

Олександр Голота<sup>1\*</sup>, Сергій Плакін<sup>2</sup>, Юрій Шкіль<sup>3</sup>

- <sup>1</sup> Відділ «Систем керування транспортними засобами», Інститут транспортних систем та технологій Національної академії наук України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, 49005, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0282-2767>
- <sup>2</sup> Відділ «Систем керування транспортними засобами», Інститут транспортних систем та технологій Національної академії наук України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, 49005, Україна.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8302-0186>
- <sup>3</sup> Відділ «Систем керування транспортними засобами», Інститут транспортних систем та технологій Національної академії наук України, вул. Писаржевського, 5, Дніпро, 49005, Україна.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8302-0186>

\*Автор, відповідальний за листування: [sashagolota3012@gmail.com](mailto:sashagolota3012@gmail.com)

## ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ПРОСТОРОВОЇ ОРІЄНТАЦІЇ МАГНІТОПЛАНУ ВІДНОСНО КОЛІЙНОЇ СТРУКТУРИ

У статті запропоновано спосіб визначення положення екіпажу магнітоплану завдяки використанню методу далекометрії. Основу розробленої ідеї складає використання випромінювачів за допомогою яких можна реєструвати обертальні рухи екіпажу (тангаж і нишпорення), а також здійснювати реєстрацію крену. За результатами проведених досліджень, в роботі обґрунтовано таке: фазова далекометрія з одним випромінювачем на платформі екіпажу дозволяє визначати положення екіпажу на перегоні, його зміщення в горизонтальній площині щодо поздовжньої осі колійної структури та висоту підвісу між днищем екіпажу і шляхопроводом, а наявність трьох випромінювачів дозволять реєструвати три обертальні рухи (тангаж, нишпорення та крен).

Новизна роботи полягає в обґрунтуванні способу безперервного позиціонування високошвидкісного магнітолевітуючого транспортного засобу по 6-ти ступенях свободи на основі фазової далекометрії для довільної конфігурації в тривимірному просторі фіксованого шляхопроводу та цілісності навігаційної системи.

Розглянутий метод навігації призначений для використання в високошвидкісних транспортних наземних системах на магнітному підвісі, організації автоматизованого управління рухом колісним транспортом на локальних майданчиках виробничого призначення, організації швидкісного малорозмірного муніципального транспорту індивідуального користування.

**Ключові слова:** магнітоплан, магнітний підвіс, рухома платформа, центр ваги, фазова далекометрія.

**Вступ.** Високошвидкісний наземний транспорт на магнітному підвісі є одним із пріоритетних напрямів розвитку досліджень у транспортній науці [1]. Для адекватного управління цим видом транспорту необхідна прецизійна система управління його рухом, що ґрунтується на точному визначенні його розташування щодо колійного полотна [2]. Сучасні навігаційні системи повною мірою не відповідають вимогам позиціонування з урахуванням специфіки високошвидкісного наземного транспорту, зокрема, швидкодії, а в деяких випадках і безперерійній роботі цілої системи [3], тому пошук нових підходів до вирішення цього завдання є актуальним.

**Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми.** Один із можливих підходів полягає у застосуванні методу вимірювання фазових співвідношень сигналів від двох синхронізованих генераторів високої стабільності: «опорного», розташованого в початковому або кінцевому пункті інтервалу руху, та «інформаційного», розташованого на самому транспортному засобі

(магнітоплані, екіпажі). Сигнали від обох генераторів по роздільних лініях (радіовипромінюючі кабелі, leaky feeder [4, 5]) зв'язку надходять в диспетчерський пункт управління рухом, де вимірюється різниця фаз цих сигналів, яка є функцією відстані між пунктом управління рухом і транспортним засобом, що рухається, з «інформаційним» генератором на борту, тобто однозначно визначає координати положення екіпажу на відповідному інтервалі руху [6].

Однак для керування рухом транспортного засобу диспетчерський пункт повинен мати інформацію не лише про місцезнаходження його щодо кінцевих пунктів пересування, а й про його просторове положення щодо шляхопроводу (guideway), що потрібно для контролю просторового коливання, навантаження, стійкості левітаційного руху [7]. Визначення параметрів орієнтації рухомого засобу можливе методом фазової далекометрії, якщо на рухомому засобі встановити два синхронізовані з першим генератором «інформаційних» генератора (маркера), а з кожної сторони вздовж колійної структури розташувати по два просторово рознесених радіовипромінюючих кабелі. При такій конструкції по вимірних фазових співвідношеннях «опорного» та «інформаційного» сигналів в чотирьох радіовипромінюючих кабелів можливе однозначне визначення положення кожного «інформаційного» генератора в системі координат чотирьох кабелів. Сигнал від «опорного» генератора надходить п'ятим кабелем. З огляду на те, що генератори жорстко пов'язані з транспортним засобом, їх координати визначають як місцезнаходження, так і просторову орієнтацію транспортного засобу.

**Мета і завдання дослідження.** Метою та завданням даного дослідження є вдосконалення системи управління рухом магнітоплану з можливістю визначення його розташування відносно колійного полотна. Основою роботи є визначення можливості застосування методу фазової далекометрії для системи керування високошвидкісним наземним транспортом.

**Матеріали та методи дослідження.** Розглянемо математичну модель визначення просторового становища рухомої платформи за умов фіксованої колійної структури. У разі жорсткого одновагонного екіпажу основним оперативним параметром є центр ваги (ЦВ) – точка застосування рівнодіючої сили ваги всіх його частин та вантажів. ЦВ може зміщуватися по осях екіпажу залежно від розташування вантажів та наповненості пасажирями. Зміщення ЦВ по поздовжній осі екіпажу впливає на його комфортний рух (рівновагу, стійкість та керованість) та визначає центрування екіпажу. Зміщення ЦВ по вертикальній осі на комфортність пасажирів впливає незначно. Для поїзда з кількох вагонів рух ЦВ ускладнюється внаслідок гнучких механічних зв'язків між ними. Під час руху центрування одновагонного екіпажу порушується, проте воно не повинно виходити за допустимі межі при максимальній швидкості та наявності зовнішніх дестабілізуючих факторів.

Візьмемо початок координат трьох взаємно пов'язаних осей – поздовжньої  $Ox$ , вертикальної  $Oy$  та поперечної  $Oz$  у точку ЦВ. Будь-який рух екіпажу можна розглядати як результат двох видів руху – переміщення ЦВ та обертання платформи екіпажу щодо ЦВ, що задається кутами  $\alpha$ ,  $\beta$  і  $\gamma$  (рис. 1).

Кут розвороту екіпажу навколо поздовжньої осі  $Ox$  від горизонтального положення називається кутом крену  $\gamma$ . Нахил буває лівий і правий і відрховується в межах  $0 - 90^\circ$ . Кут розвороту екіпажу навколо поперечної осі  $Oz$  від горизонтального положення називається кутом тангажу  $\beta$ . Тангаж може бути позитивним зі збільшенням швидкості руху або негативним при її зниженні. Кут розвороту екіпажу навколо вертикальної осі  $Oy$  від північного напрямку земного меридіана за годинниковою стрілкою називається кутом нишпорення  $\alpha$ .

Таким чином, складний рух екіпажу (або магнітоплану) в просторі можна розкласти на три поступові рухи ЦВ щодо нерухомих координат шляхопроводу і три обертальні рухи щодо системи координат екіпажу, тобто магнітоплан має 6 ступенів свободи. При цьому за координатами ЦВ можна обчислити пройдений екіпажем шлях у кожний момент часу щодо початку координат шляхопроводу; висоту ЦВ над колійною структурою та бічне відхилення ЦВ від поздовжньої лінії руху. Поступовий рух залежить від підйомної лоренцівської сили,

ваги магнітоплану, результуючої тяги електроприводу з урахуванням сил магнітного опору та лобового опору. Обертальний рух екіпажу залежить від діючих на нього моментів: поперечного (крутного) моменту  $M_x$ , що діє навколо поздовжньої осі і прагне змінити кут крену  $\gamma$  (поперечний момент крену); поздовжнього моменту  $M_z$ , що діє навколо поперечної осі і прагне змінити кут тангажу  $\beta$  (момент тангажу) і колійного моменту  $M_y$ , що діє навколо вертикальної осі та прагне змінити кут курсу  $\alpha$  (момент нишпорення).

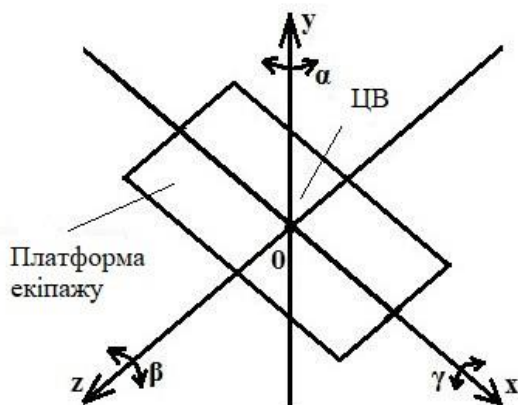


Рис. 1. Кути зміщення платформи екіпажу щодо ЦВ

Поступові та оберткові рухи взаємопов'язані. Наприклад, зміна кута тангажу призводить до зміни висоти ЦВ екіпажу над шляховою структурою, зміни бічного відхилення і т. д. Для того, щоб екіпаж міг рухатися з прискоренням, прямолінійно, рівномірно, необхідна рівновага сил і моментів, що діють на нього. У напрямку координатних осей  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$  розрізняють поперечну, поздовжню та колійну обертальну рівновагу екіпажу. Поздовжня рівновага – рівновага екіпажу щодо поперечної осі  $Oz$  – може бути порушена при зміні центрування, дії вертикальних поривів вітру, при зміні режимів роботи. Поперечна рівновага – рівновага екіпажу щодо поздовжньої осі  $Ox$  – може бути порушена нерівномірним завантаженням платформи, поздовжньою кривизною колійної структури, несиметричною роботою електроприводу. Шляхова рівновага – рівновага екіпажу щодо вертикальної осі  $Oy$  – може бути порушена при несиметричній роботі електроприводу, горизонтальних поривах вітру.

Управління рівновагою здійснюється шляхом управління режимами роботи електроприводу від інформаційних сигналів, що надходять від навігаційної системи магнітолевітаційного транспорту та містять інформацію про координати ЦВ щодо нерухомих координат колійної структури та координати обертальних рухів платформи екіпажу. Для цього в прямокутній системі координат чотирьох ліній передачі сигналів поставимо координати маркера у разі поступального руху екіпажу. Положення маркера  $M$  (фазового центру випромінювача) щодо початку координат визначатимемо всередині прямокутника  $ABCD$  (рис. 2), де точки  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  розташовуються на лініях передачі сигналів колійної структури. Для визначення приймемо точку  $C$  за початок координат. Тоді координати маркера визначаються величинами  $a$  та  $b$ . Вони ж є вихідними даними і при обчисленні кутів обертання платформи екіпажу.

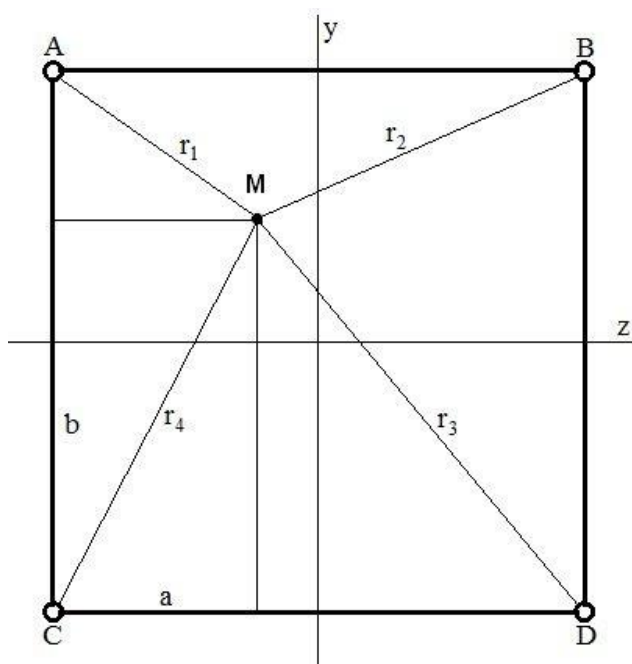


Рис. 2. Координати маркера у системі координат чотирьох ліній передачі

Для визначення  $a$  та  $b$  через  $AC$ ,  $CD$ ,  $AB$  та  $BD$  – відомі відстані між лініями передачі сигналів і  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ ,  $r_4$  – відстані від маркера  $M$  до ліній передачі сигналів, що вимірюються засобами фазової далекометрії навігаційної системи, виразимо площі трикутників  $AMC$ ,  $AMB$ ,  $BMD$  та  $DMC$  через три відомі сторони і через основу та висоту [8], а потім, відповідно, прирівняємо:

$$0,5CD \cdot b = \sqrt{p_1(p_1 - r_4)(p_1 - r_3)(p_1 - CD)}; \quad (1)$$

$$0,5AC \cdot a = \sqrt{p_2(p_2 - r_4)(p_2 - r_1)(p_2 - AC)}; \quad (2)$$

$$0,5AB \cdot (AC - b) = \sqrt{p_3(p_3 - r_1)(p_3 - r_2)(p_3 - AB)}; \quad (3)$$

$$0,5BD \cdot (CD - a) = \sqrt{p_4(p_4 - r_2)(p_4 - r_3)(p_4 - BD)}; \quad (4)$$

Тут

$$p_1 = \frac{r_3 + r_4 + CD}{2}, \quad p_2 = \frac{r_1 + r_4 + AC}{2}, \quad p_3 = \frac{r_1 + r_2 + AB}{2}, \quad p_4 = \frac{r_2 + r_3 + BD}{2} \quad (5)$$

Вирази для  $a$  та  $b$  мають вигляд:

$$a = \frac{2\sqrt{p_2(p_2 - r_4)(p_2 - r_1)(p_2 - AC)}}{AC} = CD - \frac{2\sqrt{p_4(p_4 - r_2)(p_4 - r_3)(p_4 - BD)}}{BD}; \quad (6)$$

$$b = \frac{2\sqrt{p_1(p_1 - r_4)(p_1 - r_3)(p_1 - CD)}}{CD} = AC - \frac{2\sqrt{p_3(p_3 - r_1)(p_3 - r_2)(p_3 - AB)}}{AB};$$

Отримані величини  $a$  і  $b$  є шуканими координатами маркера  $M$  в системі координат нерухомих ліній передачі сигналів колійної структури.

Подальший крок – визначення координат точкового джерела радіовипромінювання у системі нерухомих ліній передачі сигналів. У процесі руху екіпаж здійснює поступальні рухи у системі нерухомих координат колійної структури та обертальні рухи у системі координат платформи екіпажу. Опис цих рухів здійснюється через визначення координат маркерів  $M_1$  і  $M_2$  (джерел радіовипромінювання) методом фазової далекометрії [9]. Маркери розташовані на фронтальній та тильній сторонах платформи екіпажу на його поздовжній осі, рис. 3.

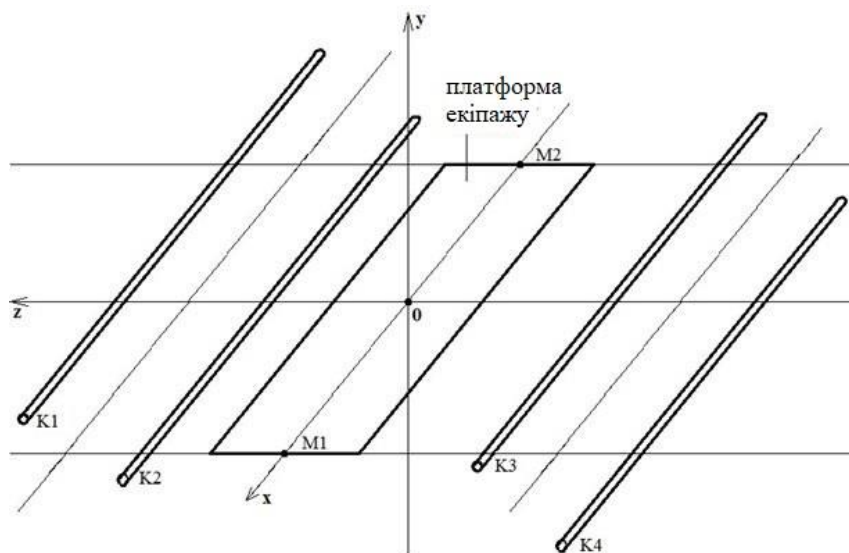


Рис. 3. Розташування маркерів  $M_1$  та  $M_2$  відносно коаксимальних ліній передач  $K_1, K_2, K_3, K_4$

При поступовому русі відбувається зміщення платформи екіпажу (відповідно та жорстко прив'язаних до неї маркерів) паралельно до осі  $x$  або осі  $y$ . Ці зміщення визначаються через координати  $a$ ,  $-a$  при горизонтальному русі маркера  $M_1$  і координати  $b$ ,  $-b$  при горизонтальному русі маркера  $M_2$ . При вертикальному русі зміщення визначається через координати  $a'$ ,  $-a'$  для маркера  $M_2$ , рис. 4.

При поступовому зміщенні маркерів  $M_1$  і  $M_2$  має виконуватися умова рівності координат  $a = a'$ ;  $b = b'$ ;  $-a = -a'$ ;  $-b = -b'$ .

Одноіменні координати маркерів при поздовжньому зміщенні повинні співпадати між собою. Порушення будь-якої з цих рівностей говорить про те, що платформа екіпажу здійснює поряд з поступовим рухом також обертальні рухи навколо координатних осей самої платформи. Обертальні рухи можна розглядати через зміщення маркерів  $M_1$  і  $M_2$ , виражені через кути між поздовжньою лінією колійної структури та поздовжньою лінією платформи екіпажу при обертанні навколо осі  $OY$  (нишпорення) та кути між поздовжньою лінією колійної структури та поздовжньою лінією платформи екіпажу при обертанні навколо осі  $OZ$  (тангаж) (рис. 5 та 6).

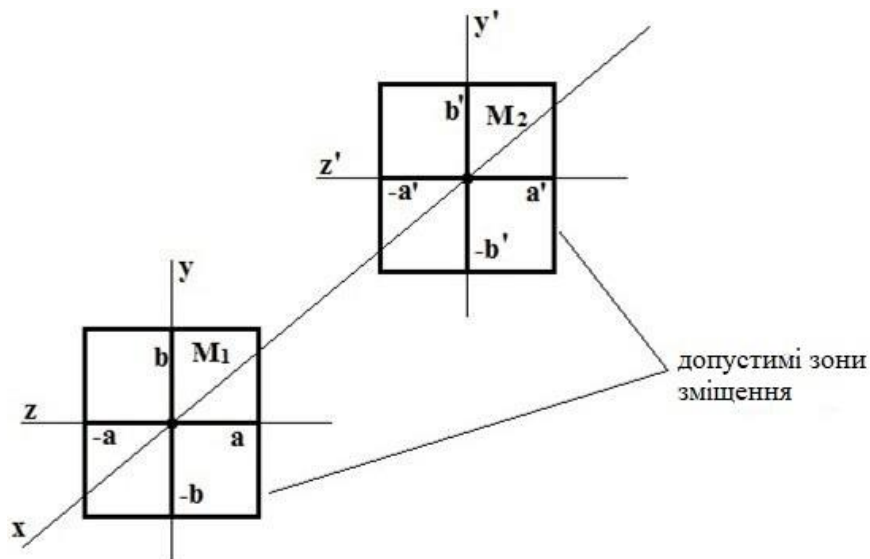


Рис. 4. Зони зміщення маркерів  $M_1$  та  $M_2$  у межах координат  $a, -a$  ( $a', -a'$ ) и  $b, -b$  ( $b', -b'$ )

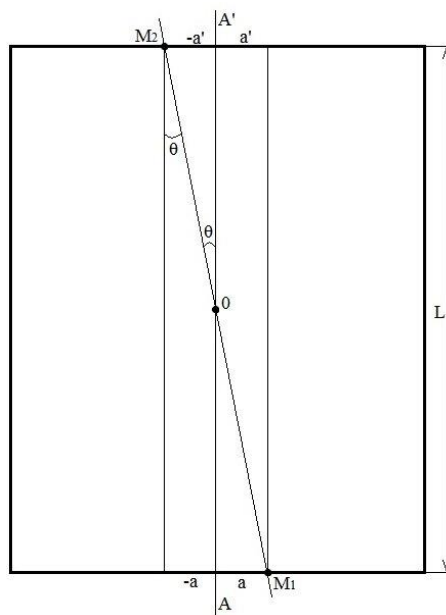
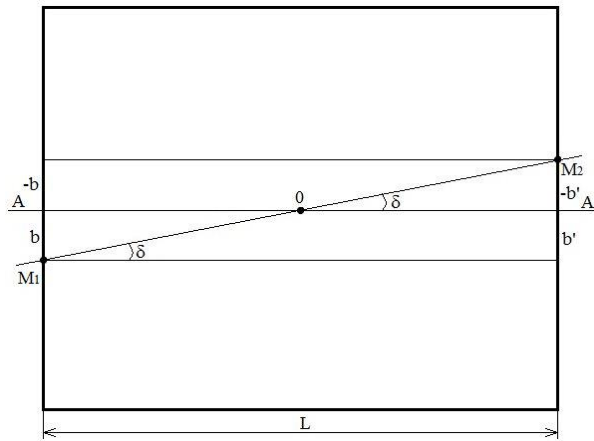


Рис. 5. Взаємне розташування поздовжньої осі платформи екіпажу  $M_1 M_2$  та поздовжньої осі колійної структури  $A'A$  при обертанні платформи екіпажу навколо вертикальної осі  $OY$

Кут обертання  $\theta$  навколо осі  $OY$  на підставі геометричних побудов рис. 5 визначається виразом

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{a' - a}{L}, \quad (7)$$

де  $a$  та  $a'$  координати зміщення маркерів  $M_1$  і  $M_2$  по осі  $OZ$  на фронтальній та тильній стороні платформи екіпажу відповідно, а  $L$  – довжина платформи (відстань між маркерами вздовж поздовжньої осі платформи)



**Рис. 6. Взаємне розташування поздовжньої осі платформи екіпажу  $M_1M_2$  та поздовжньої осі колійної структури  $A'A$  при обертанні платформи екіпажу навколо горизонтальної осі  $OZ$**

Число можливих поєднань координат маркерів у межах  $a$  та  $-a$  і  $a'$  та  $-a'$  подано в табл. 1. Координати  $a$  та  $a'$  повинні братися з урахуванням знаків, тоді знак, отриманий у результаті обчислень, буде вказувати напрямок обертання платформи – вліво або вправо, відносно поздовжньої осі колійної структури.

**Таблиця 1. Поєднання координат маркерів при обертанні навколо осі  $OY$**

№	1	2	3	4	5	6	7	8
Взаємне розташування маркерів								
Відношення між $ a $ і $ a' $	$ a  <  a' $	$ a  >  a' $	$ a  <  a' $	$ a  >  a' $	$ a  <  a' $	$ a  >  a' $	$ a  >  a' $	$ a  <  a' $
Знак кута повороту	+	-	-	-	+	+	+	-
Напрямок повороту	право	ліво	ліво	ліво	право	право	право	ліво

Аналогічним чином визначається кут обертання  $\delta$  навколо осі  $OZ$

$$\delta = \arctg \frac{b'-b}{L}, \quad (8)$$

де  $b$  і  $b'$  – координати зміщення маркерів  $M_1$  і  $M_2$  по осі  $OY$  на фронтальній та тильній стороні платформи екіпажу відповідно.

Орієнтація поздовжньої осі платформи екіпажу через координати маркерів  $M_1$  і  $M_2$  відносно поздовжньої осі колійної структури  $AA'$  при обертанні платформи екіпажу навколо горизонтальної осі  $OZ$  представлена на рис. 6. Число можливих поєднань координат маркерів у межах  $b$  і  $-b$  та  $b'$  і  $-b'$  подано в табл. 2.

Таблиця 2. Поєднання координат маркерів при обертанні навколо осі  $z$

№	Взаємне розташування маркерів	Відношення між $ b $ і $ b' $	Знак кута повороту	Напрямок поворота
1		$ b  >  b' $	-	вниз
2		$ b  <  b' $	+	вгору
3		$ b  >  b' $	+	вгору
4		$ b  <  b' $	+	вгору
5		$ b  >  b' $	-	вниз
6		$ b  <  b' $	-	вниз
7		$ b  <  b' $	-	вниз
8		$ b  >  b' $	+	вгору

Координати  $b$  і  $b'$  повинні прийматись з урахуванням знаків, тоді знак, отриманий в результаті обчислень, вказуватиме напрямок обертання платформи вгору або вниз щодо поздовжньої осі колійної структури.

Що стосується визначення крену, то його рівень вимірюється за допомогою третього маркера і обчислюється аналогічно за попередніми розрахунками. Маркер розташований на екіпажі в площині ХУ, але не на лінії  $M_1 - M_2$ . Частоти маркерів рознесені для селекції на приймаючому боці диспетчерського пункту.

**Висновки.** Таким чином, за результатами проведених досліджень, в роботі обґрунтовано таке: фазова далекометрія з одним випромінювачем на платформі екіпажу дозволяє визначати положення екіпажу на перегоні, його зміщення в горизонтальній площині щодо поздовжньої осі колійної структури та висоту підвісу між днищем екіпажу і шляхопроводом, а наявність трьох випромінювачів дозволять реєструвати три обертові рухи (тангаж, нишпорення та крен).

Новизна роботи полягає в обґрунтуванні способу *безперервного* позиціонування високошвидкісного магнітолевітуючого транспортного засобу по 6-ти ступенях свободи на основі фазової далекометрії для *довільної* конфігурації в тривимірному просторі фіксованого шляхопроводу та *цілісність* навігаційної системи.

Розглянутий метод навігації призначений для використання в високошвидкісних транспортних наземних системах на магнітному підвісі, організації автоматизованого управління рухом колісним транспортом на локальних майданчиках виробничого призначення, організації швидкісного малорозмірного муніципального транспорту індивідуального користування.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Интеллектуальные транспортные системы железнодорожного транспорта (основы инновационных технологий): пособие./ В. В. Скалозуб, В. П. Соловьев, И. В. Жуковичкий, К. В. Гончаров. Д. : Изд-во Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2013. 207 с.
2. Henning U. Advanced Converter and Control Components of the TRANSRAPID Propulsion System // Proceedings of International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems (STECH 03), August 19 to 22, 2003, Tokyo, Japan. Department of Mechanical Systems Engineering of Tokyo Univ. of Agriculture & Technology.
3. Yang Y., Mao Y., Sun B. Basic performance and future developments of BeiDou global navigation satellite system. Satellite Navigation 1.1, 2020. С. 1-8. <https://doi.org/10.1186/s43020-019-0006-0>.
4. Farahneh H., Fernando X. Modeling the leaky feeder as a multi antenna array. 2014 IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2014. С. 1-5. <https://doi.org/10.1109/CCECE.2014.6901150>.
5. Wang H., Yu F. R., Zhu L., Tang T., Ning B. Finite-State Markov. Modeling of Leaky Waveguide Channels in Communication-based Train Control (CBTC) Communications Letters, IEEE, 2013. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1308.2188>
6. Системы управления и энергообеспечения магнитолевитирующего транспорта: монография / Дзензерский В. А. и др. Донецк : Киев: Наукова думка, 2014. 276 с.
7. Динамика экипажей нетрадиционных конструкций на сверхпроводящих магнитах: монография / Дзензерский В.А. и др. Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2011. 248 с.
8. Richard C.Dorf. The engineering handbook. CRC press, 2018, 232 с.
9. Плаксин С.В., Шкиль Ю.В. Навигационная система магнитолевитирующего экипажа на основе синхронизированных СВЧ генераторов., Радиоелектроника. Информатика. Управление, 2005. №13. С. 48–53.
10. Golovkov V. Potarova N. Rudenko P. Stradov, B.. Receiving system of a pulsed laser rangefinder. Journal of Optical Technology, 2020. <https://doi.org/10.1364/JOT.87.000688>
11. Hoeher P. Optical Ranging and Visible Light Positioning, 2019. <https://doi.org/10.3139/9783446463035.011>
12. Mizuno T. Laser rangefinders for planetary exploration, 2017. С. 28-29. <https://doi.org/10.23919/MOC.2017.8244480>
13. França T. N., Shi H., Deng Z., Stephan R. M.. Overview of Electrodynamics Levitation Technique Applied to Maglev Vehicles. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021. <https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3089104>
14. Lv G., Liu Y., Zhang Z., Zhou T. Characteristic Analysis of Coreless-Type Linear Synchronous Motor With the Racetrack Coils as Secondary for EDS Maglev Train. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022. С. 1-11. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2022.3163520>
15. Shao N., Wang M., Hou Q. Analysis on the Dynamic Response of an EDS Maglev Train Based on Pacejka Similarity Tire Model, 2021. С. 72-76. <https://doi.org/10.1109/ICAICA52286.2021.9498233>.

## REFERENCES

1. Skalozub, V. V., Solovyov, V. P., Zhukovitsky, I. V., & Goncharov, K. V. (2013) *Intellektual'nyye transportnyye sistemy zheleznodorozhnogo transporta (osnovy innovatsionnykh tekhnologiy): posobiye* [Intelligent transport systems of railway transport (basics of innovative technologies): manual]. *Izdatel'stvo Dnepropetrovskogo natsional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta im. akad. V. Lazaryana - D.: Publisher of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan.* [in Russian].
2. Uwe, H. (2003). Advanced Converter and Control Components of the TRANSRAPID Propulsion System. In *The Proceedings of International Symposium on Seed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems: STECH 2003* (pp. 577-582). The Japan Society of Mechanical Engineers.
3. Yang, Y., Mao, Y., & Sun, B. (2020). Basic performance and future developments of BeiDou global navigation satellite system. *Satellite Navigation*, 1(1), 1-8. <https://doi.org/10.1186/s43020-019-0006-0>.
4. Farahneh, H., & Fernando, X. (2014, May). Modeling the leaky feeder as a multi antenna array. In *2014 IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*. (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CCECE.2014.6901150>.
5. Wang, H., Yu, F. R., Zhu, L., Tang, T., & Ning, B. (2013). Finite-state Markov modeling of leaky waveguide channels in communication-based train control (CBTC) systems. *IEEE communications letters*, 17(7), 1408-1411. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1308.2188>
6. Dzenzerskiy, V.A. et al. (2011). *Sistemy upravleniya y enerhoobespecheniya mahnytolevyutyruishcheho transporta: monohrafiya* [Systems of management and energy supply of magnetolevitating transport: monograph]. *Kyev: Naukova dumka - Kyiv: Scientific opinion.*
7. Dzenzerskiy V.A. (2011). *Dinamika ekipazhey netraditsionnykh konstruksiy na sverkhprovodyashchikh magnitakh: monografiya* [Dynamics of Crews of Unconventional Designs on Superconducting Magnets: Monograph]. *Dnepropetrovsk: ART-PRESS*. 248 p. [in Russian].
8. Dorf, R. C. (2018). *The engineering handbook*. CRC press.
9. Plaksyn S.V., Shkyl' Y.V. (2005) *Navigatsionnaya sistema magnitolevitiruyushcheho ekipazha na osnove sinkhronizirovannykh SVCH generatorov* [Navigation system of a maglev crew based on synchronized microwave generators]. *Radioelektronika. Informatyka. Upravlinnya*, 4, 48-53 [in Russian].
10. Golovkov, V. A., Potapova, N. I., Rudenko, P. N., & Stradov, B. G. (2020). Receiving system of a pulsed laser rangefinder. *Journal of Optical Technology*, 87(11), 688-692. <https://doi.org/10.1364/JOT.87.000688>
11. Hoeher, P. (2019). Optical Rangefinding and Visible Light Positioning. *Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG*, 74-80. <https://doi.org/10.3139/9783446463035.011>.
12. Mizuno, T. (2017). Laser rangefinders for planetary exploration, In: *2017 22nd Microoptics Conference (MOC)*, 28-29. <https://doi.org/10.23919/MOC.2017.8244480>.
13. França, T. N., Shi, H., Deng, Z., & Stephan, R. M. (2021). Overview of electrodynamic levitation technique applied to maglev vehicles. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 31(8), 1-5. <https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3089104>.
14. Lv, G., Liu, Y., Zhang, Z., & Zhou, T. (2022). Characteristic Analysis of Coreless-Type Linear Synchronous Motor With the Racetrack Coils as Secondary for EDS Maglev Train. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1-11. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2022.3163520>.
15. Shao, N., Wang, M., & Hou, Q. (2021, June). Analysis on the Dynamic Response of an EDS Maglev Train Based on Pacejka Similarity Tire Model. In *2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA)*. (pp. 72-76). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICAICA52286.2021.9498233>.

*Oleksandr Holota<sup>1</sup>, Serhii Plaksin<sup>2</sup>, Yurii Shkil<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Department of Vehicle Management Systems, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, 5, Pisarzhevskoho, str., Dnipro, 49005, Ukraine

<sup>2</sup> Department of Vehicle Management Systems, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, 5, Pisarzhevskoho, str., Dnipro, 49005, Ukraine

<sup>3</sup> Department of Vehicle Management Systems, Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, 5, Pisarzhevskoho, str., Dnipro, 49005, Ukraine

**DETERMINATION OF THE COORDINATES OF THE SPATIAL ORIENTATION  
OF THE MAGNETOPLAN REGARDING THE RAIL STRUCTURE**

*The article proposes a way to determine the position of the crew of the tape recorder using the method of rangefinder. The basis of the developed idea is the use of emitters with which you can register the rotational movements of the crew (pitch and dredging), as well as to register the roll. According to the results of the research, the following is substantiated: phase rangefinder with one emitter on the crew platform allows to determine the position of the crew on the race, its displacement in the horizontal plane relative to the longitudinal axis of the track structure and the height of the suspension between the crew bottom and three rotational movements (pitch, digging and roll).*

*The novelty of the work is to substantiate the method of continuous positioning of high-speed magnetic levitation vehicle on 6 degrees of freedom based on phase rangefinder for arbitrary configuration in three-dimensional space of a fixed overpass and the integrity of the navigation system.*

*The considered method of navigation is intended for use in high-speed transport ground systems on a magnetic suspension, the organization of the automated control of movement of wheeled transport on local platforms of industrial function, the organization of high-speed small-scale municipal transport of individual use.*

**Keywords:** *magnetic plane, magnetic suspension, moving platform, center of gravity, phase rangefinder.*