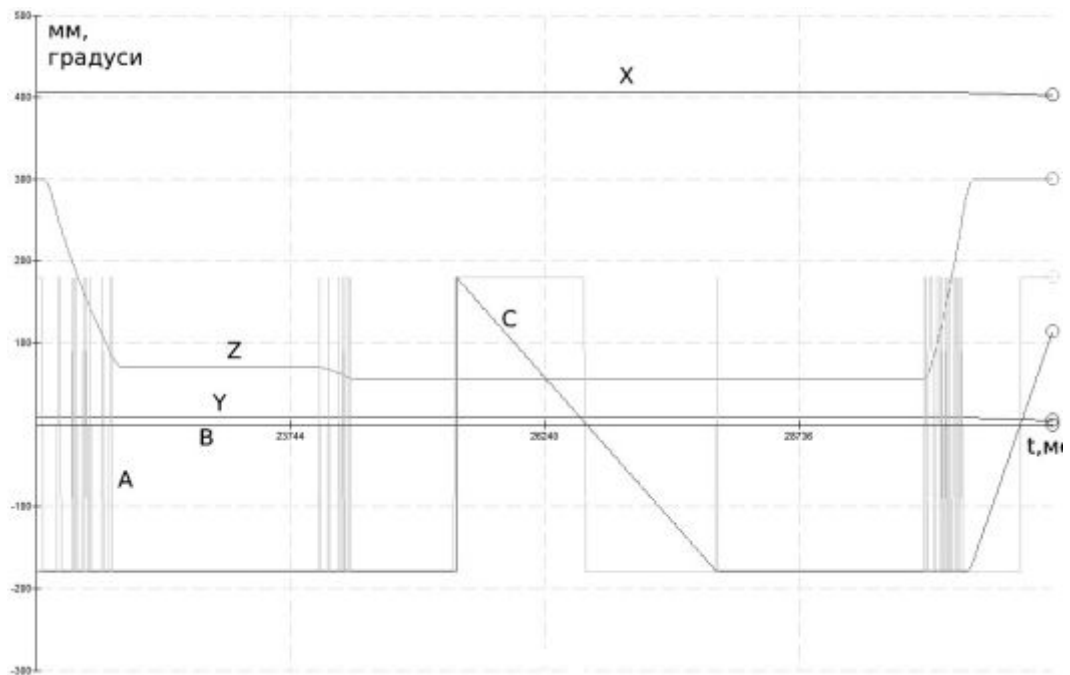


Рис. 10. Перевірка одного із отворів деталі

Для фізичної реалізації перевірки деталі необхідно здійснювати обертання дефектоскопу, за віссю *A*. На рис. 12 показано цикл перевірки деталі із урахуванням обертання щупа дефектоскопа, що перевіряє деталь.

Під час обстеження деталі № 4 відбувся аварійний стоп, через це час обстеження деталі більший за інші. Поведінку робота під час зупинки продемонстровано на рис. 12. Із графіка на рисунку видно, що після перевірки однієї деталі робот перемістився в площині *XU*. Після перевірки одного отвору наступної деталі, відбулася аварійна зупинка. Після усунення аварії робот продовжив обстеження деталі з місця зупинки.

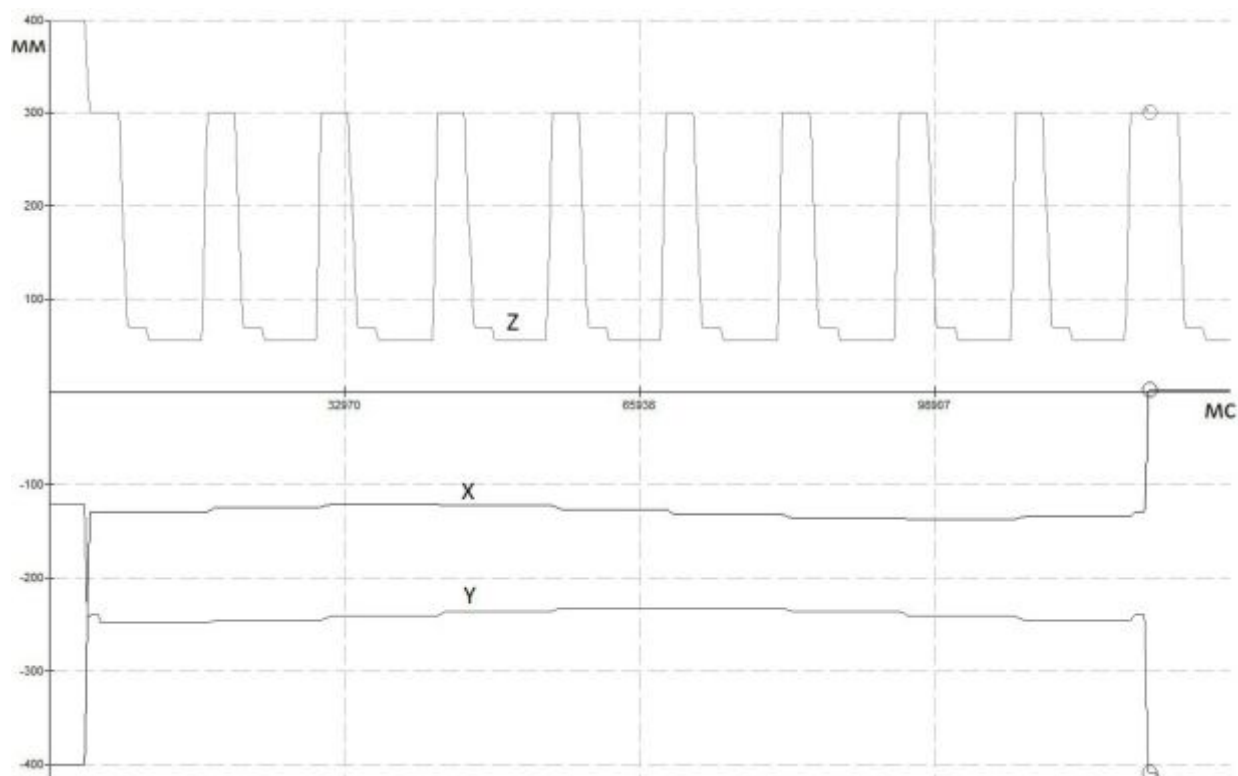


Рис. 11. Цикл перевірки однієї деталі

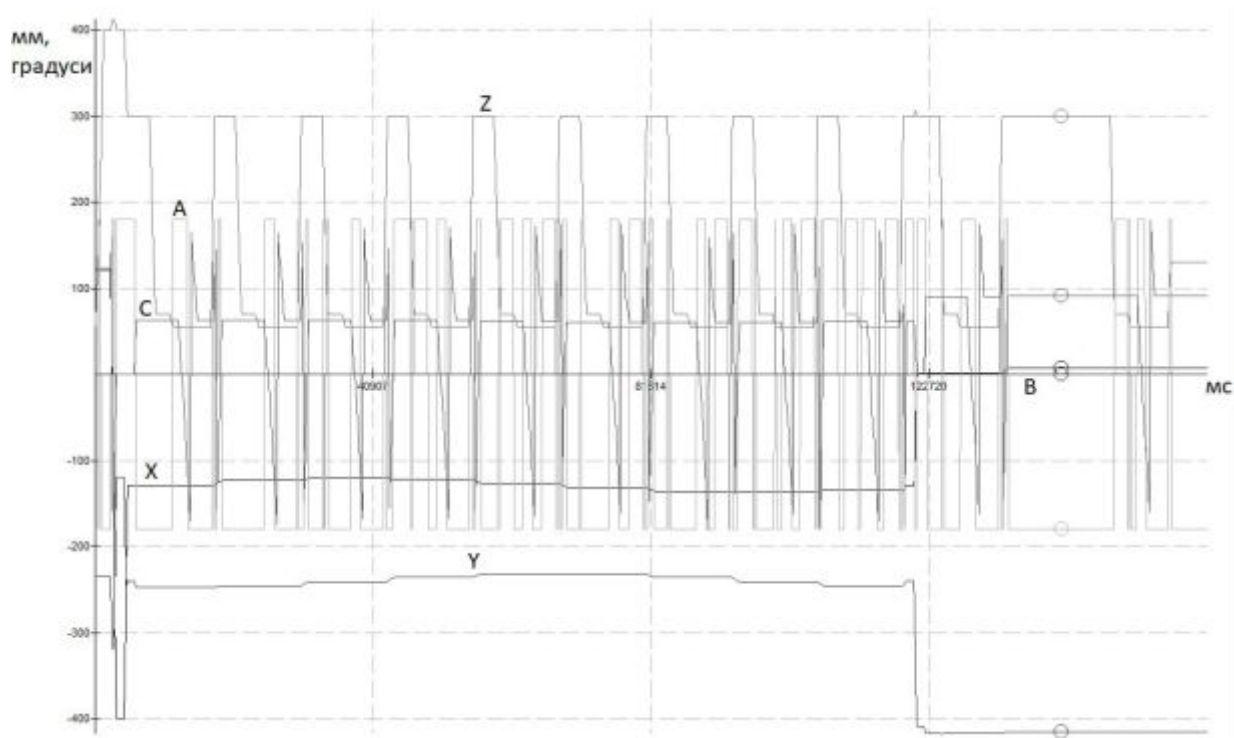


Рис. 12. Цикл перевірки двох деталей з аварійною зупинкою під час роботи

Висновки

У ході експериментального дослідження та моделювання РТО підтверджено робото-спроможність розроблених алгоритмів і програм керування для проведення ультразвукової дефектоскопії якості зварювання. При проведенні моделювання були визначені оптимальні значення швидкості переміщення та обертання ланок робота при їх одночасному русі. Це дозволило збільшити швидкодію та підвищити продуктивність роботи осередку

Список використаної літератури

1. Контроль якості продукції в машинобудуванні: навч. посіб. / Федоров Г.С., Ямшинський М.М., Фесенко А.М., Фесенко М.А. К.: ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2008. 352 с.
2. Галаган Р.М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю: підручник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології та системи неруйнівного контролю і діагностики» спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/27002?locale=uk>. (дата звернення: 17.07.2023).
3. Цвіркун Л.І., Грулер Г. Робототехніка та мехатроніка: навч. посіб. Вид. 3-тє., переробл. та допов. Дніпро: НГУ, 2017. 224 с.
4. Поліщук М.М., Ткач М.М. Робототехнічні системи: проєктування і моделювання: навч. посіб. для студ. спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41388>. (дата звернення: 18.07.2023).
5. Зибенков Д.О., Аніщенко М.В. Роботизація ультразвукової дефектоскопії. *Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених* : збірник тез та доповідей 16-ї Міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів, (м. Харків, 14-16 грудня 2022 р.) / ред. Є. І. Сокол. Харків, НТУ «ХП», 2022. С. 170.
6. EPOCH 650 UltrasonicFlawDetector. URL: <https://www.olympus-ims.com/en/epoch650/>. (дата звернення: 19.07.2023).
7. MitsubishiElectric MELFA FR RV-FR Series. URL: <https://www.mitsubishielectric.com/fa/products/rbt/robot/items/vertical/index.html>. (дата звернення: 18.07.2023).
8. Todd D.J. Fundamentals of robot technology: an introduction to industrial robots, teleoperators and robot vehicles. 1986. URL: <https://pdfcoffee.com/fundamentals-of-robot-technology-an-introduction-to-industrial-robots-teleoperators-and-robot-vehicles-pdfdrivecom-pdf-pdf-free.html>. (дата звернення: 21.07.2023).

ROBOTIC TECHNOLOGICAL CELLULTRASONIC FLAW DETECTION

Abstract

Ultrasonic flaw detection is the most versatile non-destructive testing method for detecting defects in various materials. The aim of this work is to develop a robotic technological cell for ultrasonic flaw detection of welded products. To achieve this goal, we selected the necessary equipment, developed an algorithm for the control system, and wrote control and data collection programs. In addition to identifying the product defect, the PC-based control system also ensures safety during the diagnostic process.

The technical support of the cell consists of an ultrasonic flaw detector "EPOCH 650" with a rectangular pulse generator and a digital receiver, an industrial robot Mitsubishi Electric MELFA RV-FR series, a work table for the required part orientation, inductive sensors for identifying the installation of the part, light barriers to ensure safe operation of the cell and a control system.

The cell control system is implemented in the form of a chalkboard and includes a central processing device for cell control, a robot control processor for implementing the robot's trajectory and communication with the robot controller, a module for communication with peripheral equipment, and

a data logging module for registration, recording and sharing of events in the control system, a digital input module for receiving digital signals of 0 or 24 V DC from contact type sensors, manual control buttons, status signals from alarm systems, positioning drives, etc.

The cell software ensures the implementation of control algorithms and consists of a control program to control the robot's movements, an executive program to ensure the control system's analysis of signals from the flaw detector, a security system, and user interaction via the system interface. The interface system receives data from the PLC and is responsible for graphically displaying information about the control system.

The paper presents the results of experimental research and simulation, which confirm the efficiency and effectiveness of the developed algorithms and control programs. By determining the optimal values of the speeds of movement and rotation of the robot links during their simultaneous movement, the speed and productivity of the cell are increased.

References

- [1] Fedorov G.Ye., Yamshynskij M.M., Fesenko A.M., Fesenko M.A. (2008). *Kontrolyakostiprodukciji v mashynobuduvanni [Product quality control in mechanical engineering]*. Kyiv: Politehnika [in Ukrainian].
- [2] Galagan R.M. (2019). *Teoretychni osnovy ultrazvukovogo nerujnivnogo kontrolyu [Theoretical foundations of ultrasonic non-destructive testing]*. Kyiv: KPI im. Igorya Sikorskogo. Retrieved from: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/27002?locale=uk> [in Ukrainian].
- [3] Czvirkun L.I., Gruler G. (2017). *Robototexnika ta mexatronika [Robotics and mechatronics]*. Dnipro: NGU [in Ukrainian].
- [4] Polishhuk M.M., Tkach M.M. (2021). *Robototexnichni systemy: proyektuvannya i modelyuvannya [Robotics systems: design and simulation]*. Kyiv: KPI im. Igorya Sikorskogo. Retrieved from: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41388> [in Ukrainian].
- [5] Zybenkov D.O., Anishchenko M.V. (2022). Robotyzaciya ultrazvukovoyi defektoskopiji [Robotized ultrasonic flaw detection]. Proceedings from 16 *Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia "Teoretychni ta praktychni doslidzhennya molodyh vchenyh" – The Sixteenth International Scientific and Practical Conference "Theoretical and practical research of young scientists"*. (p. 170). Xarkiv: NTU "XPI" [in Ukrainian].
- [6] EPOCH 650 Ultrasonic Flaw Detector. Retrieved from: <https://www.olympus-ims.com/en/epoch650/>.
- [7] Mitsubishi Electric MELFA FR RV-FR Series. Retrieved from: <https://www.mitsubishielectric.com/fa/products/rbt/robot/items/vertical/index.html>.
- [8] Todd D.J. (1986). Fundamentals of robot technology: an introduction to industrial robots, teleoperators and robot vehicles. Retrieved from: <https://pdfcoffee.com/fundamentals-of-robot-technology-an-introduction-to-industrial-robots-teleoperators-and-robot-vehicles-pdfdrivecom-pdf-pdf-free.html>.

Надійшла до редколегії 11.10.2023