

ТЕОРЕТИЧНИЙ І НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ
ІНЖЕНЕРНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ

THEORETICAL AND APPLIED SCIENCE JOURNAL
ENGINEERING ACADEMY OF UKRAINE



В І С Н И К

ІНЖЕНЕРНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ

ВИПУСК 2

***BULLETIN OF ENGINEERING ACADEMY
OF UKRAINE***

Issue 2

**ТЕОРЕТИЧНИЙ І НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ
ІНЖЕНЕРНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ**

**THEORETICAL AND APPLIED SCIENCE JOURNAL
ENGINEERING ACADEMY OF UKRAINE**

**Журнал друкує статті науковців вузів та установ
України, інших країн відповідно до рубрик:**

Авіаційна і космічна техніка
Військово-технічні проблеми
Геологія, видобування та переробка корисних
копалин
Інженерні проблеми агропромислового комплексу
Інформаційні системи, обчислювальна й електронна
техніка, системи зв'язку та приладобудування
Матеріалознавство
Машинобудування
Медична інженерія
Металургія
Охорона навколишнього середовища (інженерна
екологія) і ресурсозбереження
Стандартизація, метрологія і сертифікація
Будівництво та будіндустрія
Технологія легкої промисловості
Технологія харчової промисловості
Хімічні технології й інженерна біотехнологія
Економіка, право та керування в інженерній
діяльності
Енергетика
Освіта та виховання

**Journal submits articles of researchers of universities
and institutions of Ukraine and other countries in
accordance with headings:**

Aviation and Space Engineering
Military-technical problems
Geology, Mining and Processing of Minerals
Engineering Problems of Agroindustrial Complex
Information systems , computers and electronic
equipment , communication systems and instrumentation
Material Science
Mechanical Engineering
Medical Engineering
Metallurgy
Preservation of Environment (Ecological Engineering)
and Resource Saving
Standardisation, Metrology and Certification
Building and Construction Engineering
Technology of Light Industry
Technology of Food Industry
Chemical Technologies and Engineering Biotechnology
Economics, law and management in engineering
Energetics
Education and training

Матеріали друкуються українською, російською або
англійською мовами.

Materials are submitted in Ukrainian, Russian or English
languages.

Номер затверджено на засіданні Вченої ради
Кіровоградського національного технічного
університету

The issue is approved at the meeting of Academic
Council of Kirovograd National Technical University

Протокол № 1 від 28.05.2018р
Вісник Інженерної академії України включений у новий
Перелік наукових фахових видань України, в яких
можуть публікуватися результати дисертаційних робіт
на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук
в галузі технічних наук (Наказ МОН України від
13.07.2015р. №747)

Protocol No.1 dated 28.05.2018
Bulletin of Engineering academy of Ukraine is included
into the new List of Scientific special editions of Ukraine,
in which results of dissertation works may be published
for to be conferred with academic degrees of doctor and
candidate of sciences in the field of engineering sciences
(Decree of Ministry Education and Science of the
Ukraine No.747 dated 13.07.2015)

Співзасновники:
Кіровоградський національний технічний
університет
Інженерна академія України
Одеська державна академія технічного регулювання
та якості

Cofounders:
Kirovograd National Technical University
Engineering Academy of Ukraine
Odessa State Academy of Technical Regulation
and Quality

УДК 621.317.08

В.П. Квасніков, д.т.н., А.В. Рудик, к.т.н., В.А. Рудик, М.І. Матей

АНАЛІЗ ЛОКАЦІЙНИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ

Національний авіаційний університет, andrey4453117@gmail.com

В статті проведений аналіз локаційних методів визначення параметрів руху мобільних роботів (ультразвукових, радарних та оптичних). З'ясовано, що на даний час підвищується як попит на сенсори для систем навігації, так і характеристики нових пристроїв – точність, надійність, компактність, економічність, інтелектуальність, зменшення ціни компонентів. В розвитку систем навігації актуалізується тенденція розміщення в одному інтегральному корпусі і, за можливістю, на одному кристалі, мікромеханічних та мікроелектронних пристроїв, сенсорів температури, схем обробки та пристроїв, що виконують мікрооптичні функції. При вірному врахуванні властивостей та особливостей локаційного сенсора, характерних для даної технології, можна значно підвищити технічні параметри навігаційної системи щодо детектування нахилу, руху, положення, вібрації та удару. Проаналізовано вплив дестабілізуючих факторів (температура, тиск, вологість, шуми та завади) на процес вимірювання прискорення локаційними методами.

Ключові слова: локаційні методи, мобільний робот, ультразвуковий сенсор, радар, лідар, параметри руху, дестабілізуючі фактори, швидкість, прискорення.

Вступ

Для надійного керування мобільним роботом (МР) його система керування має отримувати сигнали від різних сенсорів, в результаті обробки яких визначаються поточні координати робота, його швидкість і прискорення, а також орієнтація у просторі (кути курсу, тангажу і крену). На даний час основними типами таких сенсорів є інерціальні (акселерометри, гіроскопи, магнітометри), локаційні (ультразвукові, радарні, лідарні) і відео (моно- та стереокамери) [1].

В статті основна увага приділяється локаційним технологіям, які використовуються не тільки в традиційній галузі навігації та керування рухом, але й в геодезії, топографії, метрології, логістиці та ін. Локаційні сенсори є основною елементною базою для створення мініатюрних навігаційних систем.

Галузі використання локаційних сенсорів постійно розширюються через їх малі габаритні розміри, енергоспоживання і собівартість, формуючи новий сегмент ринку мініатюрних систем навігації [2]. Локаційні сенсори забезпечують широкий діапазон вимірювань та мають точнісні характеристики навігаційних систем середнього та високого класів. Однак вимоги до точності локаційних сенсорів та систем на їх основі при розв'язанні задач навігації та орієнтації з часом ускладнюються, що приводить до необхідності вдосконалення методів їх випробувань для отримання достовірних математичних моделей показів, які враховують умови експлуатації.

За діапазоном частот використовуваних зондувальних сигналів локаційні методи визначення параметрів руху мобільних роботів діляться на ультразвукові ((30÷100) кГц), радарні ((18÷110) ГГц) та оптичні ((10¹³÷10¹⁴) Гц) [3].

Постановка задачі

В статті необхідно:

- 1) провести аналіз локаційних методів визначення параметрів руху мобільних роботів (ультразвукових, радарних та оптичних);
- 2) розглянути особливості застосування локаційних сенсорів та способи підвищення технічних параметрів навігаційної системи МР щодо здатності детектування нахилу, руху, положення, вібрації та удару;
- 3) проаналізувати вплив дестабілізуючих факторів, таких як кліматичні (температура, тиск, вологість), шуми та завади на процес вимірювання прискорення локаційними методами.

Ультразвукові методи визначення параметрів руху мобільних роботів

Дані методи основані на вимірюванні часової затримки відбитих від перешкоди або іншого об'єкту ультразвукових коливань. Основним вимірюваним параметром є дальність до перешкоди, а швидкість та прискорення розраховуються за результатами декількох вимірювань відстані за інтервал часу.

Система ультразвукового зору МР (спрощено – ультразвуковий далекомір) складається з двох частин: сенсорного вузла, який є класичним імпульсним локатором і виконує вимірювання дальності, та приймального вузла, який отримує інформацію від сенсорного вузла і проводить обчислення параметрів руху.

Відстань до об'єкту L визначається за співвідношенням

$$L = 0.5V_3T_{\text{ЛЛ}}N, \quad (1)$$

де N та T_{III} – кількість та період лічильних імпульсів; V_3 – швидкість ультразвуку в повітрі, яка суттєво залежить від температури та меншою мірою від атмосферного тиску, вологості та швидкості вітру на відкритих ділянках траси.

За законами класичної аеродинаміки швидкість звуку в повітрі визначають за формулою $V_3 = 20.046 \cdot \sqrt{T}$, де T – абсолютна температура (К), або за емпіричним співвідношенням $V_3 = 331.4 + 0.6t^o$ [4]. Однак останнє співвідношення використовується в широкому діапазоні температур (-100...+200) °С, що приводить до збільшення похибки обчислення швидкості ультразвуку на границях діапазону до 2.9% при температурі -100 °С та 3.5% при температурі +200 °С і, відповідно, до необхідності уточнення зазначених співвідношень [5].

Для основних типів ультразвукових п'єзоперетворювачів, наприклад, фірми *MuRata*, діапазон робочих температур складає (-30...+80) °С [6]. Тому в [5] температурну залежність швидкості ультразвуку в повітрі в даному діапазоні запропоновано апроксимувати лінійною залежністю виду $\hat{V}_3 = 330.95 + 0.584t^o$ з середньою і максимальною відносними похибками апроксимації $\bar{\varepsilon}_{V_3} = 0.138\%$ і $\varepsilon_{V_{3,max}} = 0.266\%$ та коефіцієнтом парної кореляції $r_{V_3t} = 0.99933$, що говорить про достатньо високу точність отриманої лінійної регресійної залежності.

Підвищити точність апроксимації можна, звузивши температурний діапазон до (-10...+30) °С, що відповідає помірному кліматичному поясу, при цьому $\hat{V}_3 = 331.26 + 0.592t^o$ з середньою та максимальною відносними похибками апроксимації відповідно 432 ppm та 738 ppm при коефіцієнті кореляції 0.999769, що ще більше підвищує точність апроксимації [3].

Для врахування впливу вологості повітря W і атмосферного тиску P (кПа) вводять поняття акустичної віртуальної температури [7]:

$$t_{AB}^o = t^o + \frac{0.275(t^o + 273)W}{P}.$$

Неврахований вплив вологості повітря при нормальному атмосферному тиску приводить до виникнення абсолютної похибки визначення швидкості ультразвуку менше 0.5 м/с.

Якщо врахувати, що при вимірюванні параметрів руху об'єктів номінальні значення найбільш важливих нормованих величин, які впливають на результат вимірювання, є такими, як наведено в [8], то акустична віртуальна температура буде мати значення

$$t_{AB.HV}^o = 20 + \frac{0.275 \cdot (20 + 273) \cdot 0.65}{99.992} = 20.5238^o, \text{ тобто неврахований вплив відносної вологості по-}$$

вітря і атмосферного тиску навіть при номінальних значеннях нормованих впливових величин приводить до відхилення температури на 2.62% від номінального значення, що відповідає відносній похибці 0.1% визначення швидкості ультразвуку в повітрі.

На відкритих ділянках траси на швидкість ультразвуку впливає вітер: швидкість ультразвуку в напрямку руху вітру збільшується, а проти вітру – зменшується. Наявність вітру приводить до дрейфу ультразвукової хвилі, що створює ефект зміщення джерела ультразвуку. Швидкість ультразвуку при цьому визначається як $V_{3,B} = V_3 + V_B \cos \alpha$, де V_B – швидкість вітру; α – кут між напрямком вітру в точці спостереження та напрямком надходження ультразвуку.

З врахуванням впливу вологості повітря, атмосферного тиску і вітру оцінки визначення швидкості ультразвуку в повітрі в різних діапазонах температур:

$$\hat{V}_3(t^o, W, P, V_B, \alpha) \Big|_{(-10 \div 30)^o C} = 331.26 + 0.592t^o + \frac{0.1628(t^o + 273)W}{P} + V_B \cos \alpha; \quad (2)$$

$$\hat{V}_3(t^o, W, P, V_B, \alpha) \Big|_{(-30 \div 80)^o C} = 330.95 + 0.584t^o + \frac{0.1606(t^o + 273)W}{P} + V_B \cos \alpha.$$

Поверхні, що описують залежності швидкості ультразвуку в повітрі від температури і атмосферного тиску при номінальній відносній вологості повітря 65%, представлені на рис. 1 [9]. Таким чином, приходимо до висновків, що при реалізації ультразвукового далекоміра найбільш важливим фактором, який впливає на точність визначення швидкості ультразвуку, є точне вимірювання температури в зоні проведення вимірювань, а дальність до об'єкту визначається як

$$L = \frac{\hat{V}_3 N T_{III}}{2} = \left(165.63 + 0.296t^o + \frac{0.0814(t^o + 273)W}{P} + V_B \cos \alpha \right) \cdot N \cdot T_{III} \cong (165.63 + 0.296t^o) \cdot N \cdot T_{III}, \quad (3)$$

де N – кількість імпульсів, підрахована таймером-лічильником мікроконтролера далекоміра.

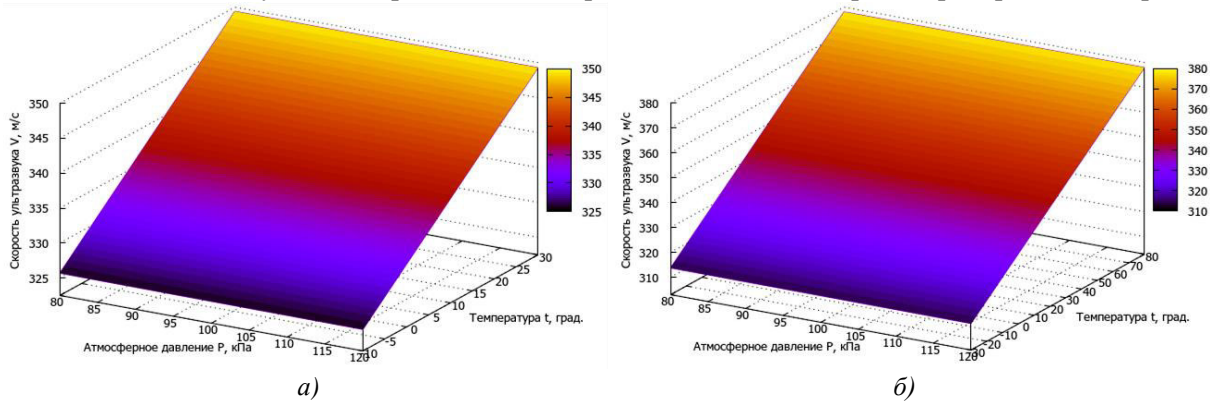


Рис. 1. Залежності швидкості ультразвуку в повітрі від температури в діапазонах (-10...+30) °C (а) та (-30...+80) °C (б), зміни атмосферного тиску від 80 кПа до 120 кПа та відносній вологості повітря 65%

У другій, наближеній частині співвідношення (3) не враховано вплив відносної вологості повітря і атмосферного тиску, тому що при достатньо великих відхиленнях даних кліматичних факторів від їх номінальних значень (65% та 100 кПа) на 35% до 100% (відносна вологість повітря) та 10 кПа до 90 кПа (атмосферний тиск) при температурі 20 °C швидкість ультразвуку зміниться на 0.523 м/с, що приведе до появи відносної похибки визначення дальності 0.15%.

Поверхня, що описує залежність дальності від температури та кількості імпульсів, підрахованих лічильником при $T_{\text{ЛІ}} = 1 \text{ мкс}$, наведена на рис. 2.

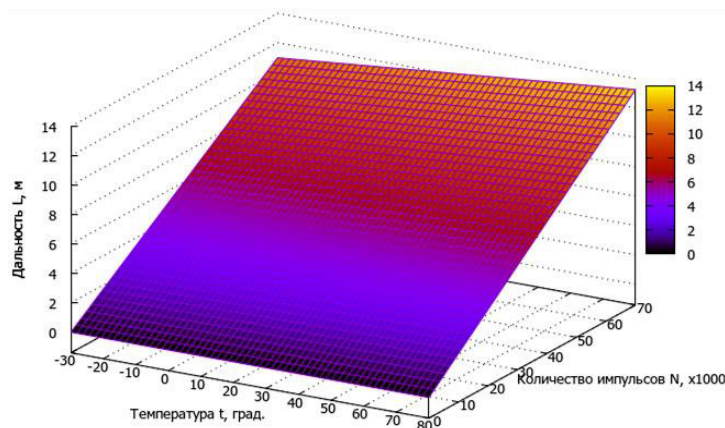


Рис. 2. Залежність дальності від температури навколишнього середовища і кількості імпульсів, підрахованих лічильником мікроконтролера

Розділова здатність системи, якою проводиться визначення дальності, при температурі 20 °C складає величину $\Delta L = 0.5 \cdot (343.1 \cdot 1 \cdot 10^{-6}) = 0.1716 \text{ (мм)}$.

Максимальна вимірювана дальність в основному обмежується потужністю п'єзовипромінювача і складає величину 6 м. Якщо 16-розрядний лічильник підраховує максимальну кількість 2^{16} імпульсів, він зупиняється та формує сигнал закінчення підрахунку, тому максимальний час вимірювання дальності складає $t_{\text{max}} = 2^{16} \cdot 10^{-6} = 0.0655 \text{ (с)}$ (для дальності 6 м максимальний час вимірювання $t_{6, \text{м}} \cong 0.035 \text{ (с)}$), а максимальна дальність $L_{\text{max}} = 2^{16} \cdot \Delta L = 11.25 \text{ (м)}$.

Тому що визначення швидкості ультразвуку для розв'язання навігаційних задач мобільної робототехніки проводиться в різних кліматичних умовах, було проведено дослідження степеню впливу групи кліматичних факторів на вихідний сигнал S_U ультразвукового випромінювача для двох випадків – при оцінці швидкості ультразвуку на відкритому просторі і в приміщенні. Досліджуваними кліматичними факторами було вибрано температуру повітря t^o , атмосферний тиск P і відносну вологість повітря W . Такий вибір обумовлений тим, що ці величини можна виміряти за допомогою мікроелектронних компонентів і використовувати для підвищення точності приладової системи МР. За результатами $n = 256$ вимірювань, виконаних за три місяці, проведений кореляційний аналіз і розраховано частинні коефіцієнти кореляції, які визначають степінь впливу на вихідний сигнал ультразвукового випромінювача S_U кожного кліматичного фактора окремо. Оцінка значущості проводилась за співвідношенням розрахункового значення критерія Стьюдента, обчисленого за

формулою $t_i = \frac{r_i \sqrt{n-1}}{1-r_i^2}$, та табличного значення критерія Стьюдента для $n \geq 200$ та рівня значущості

$\alpha = 0.01$.

Результати досліджень, наведені в табл. 1, показують тісний зв'язок між досліджуваними кліматичними факторами і вихідним сигналом п'єзовипромінювача. Температура повітря t^o максимально впливає на вихідний сигнал S_U як в першому, так і в другому випадках, однак при дослідженнях на відкритому просторі вплив більш значущий. Атмосферний тиск P здійснює на вихідний сигнал слабкий зворотний вплив на відкритому просторі, а в приміщенні його вплив є статистично незначущим. Вплив відносної вологості повітря W як на відкритому просторі, так і в приміщенні є статистично незначущим.

Таблиця 1. Частинні коефіцієнти кореляції та оцінка їх значущості

Частинний коефіцієнт кореляції	Значення частинного коефіцієнта кореляції	Розрахункове значення критерія Стьюдента	Табличне значення критерія Стьюдента	Оцінка статистичної значущості
<i>Оцінка швидкості ультразвуку на відкритому просторі</i>				
$r_{S,t^o}(WP)$	0.8945	71.4666	2.345	Статистично значущий
$r_{S,P}(t^oW)$	-0.1614	2.6463	2.345	Статистично значущий
$r_{S,W}(t^oP)$	0.1283	2.0831	2.345	Статистично незначущий
<i>Оцінка швидкості ультразвуку в приміщенні</i>				
$r_{S,t^o}(WP)$	0.8569	51.4958	2.345	Статистично значущий
$r_{S,P}(t^oW)$	-0.1311	2.1301	2.345	Статистично незначущий
$r_{S,W}(t^oP)$	-0.0983	1.5851	2.345	Статистично незначущий

На основі проведених експериментальних досліджень при визначенні швидкості ультразвуку на відкритому просторі можна вважати сталою відносно вологість повітря, а в приміщенні – ще й атмосферний тиск. Тоді формули (2) в різних діапазонах температур запишуться так [3]:

- оцінка швидкості ультразвуку на відкритому просторі:

$$\hat{V}_3(t^o, P, V_B, \alpha) \Big|_{(-10 \div 30)^\circ C} = 331.26 + 0.592 t^o \cdot \left(1 + \frac{0.1788}{P}\right) + \frac{28.889}{P} + V_B \cos \alpha; \quad (4)$$

$$\hat{V}_3(t^o, P, V_B, \alpha) \Big|_{(-30 \div 80)^\circ C} = 330.95 + 0.584 t^o \cdot \left(1 + \frac{0.1788}{P}\right) + \frac{28.498}{P} + V_B \cos \alpha;$$

- оцінка швидкості ультразвуку в приміщенні:

$$\hat{V}_3(t^o) \Big|_{(-10 \div 30)^\circ C} = 331.549 + 0.5931 t^o; \quad \hat{V}_3(t^o) \Big|_{(-30 \div 80)^\circ C} = 331.235 + 0.5851 t^o. \quad (5)$$

Таким чином, необхідно враховувати, що на вихідний сигнал п'єзовипромінювача суттєво впливає зміна температури повітря та менш значуще атмосферний тиск і відносна вологість повітря, тому до складу такої приладової системи мають входити сенсори кліматичних параметрів з подальшим використанням їх показів для підвищення точності навігаційно-часових визначень (НЧВ). Хоча ультразвукові сенсори є недорогими, однак система керування рухом МР може не зреагувати на об'єкти (камені, пні дерев), які потрапили у мертву зону сенсорів. Система також не буде реагувати на м'які предмети, що поглинають ультразвук (вата), та на об'єкти, що відбивають звук у бік від сенсорів (гладкі круглі об'єкти та рівний схил). Також система може помилково попереджати про наближення до перешкоди у дощ або снігопад і не зможе виявити ями, провали у асфальті, відкриті каналізаційні люки та розкидані невеликі гострі предмети.

Оптичні методи визначення параметрів руху мобільних роботів

Оптичні або лідарні методи вимірювання параметрів руху в мобільній робототехніці реалізуються

при використанні в навігаційній системі МР лідара.

Лідар (*Light Identification Detection and Ranging* – світлове виявлення та визначення дальності) – технологія отримання та обробки інформації про віддалені об’єкти за допомогою активних оптичних систем, які використовують явища відбиття світла та його розсіювання в прозорих та напівпрозорих середовищах. Лідар (або лазерний радар) як прилад є як мінімум активним далекоміром оптичного діапазону. Скануючі лідари в системах машинного зору формують дво- або тримірну картину навколишнього простору, а “атмосферні” або доплерівські лідари визначають напрямок і швидкість переміщення, а також прискорення. Однак вони мають невисоку надійність при визначенні параметрів руху об’єктів, тому що відбиття від похилих площин складної форми «заплутують» лідар.

Лідар кругового огляду безпілотного транспортного засобу розробки Університету бундесверу в Мюнхені має кутову роздільну здатність $0,01^\circ$ при динамічному діапазоні оптичного приймача $1:10^6$, що відповідає ефективному радіусу огляду 120 м, а для досягнення прийнятної швидкості сканування використовує пучок з 64 розбіжних лазерних променів (один повний «кадр» вимагає одного обороту дзеркала [10]). Використовується разом з спрямованою мультифокальною камерою огляду та безплатформною інерціальною навігаційною системою (БІНС). Крім того, лідар є одним з основних компонентів навігаційної системи безпілотних автомобілів *GoogleCar* та *Tesla*.

Системи машинного зору ближнього радіусу дії для роботів, основані на скануючому лідарі IBM, формують циліндричну розгортку з кутом охоплення горизонту 360° і вертикальним кутом зору до $(-30\dots+30)^\circ$. Відстань до цілей (при носійній 10 МГц – не більше 15 м) пропорційна зсуву фаз між опорним генератором, модулюючим джерело світла, та відбитим сигналом. Лідар IBM має високу кутову роздільну здатність, на практиці обмежену тільки швидкістю процесора, що обробляє тривимірну «картинку» лідара, та системи автоматичного регулювання рівня сигналу на виході приймача [11].

Перевагами лідара є малі розміри, великий кут огляду (до 360°), значний радіус дії до 250 м, невисока вартість та безпечність для ока людини, а недоліками – чутливість до зміни рельєфу місцевості та зменшення ефективності при погіршенні погодних умов (дощ, сніг, туман) і при забрудненні сенсора [3].

Радарні методи визначення параметрів руху мобільних роботів

Такі методи основані на використанні радара або радіолокаційної станції (від *Radio Detection and Ranging* – радіовиявлення і вимірювання дальності) – системи для виявлення рухомих об’єктів, а також для визначення дальності до них, їх швидкості, прискорення та геометричних параметрів. За принципом дії радари діляться на первинні або пасивні, вторинні або активні та комбіновані.

Пасивний радар використовується для виявлення рухомих об’єктів при опроміненні їх радіосигналом та наступним прийомом відбитого сигналу. Оскільки швидкість радіосигналів (швидкість світла) є сталою, то відстань до об’єкта визначають за результатами вимірювань різних параметрів відбитого сигналу.

Відмінності в принципі дії радарів основані на різних методах формування випроміненого та обробки відбитого сигналу. При частотному методі випромінюється неперервний сигнал, частота якого за період змінюється за лінійним законом від f_1 до f_2 , а час запізнення визначається за різкою зміною частоти різницевого сигналу. Перевагами такого методу є можливість вимірювання малих відстаней і використання малопотужного передавача, а недоліками – необхідність використання двох антен, високі вимоги до лінійності зміни частоти та погіршення чутливості приймача внаслідок потрапляння через антену в приймальний тракт випромінення передавача, інтенсивність якого є випадковою величиною.

Фазовий (когерентний) метод оснований на виділенні та аналізі різниці фаз між випроміненим та відбитим від об’єкта сигналом, яка виникає за рахунок ефекту Доплера при відбитті сигналу від рухомого об’єкта. Передавач може працювати як в неперервному, так і в імпульсному режимі. Даний метод дозволяє виявляти тільки рухомі об’єкти, що виключає завади від нерухомих об’єктів, розташованих між приймачем та об’єктом (або за ним). Недоліками методу є погіршення чутливості приймача та низька роздільна здатність за дальністю [3].

Імпульсний метод використовується в радарях при випроміненні коротких імпульсних сигналів тривалістю $(1\div 10)$ мкс та шпаруватістю $10^3\div 10^4$, величина якої залежить від максимальної дальності виявлення, потужності передавача, коефіцієнта спрямованої дії антени та чутливості приймача. Перевагами такого методу є можливість побудови радара з однією антеною і можливість вимірювання дальності до декількох об’єктів, а недоліками – необхідність генерування великих імпульсних потужностей передавача та порівняно велика мертва зона.

Для виключення пасивних завад в імпульсних радарях використовується селекція рухомих цілей (СРЦ), при якій порівнюються відбиті сигнали як мінімум від двох випромінених імпульсів.

Недоліком, який не виключається СРЦ при постійній частоті імпульсів, є неможливість виявлення об'єктів зі специфічними швидкостями, що відповідають зміні фаз на $2\pi l$. Для виключення цього недоліку радар випромінює імпульси з різними частотами повторення.

В імпульсно-доплерівських радарів, на відміну від радарів з СРЦ, прийнятий сигнал з інформацією про об'єкти та завади подається на вхід блоку фільтрів Доплера, кожний з яких пропускає сигнал визначеної частоти та обчислює похідну від сигналу. Такі радары можуть знаходити об'єкти із заданими швидкостями та реалізуються як апаратно, так і програмно. Сучасні радары реалізуються в основному програмно, тому що мають ряд переваг: можливість вибору алгоритму, зміни його параметрів, а також додавання алгоритмів при зміні прошивки [3].

Вторинні радары використовуються для впізнання об'єктів, а їх особливістю є використання активного відповідача на об'єкті для визначення його положення і параметрів руху. Їх перевагами є більші точність та дальність виявлення, наявність додаткової інформації про об'єкт і менша потужність випромінювання.

Радар разом з системою керування рухом МР дозволяє обчислювати відстань до навколишніх перешкод і підтримувати таку швидкість, щоб знаходитися від них на безпечній відстані. Ефективним використанням радарного сенсора є у таких випадках [2]:

- фіксація зближення з перешкодами на небезпечну відстань та попередження зіткнень при прямолінійному русі та поворотах; типова ближня зона, контрольована радаром, $(0,5 \div 5)$ м;
- при переміщенні МР у групі або поряд з іншими рухомими об'єктами радар дозволяє системі керування зафіксувати факт гальмування рухомого об'єкту в напрямку переміщення за час порядку 0.1 с від початку гальмування; типова середня зона, контрольована радаром, $(5 \div 30)$ м;
- попередження про швидкісні рухомі об'єкти; типова дальня зона, що контролюється радаром, до 150 м;
- попередження про небезпеку наїзду на перешкоду при переміщенні заднім ходом; типова контрольована зона $(0 \div 10)$ м.

Система керування рухом МР, яка зазвичай є адаптивною, підтримує його швидкість на заздалегідь визначеному для даного типу місцевості і покриття рівні доти, поки ніщо не перешкоджає руху. Модуль контролю використовує інформацію, отриману від радарного сенсора та сенсорів швидкості і прискорення. Якщо перед МР з'являється об'єкт, система автоматично регулює швидкість для підтримання або неперевищення заздалегідь визначеної безпечної відстані між об'єктами. Радар може бути як самостійним пристроєм, так й інтегрованою частиною модуля системного контролю МР. Для забезпечення ефективної роботи основний радарний сенсор має знаходитися в передній частині МР і бути орієнтований у напрямку його переміщення.

Результатом впровадження сучасних радарних технологій є мультурежимний електронно-скануючий радар *ESR (Electronically Scanning Radar)* від *Delphi Automotive* з використанням новітніх розробок фірми *TriQuint*. Крім загальних переваг електронного сканування у порівнянні з механічним, *Delphi ESR* має широку область огляду і в середньому, і в дальньому діапазонах та забезпечує два вимірні режими одночасно. У середньому діапазоні (до 60 м) *ESR* ідентифікує рухомі об'єкти та перешкоди, а в дальньому (до 174 м) забезпечує точне детектування діапазону і даних швидкості та прискорення з дискримінацією до 64 цілей на шляху МР. Рішення *TriQuint* на основі *GaAs*-технології в частотному діапазоні $(76.55 \div 76.78)$ ГГц забезпечують високі робочі характеристики та надійність, масштабований гнучкий системний підхід, а також вартісну ефективність при споживанні потужності 0.955 Вт [12].

Радарні ІС серії *RASIC (Radar System IC)* забезпечують функції трансиверів, осциляторів (*VCO*), діелектричних резонансних осциляторів (*Dielectric Resonator Oscillators, DRO*) та інші для всіх типів мобільних і промислових радарних застосувань в діапазоні $(76-77)$ ГГц. Рішення від *Infineon* поставляються як некорпусовані кристали *bare-die*, стійкі в робочому температурному діапазоні $(-40 \dots +125)$ °С при забезпеченні самотестування та діагностичних опцій для вихідних даних і температури. Кристал *Infineon RASIC* використовується в нових радарних системах третього покоління *Bosch LRR3*, які працюють в діапазоні до 250 м і реалізують основні радарні функції безпеки [13].

Ще одним радарним рішенням діапазону 77 ГГц, що забезпечує функціональність моніторингу оточення навколо МР в дальньому і середньому діапазонах, є чіпсет від *Freescale* з матеріалу *SiGe* [3], радарна система якого основана на мультिकанальних ресиверах і трансмітерах з високим рівнем інтеграції. В системі попередження про зіткнення контрольований *MCU* трансмітер на 77 ГГц випромінює сигнали, які, відбиті від об'єктів, що знаходяться попереду, збоку, ззаду, захоплюються за допомогою множинних ресиверів, інтегрованих в МР. Сенсорний модуль являє собою: повністю інтегрований трансмітер *SiGe*; мультिकанальний *SiGe RF* ресивер з високою ізоляцією між каналами і низькими шумами; повністю інтегрований *RF* трансивер *SiGe*. Радари від *Freescale* дозволяють отримати ефективне рішення за співвідношенням ціна/якість [14]. Високошвидкісне поширення

сигналів, скомбіноване з алгоритмом *2D-FFT*, допускає незалежні вимірювання діапазону і швидкості (*range rate*) та забезпечує виявлення кластерних стаціонарних об'єктів.

Інші виробники розробляють аналогічні рішення для здійснення широкого набору функцій моніторингу в діапазоні 360° на основі комбінування вхідних даних від нечисленних і недорогих незалежно працюючих або інтегрованих сенсорів/модулів. Одним з прикладів є нова радарна концепція від *TRW*, яка представлена лінійкою короткодіапазонних масштабованих радарів, що допускають детектування в діапазоні 360° навколо МР. Інтелектуальні та когнітивні (пізнавальні) системи безпеки від *TRW* роблять останні інновації в області безпеки доступними для всіх сегментів ринку мобільної електроніки.

Відповідно до цього нова радарна концепція *TRW* розробляється як масштабоване рішення на основі обмеженого набору сенсорів для груп застосувань. Це рішення підходить для планування на старті тільки базових функцій з наступним апгрейдом. Наприклад, система низького рівня складається з одного сенсора переднього огляду для низькошвидкісного попередження про зіткнення, система середнього рівня може додатково включати пару радарів заднього огляду, а система високого рівня може бути додатково оснащена сенсорами для огляду бічних зон.

Умовою ефективної роботи всієї системи керування рухом МР є точне настроювання та установка сенсорів. За статистикою фірми *Bosch* [15, 16], горизонтальне зміщення сенсора на величину (0,5...1)° приводить до зменшення ефективності системи на (25...40)%, а відхилення більше ніж на 1° приводить до невиконання функцій радарним сенсором. Для настроювання радарного сенсора необхідне скануюче обладнання з лазерним діагностуванням. Деякі моделі радарних сенсорів мають опцію самонастроювання. В цьому випадку МР в тестовому режимі має здійснити переміщення відносно декількох стаціонарних об'єктів, при цьому чим більшою буде кількість стаціонарних об'єктів, тим швидше відбудеться внутрішнє настроювання системи керування. При переміщенні МР по вузьким проїздам (рух по вузьким вулицям міста або у приміщенні) радарні сенсори полегшують реалізацію складних маневрів. Залежно від вимог до якості руху МР до складу системи керування може входити від 2 до 8 радарних сенсорів.

Для попередження зіткнень радарні сенсори мають визначати азимутальні координати об'єктів. Для цього виробники радарних сенсорів використовують багатопроменеву перемикальну антену або механічно скануючу антену (*Bosch* – три промені, що перемикаються; *Fujitsu Ten Delphy* – один механічно скануючий промінь; *Autocruiсе* – один промінь підсвітки та два (сумарний і різницевий) для прийому). Загальним рішенням для всіх ситуацій є антена з електронним скануванням, кут огляду якої змінюється залежно від ситуації на місцевості (дальності й типу нерухомих перешкод або рухомих об'єктів). Аналіз вимог до радарних сенсорів показує, що оптимальні параметри щодо виявлення типових перешкод при відстані до них (0,5...20) м реалізуються тільки електронною скануючою антеною зі змінним кутом огляду від 10° до 45°.

Більш високий рівень інтеграції і зниження ціни сприяють масштабуванню радарної технології, а також дозволяють інтегрувати її з іншими сенсорними технологіями для розширення набору застосувань та переходу до комплексного інтегрування технологій і застосувань.

Радари працюють в діапазонах К (18÷27) ГГц (ближня і середня зони) та W (75÷110) ГГц (дальня зона) (за класифікацією ІЕЕЕ/ІТУ). Використання радарних сенсорів в мобільній робототехніці є доцільним при повному тумані, інтенсивному дощу або снігопаді, сильному задимленні атмосфери або при сліпучому світлі. Порівняння ефективності використання різних методів вимірювання за різних погодних умов наведено в табл. 2, що підтверджує всепогодну ефективність радарних методів [3].

Таблиця 2. Ефективність локаційних методів за різних погодних умов

Погодні умови	Радарні методи	Візуальна одометрія	Ультразвукові методи	Оптичні методи
Денне світло	+	+	+	+
Сліпуче світло	+	+/-	+	+/-
Темнота	+	-	+	+
Бруд і сльота	+	+/-	-	+/-
Дощ, сніг, мокрий сніг	+	+/-	-	-

Дестабілізуючі фактори локаційних методів

При використанні ультразвукових локаційних методів вимірювання параметрів руху в розрахункових співвідношеннях присутня швидкість ультразвуку в середовищі. Як відомо [4], фактичне значення швидкості ультразвуку в реальних умовах змінюється в залежності від температури

повітря, тиску та вологості, досягаючи максимального відхилення до $\pm 5\%$ (відповідно і похибка вимірювання параметрів руху доходить до 5%). Якщо не враховувати температурну залежність швидкості звуку в повітрі, то при відхиленні температури навколишнього середовища на 1°C виникає похибка $\Delta V_3(1^\circ\text{C}) \cong 0.6 \text{ м/с}$, яка приводить до відносної похибки вимірювання відстані порядку 0.175% .

Неврахований вплив вологості повітря при нормальному атмосферному тиску приводить до виникнення похибки визначення швидкості ультразвуку, яка не перевищує 0.5 м/с [5]. Тому що точність оцінки визначення швидкості ультразвуку в повітрі суттєво впливає на точність НЧВ, то в навігаційних системах МР мають використовуватися спеціальні корегувальні пристрої для розрахунку дійсної швидкості ультразвуку за спеціальними емпіричними формулами з врахуванням інформації з сенсорів температури, тиску, вологості та швидкості й напрямку вітру (при цьому похибка корегування складає приблизно $0,1\%$) [9].

При визначенні прискорення оптичними і радарними методами проводять оцінку фазового зсуву прийнятого коливання відносно опорного:

$$\Delta\varphi = \varphi_{np} - \varphi_{on} = \omega_m t_3 + \Delta\varphi_D + \Delta\varphi_{BO},$$

де φ_{np} та φ_{on} – повні фази прийнятого і опорного коливань; ω_m – циклічна частота модулюючого (масштабного) коливання; t_3 – час затримки сигналу; $\Delta\varphi_D$ – набіг фази у вимірювачі; $\Delta\varphi_{BO}$ – набіг фази при відбитті сигналу від об'єкта.

Оцінка прискорення об'єкту визначається співвідношенням [3]

$$\hat{a} = \frac{c}{2t_B^2} \left(\Delta t_3 + \frac{(\Delta\varphi_D + \Delta\varphi_{BO})\Delta\omega_m}{\omega_m^2} \right),$$

де c – швидкість поширення сигналу (світла); t_B – час вимірювання (оцінки прискорення); Δt_3 – зміна часової затримки сигналу за час вимірювання.

Точність оцінки прискорення залежить від співвідношення сигнал/ шум q :

$$\sigma_a = \frac{c}{mq\omega_m\sigma_t^2},$$

де m – коефіцієнт модуляції сигналу; σ_t – СКВ оцінки часу вимірювання.

Для зменшення СКВ σ_a необхідно збільшувати частоту модуляції, однак її величина має враховувати принцип однозначності визначення параметрів руху:

$$\frac{2\hat{a}_{\max}}{c}\omega_m t_B^2 \leq 2\pi \Rightarrow \omega_m \leq \frac{\pi c}{\hat{a}_{\max} t_B^2}.$$

Для боротьби з завадами використовуються такі методи селекції [17]:

- обмеження мінімальної вимірюваної відстані (стробування);
- вибір об'єкту за його порядковим положенням (перший, другий, останній);
- селекція сигналів за їх формою (ефективна для боротьби з завадою зворотного розсіювання тривалістю $(1\div 2)$ мкс зі спектром в діапазоні $(0\div 300)$ кГц);
- амплітудна порогова селекція (часове автоматичне регулювання підсилення або порогу спрацьовування);
- амплітудна селекція об'єкту за максимальним відбитим сигналом (з поправкою на залежність амплітуди від дальності);
- амплітудно-часова напівавтоматична селекція з врахуванням апріорної інформації про дальність до вибраного об'єкту.

При великих відстанях до об'єкту відбитий від нього сигнал зменшується до рівня шумів, а визначальним стає енергетичний потенціал вимірювача, що характеризується енергією та розходженням зондувального променя, діаметром і коефіцієнтом спрямованої дії антени, чутливістю приймально-підсилювального тракту, а також ефективністю засобів селекції об'єкту (просторової та амплітудно-часової) на фоні місцевих завад, ефективна відбивальна поверхня яких може бути більшою, ніж у малорозмірних на таких відстанях об'єктів [3].

Діапазон середніх відстаней починається з відстані, для якої завада зворотного розсіювання не впливає на приймальний тракт, і закінчується відстанню, для якої кутові розміри об'єкту стають сумірними з робочим полем вимірювача. Є найбільш зручним для проведення вимірювань через достатню спостережуваність об'єкту і можливість його селекції на фоні завад, а також внаслідок

сприятливих енергетичних умов приймання і обробки відбитого сигналу.

При вимірюванні малих відстаней робота вимірювача ускладнена близько розташованими об'єктами з високим рівнем відбитого сигналу, що перевантажує приймальний тракт і приводить до погіршення точності та розділової здатності вимірювача. Частково цей недолік компенсується неповним перекриттям полів приймального та передавального каналів на малих відстанях, що характеризується коефіцієнтом перекриття цих полів (залежність коефіцієнта перекриття від відстані є апаратною функцією вимірювача або геометричним фактором [18]).

Висновки

1. Проведений аналіз локаційних методів визначення параметрів руху мобільних роботів (ультразвукових, радарних та оптичних). З'ясовано, що на даний час підвищується як попит на сенсори для систем навігації, так і характеристики нових пристроїв – точність, надійність, компактність, економічність, інтелектуальність, зменшення ціни компонентів (при зменшенні загальної ціни сучасної системи на їх основі та кількості зовнішніх дискретних елементів). В розвитку систем навігації актуалізується тенденція розміщення в одному інтегральному корпусі і, за можливістю, на одному кристалі, мікромеханічних та мікроелектронних пристроїв, сенсорів температури, схем обробки та пристроїв, що виконують мікрооптичні функції.

2. При вірному врахуванні властивостей та особливостей локаційного сенсора, характерних для даної технології, можна значно підвищити технічні параметри навігаційної системи МР, що характеризують його здатність детектувати нахил, рух, положення, вібрацію та удар.

3. Проаналізовано вплив дестабілізуючих факторів, таких як кліматичні (температура, тиск, вологість), шуми та завади на процес вимірювання прискорення локаційними методами.

Список літературних джерел

1. Рудик, А. В. Методи оцінки просторового положення об'єктів / А. В. Рудик // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2016). Матеріали 9-ої міжнародної НПК. – Київ : НАУ, 2016. – С. 31-33.
2. Рудик, А. В. Багатофункціональні сенсори для мобільної робототехніки / А. В. Рудик // Вісник Інженерної академії України. – 2016. – №1. – С. 30-36.
3. Рудик, А. В. Наукові основи та принципи побудови приладової системи вимірювання прискорення мобільного робота. Монографія / А. В. Рудик, В. П. Квасніков. – Харків : Мачулін, 2018. – 272 с.
4. Колесников, А. Е. Ультразвуковые измерения / А. Е. Колесников. – М. : Издательство стандартов. – 1982. – 248 с.
5. Рудик, А. В. Оцінка швидкості ультразвуку в повітрі при реалізації системи ультразвукового зору / А. В. Рудик // Інформаційно-обчислювальні технології, автоматика та електротехніка (ІТАЕ-2016). Матеріали міжнародної НПК. – Рівне : НУВГП, 2016. – С. 273-275.
6. Кашкаров, А. П. Радиоэлектронные конструкции на любой вкус / А. П. Кашкаров. – М. : Эксмо, 2008. – 368 с.
7. Балдев, Радж. Применения ультразвука / Радж Балдев, В. Раджендран, П. Паланичами. – М. : Техносфера, 2006. – 575 с.
8. Квасніков, В. П. Врахування робочих умов вимірювання параметрів руху об'єктів в математичній моделі формування результату вимірювання / В. П. Квасніков, А. В. Рудик // Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості. – 2016. – № 2 (9). – С. 41-45.
9. Рудик, А. В. Исследование влияния климатических факторов на оценку точности ультразвукового дальномера системы технического зрения мобильного робототехнического комплекса / А. В. Рудик // Вестник Азербайджанской Инженерной Академии. – 2018. – Т. 10. – № 1. – С. 122-132.
10. The Cognitive Autonomous Vehicles of UniBwM: VaMors, VaMP, MuCAR-3: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.munichnetwork.com/fileadmin/user_upload/konferenzen/mobilitaetsforum-3/080924WuenscheProfDr HansJoachim_RobotCar. (Дата звернення: 11.02.2016).
11. Argall, P. S. Lidar measurements taken with a large-aperture liquid mirror. 2. Sodium resonance-fluorescence system / P. S. Argall, O. N. Vassiliev, R. J. Sica // Applied Optics. – 2000. – Vol. 39, No. 15. – P. 2393-2400.
12. Active Safety Delphi Electronically Scanning Radar: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://delphi.com/manufacturers/auto/safety/active/electronically-scanning-radar>. (Дата звернення: 21.03.2016).
13. Multi-channel 77 GHz radar transceiver chipset: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.nxp.com/products/rf/millimeter-wave-solutions/radar-technology/multi-channel-77-ghz-radar-transceiver>. (Дата звернення: 11.03.2016).

надати воді високих кондицій якості. Досліджено інтенсивність асиміляції фосфатів нитчастими водоростями та ряскою, визначено її залежність від інтенсивності освітлення в умовах фітореактора з рясковими.

Ключові слова: біологічне очищення води, видалення фосфору та нітрогену, УЗВ, біотехнологія

УДК 621.317

Градуювання оптичного акселерометра / О.М. Безвесільна, Л. Мезинцев//Вісник Інженерної академії України. – 2018, - № 2 – С.152

В статті наведено відомості щодо створеної градууювальної установки та проведених на ній досліджень оптичного акселерометра у лабораторних умовах

Ключові слова: акселерометр, градууювальна характеристика, прискорення.

УДК 321.617

Градуювання засобу вимірювання концентрації іонів складових елементів гумусу в ґрунті / О. М. Васілевський, В. М. Дідич //Вісник Інженерної академії України. – 2018, - № 2 – С.158

Запропоновано спосіб градуювання засобу вимірювання концентрації іонів на основі еталонних розчинів, що дозволяє отримувати статичні характеристики засобів вимірювання концентрації іонів калію, фосфату, амонійного і нітратного азоту при використанні різних іон-селективних перетворювачів. Отримані електродні функції дозволяють виконувати вимірювання концентрації іонів складових елементів гумусу в ґрунті з підвищеною точністю та вносити коригування при відхиленні температури досліджуваного середовища від нормальних умов.

УДК 621.317

Оптимізація шім-керування двигуном постійного струму для високоточних приводів / В.П. Квасніков, О.І. Осмоловський, А.П. Стахова //Вісник Інженерної академії України. – 2018, - № 2 – С.165

Запропоновано варіант практичної реалізації широтно-імпульсного керування двигуном постійного струму з лінеаризованою передатною характеристикою “вхідна команда ШІМ – усереднений за період струм в обмотці двигуна”. За допомогою розробленої в середовищі графічного програмування LabVIEW моделі контуру стабілізації швидкості підтверджено факт розширення смуги пропускання та діапазону регульованих швидкостей слідкуючого електроприводу. Досліджено динамічні властивості системи керування приводом в граничних режимах по швидкості, а саме при наблизенні до максимальних і при надмалих значеннях обертів. Простота і компактність рішення дозволяє застосовувати привод у складі багатофункціональних прецизійних механічних систем, зокрема в робототехніці, авіабудуванні, обробляючому і контролюючому устаткуванні.

Ключові слова: прецизійні приводи, динамічна точність, слідкуючі системи.

УДК 621.317.08

Аналіз локаційних методів визначення параметрів руху мобільних роботів / В.П. Квасніков, А.В. Рудик, В.А. Рудик, М.І. Матей //Вісник Інженерної академії України. – 2018, - № 2 – С.170

В статті проведений аналіз локаційних методів визначення параметрів руху мобільних роботів (ультразвукових, радарних та оптичних). З’ясовано, що на даний час підвищується як попит на сенсори для систем навігації, так і характеристики нових пристроїв – точність, надійність, компактність, економічність, інтелектуальність, зменшення ціни компонентів. В розвитку систем навігації актуалізується тенденція розміщення в одному інтегральному корпусі і, за можливістю, на одному кристалі, мікромеханічних та мікроелектронних пристроїв, сенсорів температури, схем обробки та пристроїв, що виконують мікрооптичні функції. При вірному врахуванні властивостей та особливостей локаційного сенсора, характерних для даної технології, можна значно підвищити технічні параметри навігаційної системи щодо детектування нахилу, руху, положення, вібрації та удару. Проаналізовано вплив дестабілізуючих факторів (температура, тиск, вологість, шуми та завади) на процес вимірювання прискорення локаційними методами.

ТЕОРЕТИЧНИЙ І НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ
ІНЖЕНЕРНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ



В І С Н И К
ІНЖЕНЕРНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ
ВИПУСК 2 2018

Підп. до друку 30.05.2018р. Формат 60×84/8. Папір офсет. № 1.
Гарнітура Тип Таймс. Друк офсет. Ум. друк. арк. 33,1
Обл.-вид. арк. 35,6. Наклад 300 прим. Зам. № _____

Відруковано: СПД «Андрієвська Л.В.»
м. Київ, вул. Бориспільська, 9,
Свідоцтво серія ВОЗ № 919546 від 19.09.2004 р