

УДК: 519.688 : 621.3.088.3

А. О. Семенов<sup>1</sup>  
А. Ю. Савицький<sup>1</sup>  
С. В. Барабан<sup>1</sup>  
М. О. Притула<sup>1</sup>  
Р. О. Куляс<sup>1</sup>

## ЗАСТОСУВАННЯ ЧИСЕЛЬНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ МОБІЛЬНОГО РОБОТА

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Будь-яке сучасне виробництво використовує роботизовані лінії обробки матеріалів та лінії складання в таких галузях, як, наприклад, авіа- та машинобудування, приладобудування, або в процесах, пов'язаних з використанням їдких та токсичних речовин. Тому перспективним науковим та технічним напрямком є розробка та удосконалення електромеханічної частини виробничих ліній та комплексів. Вирішення цієї проблеми можливе за використання сучасних методів збору інформації від первинних сенсорів, а також впровадження ефективних засобів їх оброблення та синтезу керувальних імпульсів на електромеханічні частини устаткування. Точність позиціонування електромеханічних елементів роботизованих технологічних маніпуляторів напряму залежить від точності визначення їх положення і руху по запрограмованій траєкторії. Тому запропоновано використання фазового методу вимірювання положення маніпулятора мобільного робота, що дозволяє отримати високу чутливість вимірювання і, відповідно, забезпечити високий ступінь точності виконання операцій та реагувати на зміни у технології виробництва. Реалізація фазового методу вимірювання пов'язана з використанням опорного сигналу, відносно якого здійснюється спостереження. Однак, в практиці вимірювань виникають нелінійні ефекти середовища розповсюдження сигналів (нелінійність імітансних властивостей середовища, інтерференції тощо), що призводить до незбігу спектрального складу вимірювального й опорного сигналів. Іншим аспектом впливу на результат вимірювання, є точність апроксимації функції перетворення сенсора, зважаючи на припущення, що вимірюваний сигнал є квазігармонічним, а це не завжди відповідає дійсності. Тому в роботі запропоновано чисельний метод вимірювання фази неперервних сигналів без прив'язки до їх геометричної форми.*

**Ключові слова:** робот, фазовий метод вимірювання, сенсор, вимірювальний канал, чисельний метод вимірювання.

### Вступ

Точність виконання операцій виробничими роботами, маніпуляторами, транспортними засобами, безпосередньо залежить від можливості засобу забезпечувати траєкторію руху за заданою програмою, що досягається удосконаленням системи збору та обробки інформації щодо положення робота в просторі та подальшим визначенням траєкторії руху. На практиці найчастіше застосовується ультразвуковий сенсор для визначення положення робота за відбитим від перешкоди сигналом. Однак, результат вимірювання суттєво залежить від параметрів навколишнього середовища: матеріалу і шорсткості поверхні цілі, загасання і заломлення сигналу в просторі розповсюдження, ехо-ефектів та інших факторів, що впливають на амплітуду та спектральний склад прийнятого сигналу. Тому в цій статті розглядається можливість застосування нової методики визначення фази вимірювального сигналу для реалізації на практиці сенсора системи позиціонування мобільного робота [1]. Запропонована методика дозволяє вимірювати фазу періодичних сигналів, що не мають розривів та екстремумів другого порядку. При цьому вимірювальний сигнал подається у дискретному вигляді і може оброблятися мікропроцесорним засобом за алгоритмом запропонованої методики.

## Результати дослідження

Нехай існує певний досліджуваний об'єкт (мішень і канал передавання сигналу), який на відрізьку часу  $[t_0; t_1]$ , що є періодом дискретизації, має неперервну функцію перетворення  $G(t)$  та фазочастотну характеристику (ФЧХ)  $\varphi(t)$ . За достатньо малого періоду дискретизації можна вважати, що  $G(t)$  є монотонною функцією, а  $\varphi(t)$  — лінійною функцією. Нехай дослідження об'єкта проводяться протягом часу  $[t_0; t_n]$  з кроком  $h = t_n - t_{n-1}$ .

У випадку ультразвукового сенсора відбитого сигналу для позиціонування мобільного робота амплітуда опорного сигналу вважається рівною амплітуді передаваного сигналу  $S(t) = A(t)$ . При проходженні сигналу досліджуваним об'єктом, з урахуванням його коефіцієнта поглинання (відбиття), який описується в загальному випадку деяким законом  $bt + c$ , де  $b, c$  — постійні коефіцієнти,

$$S(t) = \frac{A(t)\varphi(t)}{(bt + c)}, \quad (1)$$

де  $A(t)$  — сигнал передавача. Вплив поглинання (відбиття) об'єкта дослідження можна нівелювати множенням на цей коефіцієнт  $(bt + c)$ . Дослідимо вплив ФЧХ на проходження сигналу.

Суть метода полягає в застосуванні перетворення різниці фаз у часовий проміжок. Всі відомі методи вимірювання фази ґрунтуються на обробці сигналу відомої геометричної форми. У випадку,

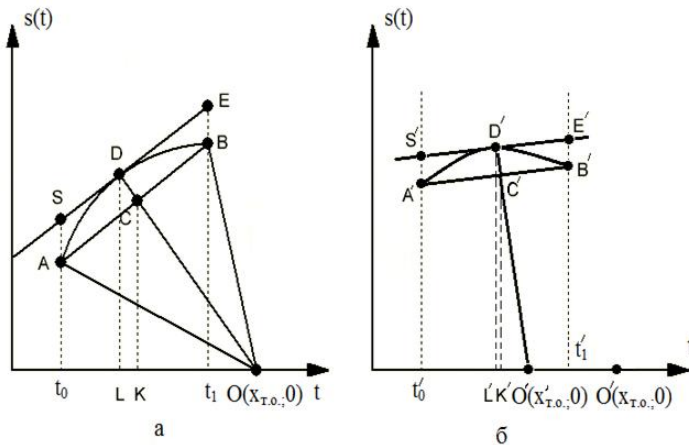


Рис. 1. Графічне зображення методу вимірювання фази:  
а, б — апроксимація графіка вимірюваного сигналу дугою  
за різних значень його фази

коли функція перетворення задана таблицею, тобто результат вимірювання є дискретною величиною, виникає потреба у застосуванні чисельних методів [1]. Як показано в роботі [2], застосування криволінійної апроксимації дозволяє отримати точність вимірювання інтегральних величин з точністю, достатньою для практичного застосування.

Виходячи з апроксимації графіка сигналу (дуга АВ на рис. 1а), який описується рівнянням (1), між моментами звернення, дугою, з центром на осі координат (точка  $O(x_{T,0}; 0)$ ) [3], можна сказати, що коли досліджуваний об'єкт має імітансний опір по відношенню до вимірювального сигналу, то проміжок між точками центрів дуг, які апроксимують графіки прийнятих сигналів прямого і вимірювального каналів, буде однозначно характеризувати різницю фаз між ними.

Візьмемо два сусідніх вузла  $A(t_0; S(t_0))$ ,  $B(t_1; S(t_1))$  (рис. 1а). Серединний перпендикуляр до відрізка АВ є геометричним місцем точок центрів кіл, описаних навколо даних точок. Припустивши, що графік шуканої функції випуклий вгору, точку перетину цього перпендикуляра з віссю абсцис позначимо  $O(t_{T,0}; 0)$ . При цьому абсциса цієї точки визначається згідно з виразом [3]

$$t_{T,0} = \frac{(t_1^2 - t_0^2) + (S^2(t_1) - S^2(t_0))}{2h}, \quad (2)$$

де  $h$  — крок сусідніх відліків часу для обчислення фази сигналу ( $h = t_n - t_{n-1}$ ).

При цьому радіус кола описується виразом

$$r_0 = \sqrt{\left( \frac{(t_1^2 - t_0^2) + (S^2(t_1) - S^2(t_0)) - 2ht_0}{2h} \right)^2 + S^2(t_0)} = \sqrt{(t_{T,0} - t_0)^2 + S^2(t_0)}. \quad (3)$$

Використання вищенаведених рівнянь зумовлює необхідність накладання обмеження  $r_0 > h$ .

Припустимо, що внаслідок відгуку досліджуваного об'єкта змінилась фаза сигналу (1), тобто дуга, що апроксимує графік функції, перемістилась вправо чи вліво залежно від характеру імпедансно-сті відгуку. Тоді вузли функції змістились і мають координати  $A'(t'_0; S(t'_0))$ ,  $B'(t'_1; S(t'_1))$  (рис. 1б). Оскільки згідно з прийнятою апроксимацією дугою кола фіксованого радіусу для цього проміжку, центр нової дуги з центром в точці  $O'$  зміститься відносно свого початкового положення (2), на відстань, функціонально пов'язану із затримкою сигналу.

Нехай координати нового центра кола в точці  $O'(t'_{T.O.}; 0)$ , рівняння (2) для центра нового кола набуде нового значення

$$t'_{T.O.} = \frac{(t_1'^2 - t_0'^2) + (S^2(t_1') - S^2(t_0'))}{2h}. \quad (4)$$

Кути нахилу дотичних  $CE$  і  $C'E'$  до дуг  $AB$  і  $A'B'$  у точках  $D$  і  $D'$  (рис. 1а, б) у випадку прямого і вимірювального каналів будуть описуватись такими виразами:  $k = \frac{S(t_0) - S(t_0')}{h}$ ,  $k' = \frac{S(t_1') - S(t_0')}{h}$ .

Кут між дотичними  $CE$  і  $C'E'$  (рис. 1а, б) розраховується за виразом  $\text{tg } \alpha = |k - k'|$ . Завдяки властивості радіусів кіл, проведених у точки дотику, кут між серединними перпендикулярами до хорд  $AB$  і  $A'B'$  також буде  $\alpha$ , при чому діапазон зміни цього кута від 0 (коли відставання не відбувається) до  $\pi$  (кола з центрами в точках  $O$  та  $O'$  дотичні).

Знайдемо залежність довжини відрізка  $[O; O']$  від кута  $\alpha$ . Оскільки відрізки  $OD$  та  $O'D'$  є радіусами, проведеними до точок дотику (рис. 1а, б), то кут між ними також дорівнює  $\alpha$ . А їх довжини розраховуються за виразами

$$|OD| = r_0 = \sqrt{\left(\frac{(t_1^2 - t_0^2) + (S^2(t_1) - S^2(t_0)) - 2ht_0}{2h}\right)^2 + S^2(t_0)} = \sqrt{(t_{T.O.} - t_0)^2 + S^2(t_0)}; \quad (5)$$

$$|O'D'| = r'_0 = \sqrt{\left(\frac{(t_1'^2 - t_0'^2) + (S^2(t_1') - S^2(t_0')) - 2ht'_0}{2h}\right)^2 + S^2(t'_0)} = \sqrt{(t'_{T.O.} - t'_0)^2 + S^2(t'_0)}. \quad (6)$$

Для знаходження функціонального зв'язку кута між дотичними з часом затримки сигналу досліджуваним об'єктом, проведемо перпендикуляри з точок дотику  $D$  та  $D'$  на вісь абсцис і позначимо їх відповідно  $L$  й  $L'$ . Довжини відрізків від центрів кіл до основ цих перпендикулярів знаходяться за виразами

$$|OL| = \frac{\left(t_{T.O.} - \frac{t_1 + t_0}{2}\right) r_0}{\sqrt{\left(t_{T.O.} - \frac{t_1 + t_0}{2}\right)^2 + \left(\frac{S(t_0) + S(t_1)}{2}\right)^2}}; \quad |O'L'| = \frac{\left(t'_{T.O.} - \frac{t'_1 + t'_0}{2}\right) r'_0}{\sqrt{\left(t'_{T.O.} - \frac{t'_1 + t'_0}{2}\right)^2 + \left(\frac{S(t'_0) + S(t'_1)}{2}\right)^2}}. \quad (7)$$

Для спрощення розрахунків у формулах (7) введемо такі заміни:  $e_0 = t_{T.O.} - \frac{t_1 + t_0}{2}$ ;

$\Delta S_0 = \frac{S(t_0) + S(t_1)}{2}$ ,  $\Delta S'_0 = \frac{S(t'_0) + S(t'_1)}{2}$ ;  $e'_0 = t'_{T.O.} - \frac{t'_1 + t'_0}{2}$ , тоді вирази (7) набудуть вигляду

$$|OL| = \frac{e_0 r_0}{\sqrt{e_0^2 + \Delta S_0^2}}; \quad |O'L'| = \frac{e'_0 r'_0}{\sqrt{e_0'^2 + \Delta S_0'^2}}. \quad (8)$$

За геометричною побудовою час затримки сигналу досліджуваним об'єктом є функціоналом від відстані між центрами кіл вимірювального і прямого каналів, і після підстановки відповідних значень (8), визначається за виразом

$$|OO'| = \left| |OL| - |O'L'| \right|.$$

Аналогічно визначається час затримки сигналу для кожного періоду звернення.

У випадку, коли функція  $S(t)$  є випуклою вниз, аналогічні міркування можуть застосовуватись відносно прямої, що є геометричним місцем центрів кіл, описаних навколо точок  $A(t_0; S(t_0))$  і  $B(t_1; S(t_1))$ . Дійсно, якщо час звернення відмінний від нуля, кут між віссю абсцис та прямою  $AB$ , а відповідно, і дотичною до апроксимуючої дуги, відмінний від  $\pi/2$ . Враховуючи властивості серединного перпендикуляра, відстані між вузлами  $A(t_0; S(t_0))$  і  $B(t_1; S(t_1))$  та цією точкою перетину перпендикуляра з віссю абсцис рівні. При цьому затримка сигналу досліджуваною системою обчислюється аналогічно до довжини відрізка  $|OO'|$ .

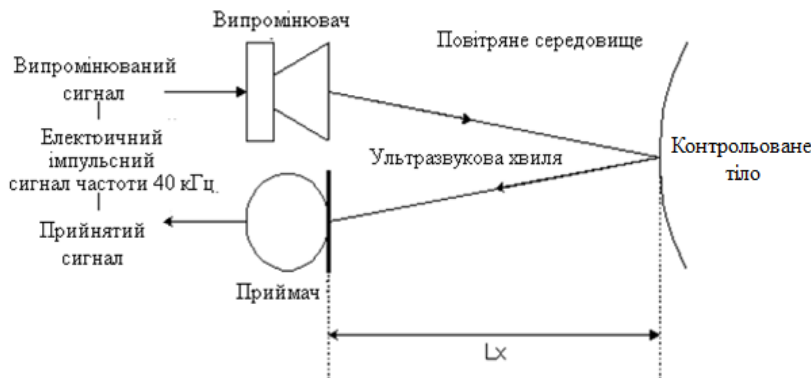


Рис. 2. Структурна схема сенсора позиціонування

Запропонована методика вимірювання фази застосована у сенсорі позиціонування, схема роботи якого показана на рис. 2 [4]. На рис. 2  $Lx$  — це відстань від об'єкта до ультразвукового сенсора, тобто шлях, що проходить сигнал ультразвукового випромінювання. На рис. 2 також вказано частоту електричного імпульсного сигналу 40 кГц, саме за такого значення проведено експеримент і оскільки набіг фази сигналу прямо залежить від час-

тоти, то за іншого значення частоти буде зовсім інше значення фази сигналу.

Ультразвуковий сенсор кріпиться до сервопривода, який дає змогу сенсорі повертатись і оцінювати наявність перешкоди в широкому діапазоні. Сервопривід — це пристрій, призначений для управління приладами. Здійснюється цей процес за допомогою зворотного зв'язку. Він працює від імпульсів змінної тривалості, які отримує по сигнальному кабелю. Коли тривалість імпульсів становить близько 1,5 мілісекунди, то сервопривід перебуває в нейтральному положенні (тобто у нього однаковий потенціал обертання в обидва напрями). Кут повороту сервопривода залежить від тривалості імпульсу. Чим триваліший імпульс, тим більший крутний момент сервопривода і тим вища швидкість повороту.

Систему позиціонування мобільного робота реалізовано на основі апаратно-програмної платформи платформи Arduino uno. Для розроблення та налагодження апаратної та програмної частин системи позиціонування мобільного робота використано програмне середовище "Proteus". Для тестування ультразвукового сенсора в середовищі "Proteus" [5] зібрано схему пристрою керування системою позиціонування мобільного робота, показану на рис. 3, та завантажено бібліотеку ультразвукового сенсора. За тестовим програмним кодом ультразвуковий сенсор спрацьовує, коли будь-яка перешкода виникає на його шляху, при цьому він буде автоматично давати вказівку. Використання у схемі пристрою (див. рис. 3) змінного джерела напруги для аналогового штифта ультразвукового сенсора дає змогу встановлювати перешкоду за відповідними параметрами змінної напруги (часовими або частотними) [6].

Перед початком моделювання потрібно завантажити ".hex" файл в плату Arduino uno та в ультразвуковий сенсор. Результат моделювання показаний на рис. 3 (праворуч). Для ідентифікації перешкоди надсилається Ping від ультразвукового сенсора і в програмному коді встановлена сигналізація на певній відстані, так що кожного разу, коли який-небудь об'єкт з'являється в цьому діапазоні, розроблена програма генерує сигнал тривоги [6].

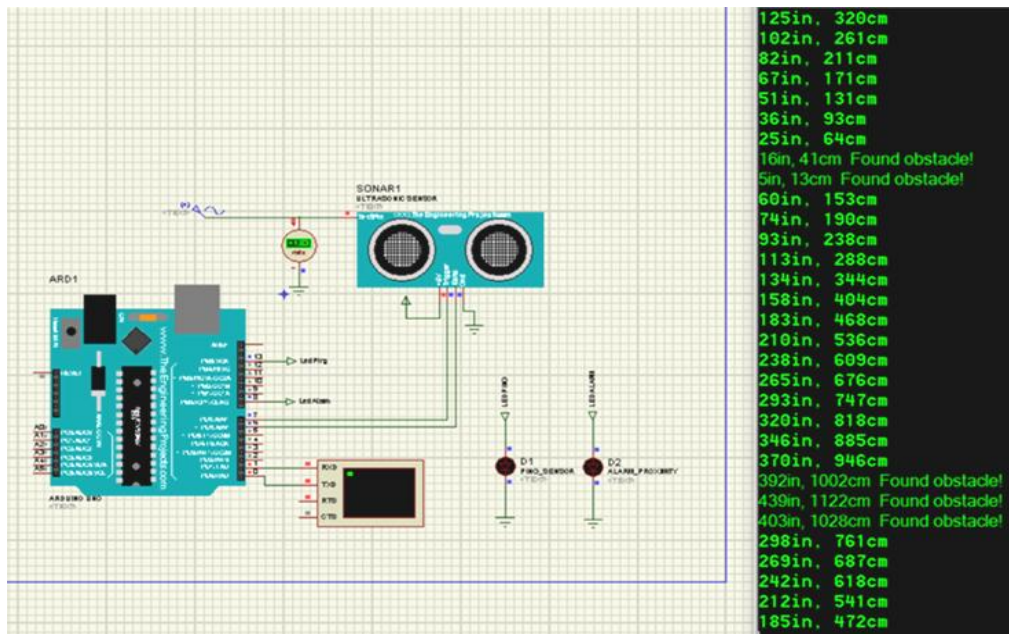


Рис. 3. Схема пристрою керування системи позиціонування мобільного робота в середовищі "Proteus" та результати моделювання

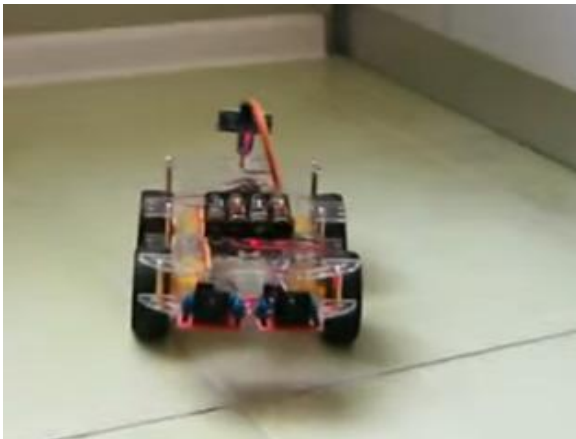


Рис. 4. Зовнішній вигляд дослідного зразка мобільного робота

На основі запропонованої системи позиціонування зібрано дослідний зразок мобільного робота, який проходив тестування в реальному часі. Під'їхавши до перешкоди (рис. 4), на основі зібраної інформації роботизованій пристрій оцінив перешкоду. Проаналізувавши відсутність об'їзду, він повернув на кут  $90^\circ$ , потім, на основі повторного виконання математичних операцій, знову оцінив перешкоду і вже повернув на визначений програмою кут. Далі знову оцінив перешкоду та, оскільки її не виявив, поїхав прямо. Експериментальні тестування мобільного робота із застосуванням запропонованої системи позиціонування показали його працездатність і ефективність для виконання поставленої задачі.

## Висновки

Застосування фазових методів вимірювання, зокрема й для обробки вимірювального сигналу ультразвукового сенсора позиціонування мобільного робота, дозволяє значно підвищити чутливість вимірювання і одночасно підвищити завадозахищеність каналу передавання даних. При цьому, за наявності результатів вимірювання у вигляді масиву відліків, запропонована методика дозволяє зменшити кількість необхідних математичних розрахунків. Отримані в роботі результати комп'ютерного моделювання у середовищі "Proteus" та результати експериментального випробування дослідного зразка продемонстрували ефективність застосування розроблених теоретичних положень.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Г. Г. Раннев, и А. П. Тарасенко, *Методы и средства измерений*, учебник, 5-е изд., стер. Москва, Россия: Академия, 2008, 332 с.
- [2] С. Ф. Маликов, *Введение в технику измерений*. Москва, Россия: МАШГИЗ, 2017. 187 с.
- [3] Т. В. Яковлева, «Метод определения фазового сдвига квазигармонических сигналов, основанный на анализе огибающей,» *Компьютерная оптика*, № 6, с. 950-956, 2017.
- [4] О. В. Осадчук, О. С. Звягін, О. П. Червак, і А. Ю. Савицький, «Вимірювання різниці фаз періодичних сигналів,» in *Proc. Vth International Scientific-Practical Conference. Physical and Technological Problems of Transmission, Processing and Storage of Information in Infocommunication Systems*, Chernivtsi, 2017, pp. 142.

[5] А. В. Максимов, «Моделирование устройств на микроконтроллерах с помощью программы ISIS из пакета PROTEUS VSM», *Радио*, № 4, с. 30-33, 2015.

[6] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов, і К. О. Коваль, *Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором*, монографія. Вінниця: ВНТУ, 2011. 336 с.

Рекомендована кафедрою радіотехніки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 7.02.2020

**Семенов Андрій Олександрович** — д-р техн. наук, доцент, професор кафедри радіотехніки, e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua ;

**Савицький Антон Юрійович** — канд. техн. наук, доцент кафедри радіотехніки, e-mail: savitskyant@gmail.com;

**Барабан Сергій Володимирович** — канд. техн. наук, доцент кафедри радіотехніки, e-mail: serg@politex.org.ua ;

**Притула Максим Олександрович** — здобувач кафедри радіотехніки, e-mail: pritulamo@ukr.net ;

**Куляс Роман Олексійович** — аспірант кафедри радіотехніки, e-mail: romakulyas94@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**A. O. Semenov<sup>1</sup>**  
**A. Yu. Savitskyi<sup>1</sup>**  
**S. V. Baraban<sup>1</sup>**  
**M. O. Prytula<sup>1</sup>**  
**R. O. Kulyas<sup>1</sup>**

## The Application of Numerical Methods for the Implementation of the Mobile Robot Positioning System

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

*Any modern production cannot be imagined without robotized processing lines of materials and assembly lines in such fields of production as, for example, aircraft and engineering, the manufacture of radio equipment, or in processes involving the use of caustic and toxic substances. Therefore, the promising scientific and technical direction is the development and improvement of the electromechanical part of production lines and complexes. The solution of this problem is possible due to the use of modern methods for collecting information from primary sensors, as well as the introduction of modern means of their processing and synthesis of control pulses on the electro-mechanical parts of the equipment. The precision of positioning of electromechanical elements of robotic technological manipulators directly depends on the accuracy of determining their position and following the rotor programmed trajectory. Therefore, it was proposed to use a phase method for measuring the displacement of the robot manipulator, which allows obtaining high sensitivity of measurement and, accordingly, ensuring a high degree of accuracy of operations and reacting to changes in production technology. The implementation of the phase measurement method is related to the use of the reference signal, according to which observation is carried out. However, in practice measurement occurs nonlinear effects of the medium of propagation of signals (nonlinearity immittal properties of the medium, interference, etc.), which leads to a non-matching of the spectral composition of the measuring and reference signals. Another aspect affecting the measurement result is the accuracy of the approximation of the sensor transformation function based on the assumption that the measuring signal is quasigarmonic, which is not always true. Therefore, in this paper a numerical method for measuring the phase of continuous signals without binding to their geometric form is proposed.*

**Keywords:** robot, phase measurement method, sensor, measuring channel, numerical measurement method.

**Semenov Andrii O.** — Dr. Sc. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Chair of Radiotechnics, e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua ;

**Savitskyi Anton Yu.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Radiotechnics, e-mail: savitskyant@gmail.com ;

**Baraban Serhii V.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Radiotechnics, e-mail: serg@politex.org.ua ;

**Prytula Maksym O.** — Researcher of the Chair of Radiotechnics, e-mail: pritulamo@ukr.net ;

**Kulyas Roman O.** — Post-Graduate Student of the Chair of Radiotechnics, e-mail: romakulyas94@gmail.com

**А. А. Семёнов<sup>1</sup>**  
**А. Ю. Савицкий<sup>1</sup>**  
**С. В. Барабан<sup>1</sup>**  
**М. А. Притула<sup>1</sup>**  
**Р. А. Куляс<sup>1</sup>**

## **Применение численных методов для реализации системы позиционирования мобильного робота**

<sup>1</sup>Винницкий национальный технический университет

*Любое современное производство использует роботизированные линии обработки материалов и линии сборки в таких отраслях, как, например, авиа- и машиностроение, приборостроение, или в процессах, связанных с использованием едких и токсических веществ. Поэтому перспективным научным и техническим направлением является разработка и усовершенствование электромеханической части производственных линий и комплексов. Решение данной проблемы возможно с использованием современных методов сбора информации от первичных сенсоров, а также внедрение современных средств их обработки и синтеза управляющих импульсов на электромеханические части оборудования. Точность позиционирования электромеханических элементов роботизированных технологических манипуляторов напрямую зависит от точности определения их положения и следования по запрограммированной траектории. Поэтому предложено использовать фазовый метод измерения положения манипулятора мобильного робота, что позволяет получить высокую чувствительность измерения и, соответственно, обеспечить высокую степень точности выполнения операций и реагировать на изменения в технологии производства. Реализация фазового метода измерения связана с использованием опорного сигнала, относительно которого осуществляется наблюдение. Однако, на практике измерения возникают нелинейные эффекты среды распространения сигналов (нелинейность иммитансных свойств среды, интерференции и т.п.), что приводит к несовпадению спектрального состава измерительного и опорного сигналов. Другим аспектом, влияющим на результат измерения, является точность аппроксимации функции преобразования сенсора, исходя из предположения, что измерительный сигнал является квазигармоничным, что не всегда соответствует действительности. Поэтому в этой работе предложен численный метод измерения фазы непрерывных сигналов без привязки к их геометрической форме.*

**Ключевые слова:** робот, фазовый метод измерения, сенсор, измерительный канал, численный метод измерения.

**Семёнов Андрей Александрович** — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры радиотехники, e-mail: semenov.a.o@vntu.edu.ua ;

**Савицкий Антон Юрьевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры радиотехники, e-mail: savitskyant@gmail.com ;

**Барабан Сергей Владимирович** — канд. техн. наук, доцент кафедры радиотехники, e-mail: serg@politex.org.ua ;

**Притула Максим Александрович** — соискатель кафедры радиотехники, e-mail: pritulamo@ukr.net ;

**Куляс Роман Алексеевич** — аспирант кафедры радиотехники, e-mail: romakulyas94@gmail.com