

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

Київ 2019 Kyiv

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
Центральноукраїнського національного технічного університету

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

Протокол № 7 від 25.05.2019р
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.7 dated 25.05.2019
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:
Центральноукраїнський національний технічний університет
Інженерна академія України
Одеська державна академія технічного регулювання та якості

Cofounders:
Центральноукраїнський національний технічний університет
Engineering Academy of Ukraine
Odessa State Academy of Technical Regulation and Quality

ISSN 2519-8793 ISSN 2519-8793

УДК 621.317.08

А.В. Рудик, д.т.н.,
В.А. Рудик,
М.І. Матей

АНАЛІЗ ОДОМЕТРИЧНИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ

Національний університет водного господарства та природокористування (м. Рівне), a.v.rudyk@nuwm.edu.ua

В статті представлена реалістична модель вимірювань одометра, яка передбачає врахування основних впливових на результат вимірювання чинників. Проведено порівняння позиційної та швидкісної інтерпретації вимірювань одометра з інформаційної точки зору та з'ясовано, що для задач інтеграції варто використовувати позиційну інтерпретацію показань одометра та одометричне кінематичне числення. За векторною інтерпретацією приросту пройденої відстані виділено моделі векторного вимірювання приросту координат та векторного швидкісного вимірювання. Розглянуто основні одометричні вимірювальні алгоритми.

Ключові слова: одометричні методи, мобільний робот, енкодер, стереозір, технічний зір, одометрія, візуальна одометрія, вимірювання відстані.

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, локаційні, енкодери і відео (моно- та стереокамери) [1].

Для управління мобільним роботом при його переміщенні по деякій траскторії необхідною є система визначення місцезнаходження та орієнтації у просторі. Однак перераховані вище типи сенсорів мають власні недоліки: використання енкодерів неможливе без просковзування коліс, інерціальні системи накопичують похибку, GPS недостатньо точна для локальної навігації та нестійка в закритих приміщеннях, а система з далекоміром складна та має високу складність.

Збільшення продуктивності вбудованих обчислювачів дозволяє обробляти відеодані бортової системи технічного зору мобільного робота в реальному часі та використовувати їх для розв'язання все більш складних задач, зокрема для навігації.

В статті основна увага приділяється одометричним технологіям, які використовуються не тільки в традиційній галузі навігації та керування рухом, але й в геодезії, топографії, метрології, логістиці та ін. Галузі використання одометричних сенсорів постійно розширюються через їх малі габаритні розміри, енергоспоживання і собівартість [2]. Одометричні сенсори забезпечують широкий діапазон вимірювань та мають точнісні характеристики навігаційних систем (НС) низького та середнього класів. Однак вимоги до точності одометричних 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 подальшої експлуатації.

Метод візуальної одометрії оснований на вимірюванні зміщення ключових точок у просторі, інформацію про які отримують з аналізу послідовності стереозображень системи технічного зору. Така система може працювати в недетермінованому середовищі, дозволяє розв'язувати суміжні задачі, такі як побудова карти приміщення.

При цьому однією з найважливіших є задача визначення точного місця розташування робота – проблема локалізації або позиціонування. Ця проблема є важливою тому, що інформація про точне місцезнаходження робота необхідна для вирішення більш складних і комплексних завдань навігації, а також побудов траєкторії переміщення та карти навколишнього середовища. На даний час існує кілька різних підходів до розв'язання проблеми локалізації, в яких застосовуються різні сенсори та алгоритми обробки даних. Так, в роботі [3] розглянуто підхід до локалізації, оснований на аналізі даних сенсорів пройденої відстані, а в роботі [4] описаний ймовірнісний підхід до локалізації та картографування на основі SLAM-методик з використанням лазерного сканера або далекомірів. Однак будь-які методи оцінки позиції робота мають похибки, зумовлені різними чинниками фізичного середовища, для оцінки яких та уточнення реальної позиції робота також існують різні методики. Так, в роботі [5] розглянуто підхід на основі розрахунку матриць коваріації, а в роботі [6] – метод оцінки помилки одометрів на основі навігаційних даних мобільного робота. Класичною в даному напрямку є робота [7], де розроблена методика калібрування і корекції похибки одометрів,

а також запропоновані методи проведення експерименту для оцінки різних чинників, що впливають на похибку. В роботі [8] виконано порівняльний аналіз декількох різних підходів до оцінки похибки одометрів, одним з яких є метод нейронних мереж. У цій роботі для оцінки похибки одометрів використовується багатосаровий перцептрон та доведена актуальність досліджень в області нейромережевих технологій оцінки похибок сенсорів позиціонування.

В літературі також відомий метод візуальної одометрії, який дозволяє обчислювати поточні координати мобільного робота за допомогою системи тривимірного технічного зору. Результати досліджень такої системи показали, що візуальний одометр дозволяє з частотою 10 Гц та вимірювати переміщення робота з похибкою до 7% та курсовий кут з точністю до 10%. При дослідженнях візуальний одометр не задіявся в контурі системи керування робота, а точність і час обчислення координат оцінювалися незалежно.

Розроблені на даний час методи та засоби вимірювання не є достатньо ефективними для розв'язання задач вимірювання параметрів руху об'єктів в складних кліматичних умовах та при дії різних дестабілізуючих факторів з достатньою точністю. Більшість з них характеризуються складністю, недостатніми швидкістю та точністю, а також недосконалістю математичного та програмного забезпечення. Тому постає питання необхідності вдосконалення приладових систем вимірювання параметрів руху МР, розробки нових і удосконалення існуючих методів та засобів вимірювання з покращеними метрологічними характеристиками і алгоритмічною обробкою даних про параметри руху на фоні шумів і завад різного роду [9].

Постановка задачі

В статті необхідно:

- 1) розробити реалістичну модель вимірювань одометра, в якій врахувати основні впливові на результат вимірювання чинники;
- 2) порівняти позиційну та швидкісну інтерпретації вимірювань одометра з інформаційної точки зору;
- 3) за векторною інтерпретацією приросту пройденої відстані виділити різні моделі векторного одометричного вимірювання;
- 4) розглянути основні одометричні вимірювальні алгоритми.

Реалістична модель вимірювань одометра

Одометрія – використання даних про рух приводів для оцінки переміщення і не є методом визначення положення. Використовується в МР для підрахунку пройденої відстані. В типових схемах одометрії МР використовуються енкодери, які зчитують кут повороту коліс (рис. 1, а). При використанні в енкодерах коду Грея можна відслідковувати не тільки кут, але й напрямок обертання.

Одометр є пристроєм, що вимірює кількість обертів колеса. Первинною вимірювальною інформацією є цілі числа N_i , які визначаються показаннями цілочисельного лічильника парціальних кутів повороту колеса на інтервалі часу $[t_0, t_i]$ (в початковий момент часу t_0 для визначеності приймають $N_0 = 0$). Якщо прийняти, що n – кількість рівномірно розподілених по окружності колеса міток (роздільна здатність), то величина парціального кута $\Delta\alpha$ в радіанах:

$$\Delta\alpha = \frac{2\pi}{n}.$$

Якщо R – значення радіуса колеса, то пройдений шлях s точкою контакту колеса з поверхнею дороги на інтервалі часу $[t_0, t_i]$ буде дорівнювати:

$$s(t_i) = \frac{2\pi R N_i}{n} = K N_i, \quad K = \Delta\alpha \cdot R, \quad (1)$$

де K є масштабним коефіцієнтом одометра, що переводить первинні цілочисельні вимірювання в пройдений шлях, при цьому зміна стану лічильника N_i відбувається саме в момент часу t_i .

Різниця $\Delta N_i = N_i - N_{i-1}$ характеризує пройдений шлях Δs_i протягом інтервалу часу $[t_{i-1}, t_i]$:

$$\Delta s_i = K \cdot \Delta N_i.$$

Це є дійсне значення приросту шляху, якщо саме в моменти часу t_{i-1}, t_i відбувалося збільшення стану лічильника з величини N_{i-1} до величини N_i .

Ідеалізована модель одометра є моделлю давача, зв'язаного з повздовжньою віссю об'єкта, що дискретно вимірює пройдений шлях $s(t_i)$ (скалярну величину) приведенного центру мас об'єкта M ,

що знаходиться на цій осі. При цьому вважають, що:

- рух об'єкту відбувається без просковзувань;
- об'єкт постійно зчеплений з дорогою, тобто не підстрибує та не провалюється, а також відсутній знос об'єкту в поперечному напрямку.

Це дозволяє перейти від скалярної інтерпретації вимірювання приросту переміщення одометром до векторної: вектор переміщення МР в осях зв'язаної з корпусом системи координат M_S є вектором з двома нульовими компонентами (проекції на бічну M_{S_1} та вертикальну M_{S_3} осі) та однією ненульовою компонентою Δs_i (при переміщенні МР) вздовж повздовжньої осі M_{S_2} :

$$\Delta s_s = (0, \Delta s_i, 0)^T. \quad (2)$$

Аналогічна інтерпретація справедлива для будь-якої локальної повздовжньої середньої швидкості V_i на інтервалі часу $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$:

$$V_s = (0, V_i, 0)^T, \quad V_i = \frac{\Delta s_i}{\Delta t_i}, \quad (3)$$

де V_s – вектор дійсної відносної швидкості точки M у зв'язаній системі координат M_S .

Реалістична модель вимірювань одометра s'' передбачає врахування таких факторів [10].

1. Відносна похибка масштабного коефіцієнта k , за допомогою якого первинне вимірювання переводиться у пройдено відстань:

$$\frac{K''}{K} = 1 + k,$$

де K – номінальне значення масштабного коефіцієнта, K'' – значення, яке використовується для обчислень.

Будемо вважати, що в даній моделі похибка k не змінюється з часом.

2. Наявність зони нечутливості вимірювання, обумовлена цілочисельністю первинної вимірювальної інформації. Розглянемо інтервал часу $[t_{i-1}, t_i]$ зі значеннями лічильника N_{i-1}, N_i . В даному випадку вимірюваний приріст переміщення $\Delta s_i''$ є сумою дійсного приросту переміщення Δs_i , помилкою від похибки масштабу k , а також випадкової похибки Δs_i^s :

$$\Delta s_i'' = K''(N_i - N_{i-1}) + \Delta s_i^s = \Delta s_i + k\Delta s_i'' + \Delta s_i^s.$$

Наявність випадкової складової пов'язано з тим, що нерухома точка колеса, що контактує з дорогою, випадковим чином може знаходитися на дузі парціального кута повороту колеса (інакше це помилка синхронізації знімаємих даних з одометра та інерціальних сенсорів). Для параметра Δs_i^s можна використовувати модуль випадкової величини, рівномірно розподіленої на інтервалі $[0, K]$.

3. Похибки, що залежить від повздовжньої швидкості та повздовжнього прискорення, а також похибки, обумовлені ненульовим кутом зносу при повороті МР.

4. Несоосність вимірювальної осі одометра та повздовжньої приладової осі БІНС M_{Z_2} . Дана помилка описується за допомогою введення вектору малого повороту $\vartheta_Z = (\vartheta_{Z_1}, \vartheta_{Z_2}, \vartheta_{Z_3})^T$, який характеризує взаємну орієнтацію приладового тригранника БІНС M_Z та зв'язаної з корпусом МР системи координат M_S :

$$l_Z = (E + \hat{\vartheta}_Z)l_S, \quad (4)$$

де l_Z, l_S – один і той самий вектор l .

Зазвичай вважається, що похибка ϑ_Z також не змінюється з часом.

5. Приведений центр БІНС (точка М) та точка контакту колеса з поверхнею дороги, переміщення якої вимірює одометр, не збігаються. Для спрощення зазвичай обмежуються розглядом похибки масштабного коефіцієнта k , наявністю зони нечутливості, несоосністю повздовжньої осі об'єкту та повздовжньої приладової осі БІНС, яка характеризується компонентами вектора малого повороту ϑ_Z .

Порівняння позиційної та швидкісної інтерпретацій вимірювань одометра з інформаційної точки зору

Розглянемо вісь часу t , на якій позначені моменти часу оновлення показань давачів БІНС та одометра (рис. 1).

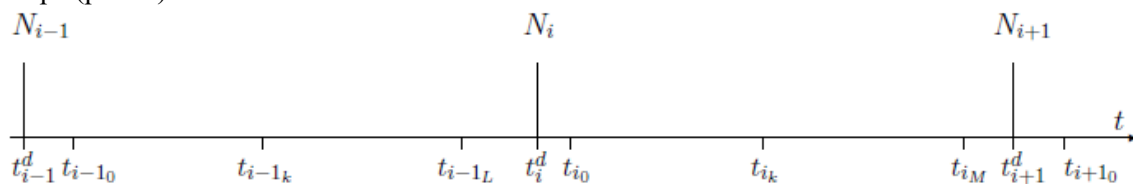


Рис. 1. Моменти оновлення показань давачів БІНС та одометра

Нижче осі t через t_j^d позначені моменти часу оновлення показань сенсора пройденого шляху; через час t_j відбувається оновлення показань інерціальних сенсорів та результатів обчислень БІНС. Зазвичай частота реєстрації даних БІНС більше частоти опитувань одометра, тому моменти t_j^d відмічені рідше, ніж t_j .

Вище осі t відмічена прив'язка цілочисельного лічильника N парціальних кутів повороту колеса до часу. Тобто в момент часу t_j^d показання лічильника змінилося та набуло значення N_i . Для визначеності будемо вважати, що стан лічильника одометра змінився на 1: $N_{i+1} - N_i = 1$, $N_i - N_{i-1} = 1$.

Розглянемо часовий інтервал $[t_i^d, t_{i+1}^d]$, на якому змінилося значення лічильника парціальних кутів повороту колеса зі значення N_i до значення N_{i+1} . Вважаємо, що показання одометра фіксуються з прив'язкою до моментів реєстрації показань сенсорів БІНС. Тоді відрізком часу, в межах якого був зафіксований даний приріст, буде $[t_{i0}, t_{(i+1)0}]$.

Реєстрація показань одометра та сенсорів БІНС може бути не повністю синхронізована, що на момент часу $t_{(i+1)0}$ виражається на часових відрізках $[t_i^d, t_{i0}]$ та $[t_{i+1}^d, t_{(i+1)0}]$. Іншими словами, кожного моменту часу t_{i0} відомим є показання давача пройденої відстані з точністю до ціни одного парціального кута колеса $\Delta\alpha$.

Швидкісна інтерпретація показань одометра є оцінкою повздовжньої швидкості об'єкту, яка визначається прямим чисельним диференціюванням позиційного вимірювання одометра – приросту пройденої відстані на відповідному інтервалі часу.

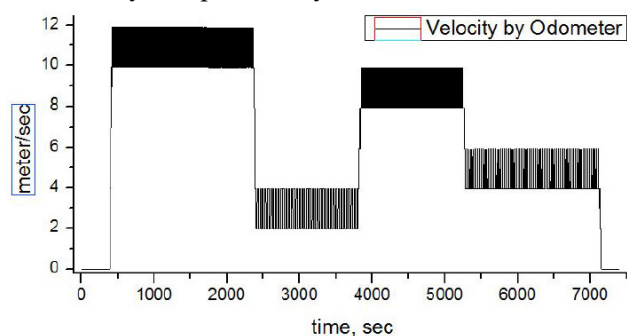


Рис. 2. Приклад швидкісної інтерпретації показань одометра

Для швидкісної інтерпретації маємо:

1. Середня повздовжня швидкість V , що визначається за формулою прямого чисельного диференціювання $V = \frac{K}{t_{(i+1)0} - t_{i0}}$ і зв'язана з інтервалом $[t_{i0}, t_{(i+1)0}]$ шкали часу власне БІНС.

2. Обчислену швидкість V природно віднести до середини інтервалу $[t_{i0}, t_{(i+1)0}]$, тобто до моменту часу $0.5 \cdot (t_{i0} + t_{(i+1)0})$.

3. При цьому виникає запізнення на половину довжини інтервалу у значенні швидкості, яке необхідно враховувати при побудові алгоритмів комплексування, зокрема формування сигналу корекції БІНС за одометричною швидкістю.

4. Величина запізнення є змінною, оскільки вона залежить від швидкості руху об'єкту. Чим більшою є швидкість, тим меншою тривалість часового інтервалу $[t_{i0}, t_{iM}]$.

5. На практиці врахування запізнення зводять до введення до моделі задачі інтеграції БІНС – одометр шуму одометричної швидкості, інтенсивність якого підстроюють під швидкість переміщення, частоту опитувань показань одометра та частоту розв'язку навігаційної задачі БІНС.

6. В апаратній частині зменшення впливу запізнення розв'язують збільшенням частоти опитувань одометра та зменшенням значення масштабного коефіцієнта.

На відміну від швидкісної позиційна інтерпретація полягає в тому, що на інтервалі часу $[t_{i0}, t_{(i+1)0}]$ відстань, пройдена об'єктом, змінилася на величину $\Delta s = K \cdot l$ в повздовжньому напрямку. Отриманий при цьому кінематичний одометричний розв'язок відноситься до моменту часу $t_{(i+1)0}$. В даному випадку відсутнє значуще запізнення інформації, тобто немає потреби вводити логічно складні моделі шуму вимірювань та послаблюються вимоги до частоти опитувань одометра та до величини його масштабного коефіцієнту.

Калібрування одометра полягає в оцінюванні похибки k масштабного коефіцієнта, кутових похибок прив'язки його вимірювальної осі на основі спеціалізованих експериментів із застосуванням позиційної інформації.

При використанні швидкісної інтерпретації калібрування одометра може відбуватися опосередковано через розв'язок задачі корекції БІНС за допомогою локальної одометричної швидкості. Через зазначені особливості швидкісної інтерпретації її результати не завжди є стійкими.

Тому задача калібрування одометра є окремим технологічним етапом. При цьому організується спеціальна мірна траса, до якої ставляться визначені вимоги: мінімальна довжина траси, прямолінійність, горизонтальність та прив'язка з високою точністю до карти маркерних точок траси. При такому підході до калібрування одометра його швидкісна інтерпретація не використовується.

Калібрування, наприклад, масштабного коефіцієнта проводиться на основі порівняння відстані між маркерними точками з відстанню, обчисленою за приростами показань одометра.

Однак у випадку позиційної інтерпретації, коли паралельно проводиться інерціальне числення БІНС, кінематичне одометричне числення та корекція БІНС за одометричним численням автоматично проводиться до калібрування масштабного коефіцієнта та перекосів одометра при русі. А при наявності легко організовуваної (недалеко від точки старту) маркерної точки проведені в цій точці позиційна корекція БІНС та одометричне числення дозволяють з достатньою точністю оцінити калібрувальні параметри одометра.

При цьому відпадає потреба в організації спеціальної мірної траси та в реалізації спеціального режиму калібрування. Також при наявності маркерних точок (або іншої зовнішньої позиційної інформації) корегується кінематичне одометричне числення, в якому зберігається вся історія показань приросту пройденої відстані. У випадку швидкісної інтерпретації враховується тільки локальний приріст пройденої відстані, продиференційованої за часом.

Таким чином, можна вважати, що в задачі інтеграції БІНС-одометр варто використовувати позиційну інтерпретацію показань одометра та відповідне одометричне кінематичне числення.

Моделі вимірювання одометра

З врахуванням положень, в яких була сформульована векторна інтерпретація приросту пройденої відстані за одометром [11] в ідеалізованому випадку, сформуємо аналогічне векторне представлення показань одометра для описаної та прийнятої вище реалістичної моделі:

$$\Delta s_s'' = (0, \Delta s_i'', 0)^T. \quad (5)$$

Аналогічна інтерпретація [12] використовується для вимірювання локальної повздовжньої швидкості:

$$V_s'' = (0, V_i'', 0)^T, \quad V_i'' = \frac{\Delta s_i''}{\Delta t_i}. \quad (6)$$

Таким чином, можна виділити такі моделі вимірювання одометра:

1. Модель векторного вимірювання приросту координат, коли одометр розглядається як сенсор

локального переміщення об'єкту в зв'язаній системі координат Ms :

$$\Delta s_s'' = \Delta s_s + k\Delta s_s'' + \Delta s_s^{ds} = \Delta s_z - \hat{\Theta}_z \Delta s_s'' + k\Delta s_s'' + \Delta s_s^{ds} = \Delta s_z + \Delta s_i''(-\Theta_{z3}, k, \Theta_{z1})^T + \Delta s_s^{ds}, \quad (7)$$

де Δs_s та Δs_z – вектори дійсного приросту локальних координат в проекціях на зв'язані Ms та приладові Mz осі відповідно; Δs_s^{ds} – вектор, складений з випадкової складової моделі похибки одометра $\Delta s_i^{ds} : \Delta s_s^{ds} = (0, \Delta s_i^{ds}, 0)^T$.

2. Модель векторного швидкісного вимірювання, коли одометр розглядається як сенсор повздовжньої швидкості руху об'єкту в зв'язаній системі координат Ms :

$$V_s'' = V_s + kV_s'' + \Delta V_s^{ds} = V_z - \hat{\Theta}_z V_s'' + kV_s'' + \Delta V_s^{ds} = V_z + V_i''(-\Theta_{z3}, k, \Theta_{z1})^T + \Delta V_s^{ds}, \quad (8)$$

де V_s та V_z – вектори дійсної відносної лінійної швидкості об'єкту в проекціях на зв'язану Ms та приладову Mz системи координат відповідно; V_s^{ds} – вектор, що відповідає випадковій складовій показань одометра:

$$\Delta V_s^{ds} = (0, \Delta V_i^{ds}, 0)^T, \quad \Delta V_i^{ds} = \frac{\Delta s_i^{ds}}{\Delta t_i}. \quad (9)$$

Одометричні вимірювальні алгоритми

За результатами вимірювання кількості обертів приводного валу і валу рульового управління навігаційна система оцінює положення, напрямок, швидкість і прискорення МР. На рис. 3, б пояснюється вимірювання відстані одометром, згідно з яким кількість обертів перетворюється в лінійну зміну переміщення $L = \frac{\pi D N_E}{N_C}$, де D – діаметр колеса робота; N_E – виміряна кількість

імпульсів сенсора; N_C – кількість імпульсів сенсора на оберт колеса.

При реалізації мобільної платформи з двома незалежними двигунами (рис. 3, в) для оцінки положення використовують такі співвідношення [9]:

$$C(t_1) = C(t_0) + \frac{D_R - D_L}{W} [pad]; \quad D(t_0, t_1) = \frac{D_R + D_L}{2}, \quad (10)$$

де $C(t_0)$ – кутове положення МР в момент часу t_0 ; D_R та D_L – переміщення відповідно правого та лівого коліс робота; W – ширина робота; $D(t_0, t_1)$ – переміщення МР за інтервал часу $[t_0, t_1]$; $\theta = (D_R - D_L)/W$ – миттєвий кут повороту МР.

Криволінійну траєкторію руху можна розділити на лінійні ділянки, для яких справедливими є формули (10), та визначити декартові координати МР:

$$X(t_1) = X(t_0) + D(t_0, t_1) \cdot \cos(C(t_1)); \\ Y(t_1) = Y(t_0) + D(t_0, t_1) \cdot \sin(C(t_1)).$$

Зв'язок між початковою P_0 і кінцевою P_1 позиціями МР задається так [9]:

$$\vec{P}_0 = \begin{bmatrix} X(t_0) \\ Y(t_0) \\ C(t_0) \end{bmatrix}; \quad \vec{P}_1 = \begin{bmatrix} X(t_1) \\ Y(t_1) \\ C(t_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X(t_0) \\ Y(t_0) \\ C(t_0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D(t_0, t_1) \cdot \cos(C(t_0) + \theta) \\ D(t_0, t_1) \cdot \sin(C(t_0) + \theta) \\ \theta \end{bmatrix}.$$

Такий підхід характеризується простотою реалізації (функція вимірювання безпосередньо пов'язана з системами приводу і управління), низькими вимогами до обчислювальних пристроїв та дешевиною, однак має ряд недоліків [1]:

- неможливість врахування “просковзування” або “заклинювання” коліс;
- недостатня точність, пов'язана з похибками вимірювання діаметрів коліс та їх різними розмірами (геометрія шини залежить від стану протектора, тиску в шині, температури і ваги колеса, які можуть змінюватися з часом навіть в номінальних умовах експлуатації [13]), а також низькою роздільною здатністю енкодерів;
- потребує високої частоти обробки даних для відстеження мінімальних відмінностей у переміщенні коліс (дуже важливо при русі МР за S-подібними траєкторіями при об'їзді перешкод);
- може використовуватися для обчислення положення МР відносно початкової точки, однак не дає інформації про положення робота у просторі відносно інших об'єктів (стін, дверей, дерев, парканів, будівель) [14];
- нереалізованість методу для літальних, плаваючих та крокуючих МР.

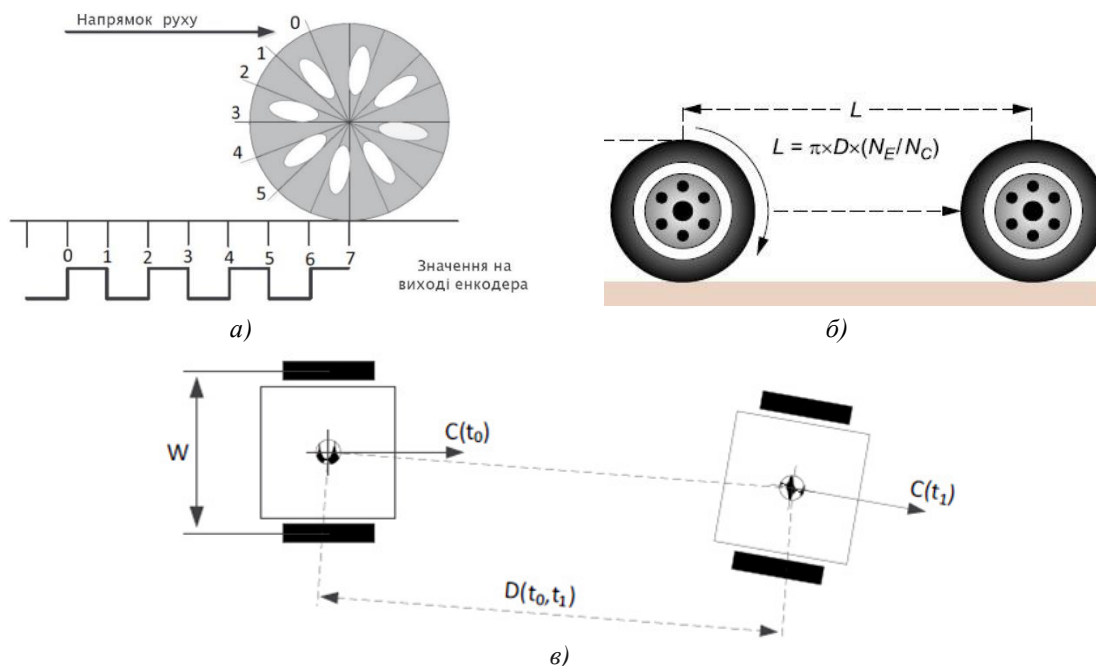


Рис. 3. До вимірювання параметрів руху одометром: а) – принцип роботи енкодера; б) – вимірювання відстані одометром; в) – оцінка переміщення платформи з диференціальним приводом

Зазначені недоліки приводять до вимушеної необхідності вводити для таких вимірювальних систем “опорні точки”, в яких враховують або компенсують накопичені похибки. Однак такий підхід реалізується тільки для позиціонування на заздалегідь відомій території. Тому одометрія є недорогим методом забезпечення достатньої короткотривалої точності при високій частоті дискретизації. Однак необхідно враховувати, що накопичення похибки приводить до збільшення похибки орієнтації, яка збільшується пропорційно переміщенню МР.

При переміщенні МР по нерівній поверхні, особливо для крокуючих роботів, використовується візуальна одометрія – процес отримання одометричної інформації (переміщення та напрямку руху) при використанні послідовності зображень з камер мобільного робота (рис. 4) [15, 16]. Вона дозволяє покращити навігаційну точність роботів незалежно від його способу переміщення та для більшості типів поверхні (за виключенням водних поверхонь) реалізується у різних сферах – від марсоходів до оптичних мишок.

Типовий алгоритм візуальної одометрії складається з таких етапів [17].

1. Отримання зображення з камери/стереокамери/панорамних камер.
2. Корекція зображення (усунення дисторсії (від лат. *distorsio*, *distortio* – викривлення) – аберації оптичних систем, при якій лінійне збільшення змінюється по полю зору, порушуючи подібність між об'єктом та його зображенням; «подушкоподібна» дисторсія виникає у випадку, коли лінійне збільшення зростає з віддаленням елементів зображення від оптичної осі; коли лінійне збільшення зменшується з віддаленням елементів зображення від оптичної осі – виникає «бочкоподібна» дисторсія; дисторсія виправляється підбором лінз та інших елементів оптичної системи при її розробці; в цифровому зображенні дисторсія може бути виправлена програмно).
3. Детектування ключових точок зображення:

а) детектування ключових точок (наприклад, метод Лукаса-Канаде [18], який широко використовується у комп'ютерному зорі і є диференціальним локальним методом обчислення оптичного потоку. Основне рівняння оптичного потоку містить дві незалежні змінні і не може бути однозначно розв'язаною. Алгоритм Лукаса-Канаде розв'язує неоднозначність за рахунок використання інформації про сусідні пікселі в кожній точці. Метод ґрунтується на припущенні, що в локальному околі кожного пікселя значення оптичного потоку однакове, таким чином можна записати рівняння оптичного потоку для всіх пікселів в околі і розв'язати систему рівнянь методом найменших квадратів);

б) порівняння точок між кадрами;

в) побудова оптичного потоку.

4. Перевірка векторів оптичного потоку на можливі похибки, відкидання викидів (outliers).

5. Визначення руху камери за оптичним потоком:

а) використовуючи фільтр Калмана;

б) використовуючи геометричні та 3D-властивості точок для мінімізації цільової функції, основаної на мінімізації помилки проєкції між двома суміжними кадрами.

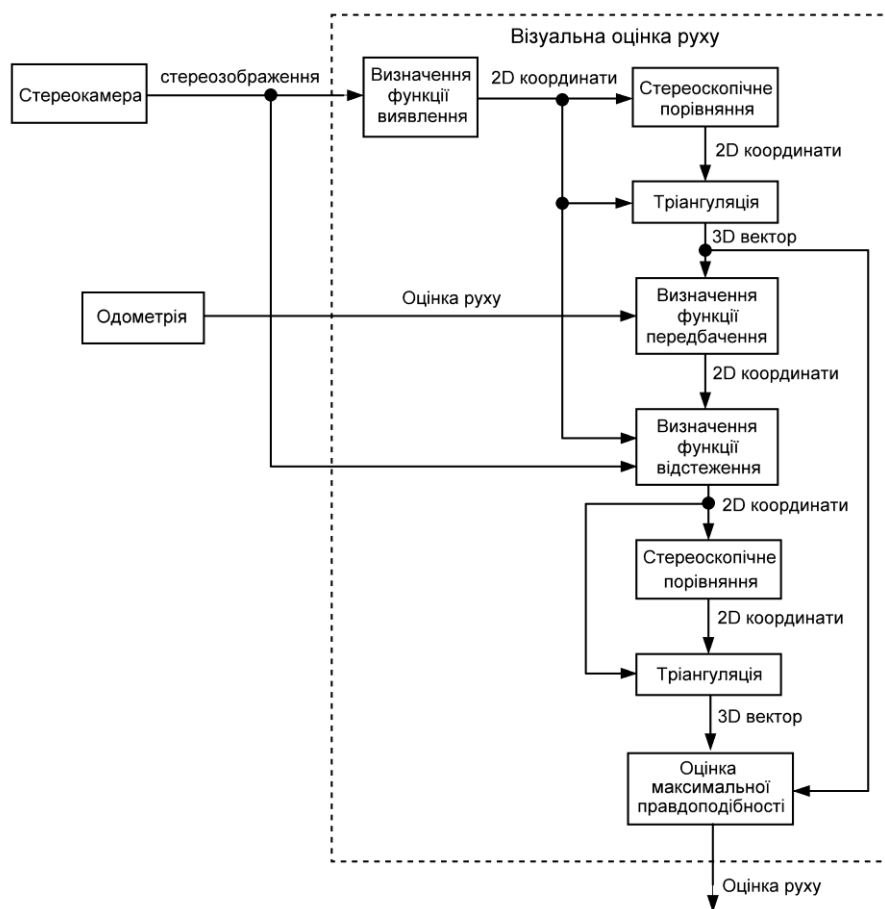


Рис. 4. Типовий алгоритм візуальної одометрії

6. Періодичне оновлення набору ключових точок для відстеження.

Перевагою такого алгоритму є його універсальність, а недоліки є такі:

- алгоритм практично не працює з однотипними зображеннями;
- необхідність високої швидкості захоплення зображення (при використанні систем з частотою отримання кадрів порядку десятків кГц);
- високе обчислювальне навантаження та висока вартість камер.

Висновки

1. Представлена реалістична модель вимірювань одометра, яка передбачає врахування відносної похибки масштабного коефіцієнта, за допомогою якого первинне вимірювання переводиться у пройдену відстань, зони нечутливості вимірювання, обумовленої цілочисельністю первинної вимірювальної інформації, похибок, що залежать від повздовжніх швидкості та прискорення і ненульового кута зносу при повороті, несоосності вимірювальної осі одометра та повздовжньої приладової осі БІНС, а також незбіг приведенного центру БІНС та точки контакту колеса з поверхнею дороги, переміщення якої вимірює одометр.

2. Проведено порівняння позиційної та швидкісної інтерпретацій вимірювань одометра з інформаційної точки зору та з'ясовано, що для задач інтеграції БІНС-одометр варто використовувати позиційну інтерпретацію показань одометра та одометричне кінематичне числення.

3. З врахуванням положень векторної інтерпретації приросту пройденної відстані за одометром виділено моделі векторного вимірювання приросту координат (одометр розглядається як сенсор локального переміщення об'єкту в зв'язаній системі координат) та векторного швидкісного вимірювання (одометр розглядається як сенсор повздовжньої швидкості руху об'єкту в зв'язаній системі координат).

4. Розглянуто такі одометричні вимірювальні алгоритми, як метод реалізації мобільної платформи з двома незалежними двигунами та типовий алгоритм візуальної одометрії.

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. D.Fox, W.Burgard, and S.Thrun, Markov localization for mobile robots in dynamic environments, Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR), 1999, pp.11: 391-427.
4. M.Montemerlo, S.Thrun, D.Kollerand B.Wegbreit, Fast-SLAM2.0: An Improved Particle Filtering Algorithm for Simultaneous Localization and Mapping that Provably Converges, In Proc. Of the Int. Confs. On Artificial Intelligence (IJCAI), 2003, pp.1151–1156.
5. L.Kleeman, Odometry Error Covariance Estimation for Two Wheel Robot Vehicles, Technical Report MECSE-95-1, Department of Electrical and Computer Systems Engineering, Monash University, 1995.
6. A.Martinelli and R.Siegwart, Estimating the Odometry Error of a Mobile Robot during Navigation, In Procs. Of European Conf. on Mobile Robots, 2003.
7. J.Borenstein and L.Feng, Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robot, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, pp.12(6):869-880.
8. Haoming Xu and John James Collins. Estimating the Odometry Error of a Mobile Robot by Neural Networks, In Proc. of International Conference on Machine Learning and Applications, 2009.
9. 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.
10. Никитин, И. В. Задача навигации наземного объекта на основе данных БИНС и одометра. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.ф.-м.н. – М.: МГУ, 2016. – 33 с.
11. Мальгин, Н. В. Бесплатформенная инерциальная навигационная система М500. Современные системы ориентирования, навигации и топопривязки / Н. В. Мальгин, И. И. Нестеров, А. Б. Кутман, А. Ю. Яудинов, Н. Ш. Маликов // Оборонная техника. – 2014. – №5-6. – С. 87-92.
12. Молчанов, А. В. Инерциальные методы и средства динамических измерений параметров движения и деформаций объектов. Диссертация на соискание ученой степени д.т.н. – С.-Пб., 2001. – 388 с.
13. 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.
14. Рудик, А. В. Наукові основи та принципи побудови приладової системи вимірювання прискорення мобільного робота: дис. на здоб. наук. ступ. д.т.н. / А. В. Рудик. – Київ : НТУ України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2018. – 460 с.
15. Siciliano, B. Springer handbook of robotics / B. Siciliano, O. Khatib. – Springer-Verlag Berlin, 2008. – P. 477-580.
16. Nistrer, D. Visual odometry for ground vehicle applications / D. Nistrer, O. Naroditsky, J. Bergen // J. of Field Robotics. – 2006. – Vol. 23 (1). – P. 3-20.
17. Xu, J. Robust stereo visual odometry for autonomous rover / J. Xu, M. Shen, W. Wang, L. Yang [et al.] // 6th WSEAS Internat. Conf. on Signal, Speech and Image Processing. – 2006.
18. Bruce D. Lucas and Takeo Kanade. An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision. International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1981. – P. 674-679.

нормованого розмаху дозволив не тільки по-новому поглянути на всю теорію випадкових процесів, а й став дуже ефективним і популярним технічним підходом в дослідженні процесів самої різної природи: від телекомунікацій, аналізу біоелектричних сигналів до вирішення завдань функціональної діагностики складних просторових об'єктів. Результати, отримані у роботі можуть бути впроваджені в систему функціональної діагностики складних роторних систем для виявлення та прогнозування поведінки пошкоджень їх обертових елементів.

УДК 621.317.08

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ, ХАРАКТЕРИСТИК ТА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ / А.В. Рудик, О.А. Бідун // Вісник Інженерної академії України. – 2019. – №2. – С. 99-106.

В статті проведений аналіз більшості технічних параметрів і характеристик акселерометрів, які використовуються для оцінки їх працездатності, точності та можливості виконання конкретних вимірювальних задач. Представлені математичні моделі MEMS-акселерометра MMA7331LT в різних формах (механічна, електрична в формі передавальної функції та схемотехнічна в формі еквівалентної електричної схеми). Проведена оцінка параметрів електричної моделі (передаточної функції акселерометра за каналом "прискорення – вихідна напруга") MEMS-акселерометра MMA7331LT методом найменших квадратів. Порівняння експериментальної та змодельованої нормованих АЧХ доводить адекватність запропонованих моделей.

Ключові слова: акселерометр, технічні параметри, технічні характеристики, математична модель, еквівалентна схема, діапазон вимірювання, прискорення.

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ, ХАРАКТЕРИСТИК И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ / А.В. Рудык, О.А. Бидун // Вестник Инженерной академии Украины. – 2019. – №2. – С. 99-106.

В статье проведен анализ большинства технических параметров и характеристик акселерометров, которые используются для оценки их работоспособности, точности и возможности выполнения конкретных измерительных задач. Представленные математические модели MEMS-акселерометра MMA7331LT в различных формах (механическая, электрическая в форме передаточной функции и схемотехническая в форме эквивалентной электрической схемы). Проведена оценка параметров электрической модели (передаточной функции акселерометра по каналу "ускорение – выходное напряжение") MEMS-акселерометра MMA7331LT методом наименьших квадратов. Сравнение экспериментальной и смоделированной нормированных АЧХ доказывает адекватность предложенных моделей.

Ключевые слова: акселерометр, технические параметры, технические характеристики, математическая модель, эквивалентная схема, диапазон измерения, ускорение.

ANALYSIS OF THE MAIN TECHNICAL PARAMETERS, CHARACTERISTICS AND MATHEMATICAL MODELS OF ACCELEROMETERS / A.V. Rudyk, O.A. Bidun // Bulletin of Engineering Academy of Ukraine. – 2019. – №2. – P. 99-106.

The article analyzes most of the technical parameters and characteristics of accelerometers, which are used to assess their performance, accuracy and the ability to perform specific measurement tasks. The presented mathematical models of the MMA7331LT MEMS accelerometer in various forms (mechanical, electrical in the form of a transfer function and circuitry in the form of an equivalent electrical circuit). The parameters of the electric model (the transfer function of the accelerometer via the acceleration-output voltage channel) of the MMA7331LT MEMS accelerometer were estimated using the least squares method. Comparison of experimental and simulated normalized amplitude-frequency characteristics proves the adequacy of the proposed models.

Keywords: accelerometer, technical parameters, technical characteristics, mathematical model, equivalent circuit, measuring range, acceleration

УДК 621.317.08

АНАЛІЗ ОДОМЕТРИЧНИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ / А.В. Рудик, В.А. Рудик, М.І. Матей // Вісник Інженерної академії України. – 2019. – №2. – С. 107-115.

В статті представлена реалістична модель вимірювань одометра, яка передбачає врахування ос-

новних впливових на результат вимірювання чинників. Проведено порівняння позиційної та швидкісної інтерпретацій вимірювань одометра з інформаційної точки зору та з'ясовано, що для задач інтеграції варто використовувати позиційну інтерпретацію показань одометра та одометричне кінематичне числення. За векторною інтерпретацією приросту пройденої відстані виділено моделі векторного вимірювання приросту координат та векторного швидкісного вимірювання. Розглянуто основні одометричні вимірювальні алгоритми.

Ключові слова: одометричні методи, мобільний робот, енкодер, стереозір, технічний зір, одометрія, візуальна одометрія, вимірювання відстані.

АНАЛИЗ ОДОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ / А.В. Рудык, В.А. Рудык, М.И. Матей // Вестник Инженерной академии Украины. – 2019. – №2. – С. 107-115.

В статье представлена реалистичная модель измерений одометра, которая предполагает учет основных влияющих на результат измерения факторов. Проведено сравнение позиционной и скоростной интерпретаций измерений одометра с информационной точки зрения и выяснено, что для задач интеграции следует использовать позиционную интерпретацию показаний одометра и одометрическое кинематическое счисление. По векторной интерпретации прироста пройденного расстояния выделено модели векторного измерения приращения координат и векторного скоростного измерения. Рассмотрены основные одометрические измерительные алгоритмы.

Ключевые слова: одометрические методы, мобильный робот, энкодер, стереозрение, техническое зрение, одометрия, визуальная одометрия, измерение расстояния.

ANALYSIS OF ODOMETRIC METHODS FOR DETERMINING THE MOTION PARAMETERS OF MOBILE ROBOTS / A.V. Rudyk, V.A. Rudyk, M.I. Matei // Bulletin of Engineering Academy of Ukraine. – 2019. – №2. – P. 107-115.

The article presents a realistic model of odometer measurements, which involves taking into account the main factors influencing the measurement result. The positional and velocity interpretations of the odometer measurements were compared from an information point of view and it was found that for integration problems, the positional interpretation of the odometer readings and the odometric kinematic number should be used. According to the vector interpretation of the increment of the distance traveled, the models of vector measurement of coordinate increment and vector velocity measurement are highlighted. The basic odometric measurement algorithms are considered.

Keywords: odometric methods, mobile robot, encoder, stereo vision, technical vision, odometry, visual odometry, distance measurement.

УДК 531

АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЛІНІЙНИХ ДВИГУНІВ /Слесаренко К.С. // Вісник Інженерної академії України. – 2019. – №2. – С. 116-119.

Розглянуто математичні моделі функціонування лінійних двигунів (ЛД) та головні особливості кожної з розглянутих моделей. Проаналізовано методи та способи розрахунку основних параметрів ЛД. Розглянуті моделі враховують особливості електромагнітних перехідних процесів, викликаних відмінностями конструкції ЛД від обертових машин. Окремо досліджено розрахунок магнітного поля для лінійного асинхронного двигуна (ЛАД) та лінійного синхронного двигуна (ЛСД). Виділено основні моделі розрахунку ЛАД, які засновані на методах кінцевих різниць або кінцевих елементів та схемах заміщення. Для розрахунку ЛСД, обґрунтовано певні адаптації та уточнення класичних методів розрахунку обертових синхронних машин.

Ключові слова: лінійний асинхронний двигун, математична модель, лінійний синхронний двигун, крайовий ефект, перехідний процес.

УДК 628.979

ВАЖЛИВІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОЛІРНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ОСВІТЛЕННЯ НА ЛЮДИНУ/ А.П. Стахова, Є.Ю. Лучний// Вісник Інженерної академії України. – 2019. – №2. – С. 120-123.

ТЕОРЕТИЧНИЙ І НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ
ІНЖЕНЕРНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ



В І С Н И К
ІНЖЕНЕРНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ
ВИПУСК 2 2019

Підп. до друку 29.05.2019р. 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.

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