

УДК 681.2.088

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.1.160

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ КОМПЛЕКСУВАННЯ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ ЛІНІЙНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ ДОРОЖНЬОЇ МАШИНИ

Коваль О. А.¹, Коваль А. О.¹

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Обґрунтовано комплексне використання ультразвукового та оптичного методів для дистанційного вимірювання лінійних переміщень елементів конструкції дорожньої машини. Показано, що для зменшення похибок вимірювань необхідно комплексувати ультразвуковий та оптичний метод вимірювання лінійного переміщення. У роботі обґрунтована методика оцінки похибок вимірювань лінійного переміщення елементів конструкції дорожньої машини в процесі комплексування оптичного та ультразвукового методів, наведено обмеження застосування кожного із досліджених методів. Розглянуті результати експериментальних досліджень похибок вимірювань лінійного переміщення елементів конструкції дорожньої машини в процесі комплексування оптичного SHARP-GP2Y0A710K0F та ультразвукового HC-SR04 датчиків.

Ключові слова: комплексування, далекомір, похибки вимірювань, ультразвук, оптичний метод, дорожня машина.

Вступ

Дорожня машина – складний технічний комплекс. Ефективність її використання для виконання технологічних процесів значною мірою визначається ефективністю управління робочими органами. Для оптимізації управління робочими органами машини необхідно контролювати просторове положення елементів конструкції дорожньої машини як один відносно іншого, так і щодо поверхні ґрунту.

У цій роботі пропонується для вимірювання лінійних переміщень елементів конструкції дорожньої машини використовувати ультразвукові та оптичні датчики лінійних переміщень.

Проведені авторами дослідження на вимірювальному стенді показали, що для зменшення похибок вимірювань необхідно комплексувати ультразвуковий та оптичний метод вимірювання лінійного переміщення.

Аналіз публікацій

У процесі адаптації дорожньої машини до динамічних навантажень суттєвим є постійний контроль як просторового положення окремих елементів конструкції, так і лінійного та кутового переміщення одного елемента щодо іншого [1]. Це завдання, зазвичай, вирішується шляхом використання далекомірів [1, 2]. Широко використовуються на сьогодні оптичні далекоміри [3–5], які забезпечують як високу точність, так і оперативність вимі-

рювань. Але умови роботи дорожньої машини, а саме запиленість і вібрація [2], не дозволяють їх використовувати повною мірою. Ультразвукові далекоміри [6, 7] дуже чутливі до вологості та температури навколишнього середовища і не завжди забезпечують задану точність вимірювань [8].

Отже, має місце актуальне завдання пошуку шляхів підвищення точності дистанційних вимірювань лінійного переміщення елементів конструкції дорожньої машини.

Мета і постановка завдання

Метою є дослідження похибок вимірювань лінійного переміщення елементів конструкції дорожньої машини в процесі комплексування ультразвукових та оптичних датчиків лінійних переміщень.

Для досягнення поставленої мети необхідно розкрити функціональні можливості датчиків; представити принцип вимірювання лінійних переміщень елементів конструкції дорожньої машини.

Дослідження інфрачервоного вимірювача відстані SHARP-GP2Y0A710K0F

Датчики вимірювання відстані SHARP – доступні, ефективні й прості у використанні датчики, що дозволяють визначати відстань до об'єкта або перешкоди. Відстань до об'єкта сенсори визначають за допомогою триангуляції.

Імпульс світла (в інфрачервоному діапазоні: довжина хвилі $850 \text{ nm} \pm 70 \text{ nm}$), випромінюється й відбивається назад від перешкоди (або не відбивається). Кут падіння світлового променя, що повертається, залежить від відстані до об'єкта [3].

Триангуляція працює шляхом виявлення цього відбитого променя й визначення кута відбиття, з якого вже може бути визначена відстань. Датчик має спеціальний інфрачервоний об'єктив, який приймає відбитий інфрачервоний промінь на спеціальну матрицю (CCD array). На основі даних матриці визначається кут відбиття, який потім використовується для розрахунку дальності. Відповідне значення дальності подається на аналоговий вихід сенсора, яке може бути зчитане мікроконтролером.

Для захисту від можливих перешкод сенсори SHARP випромінюють інфрачервоний сигнал із модульованою частотою. Це дозволяє практично повністю застрахуватися від перешкод від навколишнього світла. Крім того, датчики показують майже повну нечутливість до кольору об'єкта виявлення (датчик здатний виявляти чорні стіни за умови сонячного світла) [4].

SHARP-GP2Y0A710K0F [4, 5] – це інфрачервоний датчик вимірювання відстані з великим діапазоном її визначення: від 100 см до 500 см і що працює за принципом триангуляції.

Цей тип інфрачервоного датчика був вибраний для досліджень, виходячи з таких вимог:

- волого- та пилозахисність;
- здатність працювати автономно від батарей та акумуляторів (адже він буде розміщений на конструкції дорожньої машини);
- діапазон вимірювань повинен лежати в межах від 30 см до 160 см.

Датчик SHARP-GP2Y0A710K0F має такі технічні характеристики [5]:

1. Діапазон вимірювань – від 15 см до 400 см;
2. Вихід – аналоговий;
3. Напруга живлення – від 4,5 В до 5 В.
4. Споживаний струм – 330 мА.

Датчик SHARP-GP2Y0A710K0F має нелінійний вихід. Тобто за умови лінійної зміни відстані до (або від) об'єкта сигнал на аналогову вихід збільшується (зменшується) нелінійно. Функція перетворення датчика наведена на рис. 1 [9].

Характерною особливістю функції перетворення інфрачервоного датчика SHARP-

GP2Y0A710K0F є злом в діапазоні вимірюваних відстаней від 0 см до 15 см. Це зумовлено бланкуванням (закриттям) приймального тракту для захисту від засвітки випромінюваним передавачем імпульсом. Таким чином має місце «мертва» зона від 0 см до 15 см, де датчик не може проводити вимірювання.

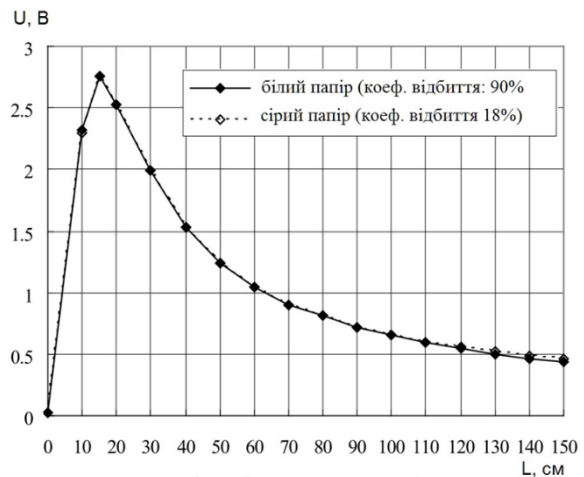


Рис. 1. Функція перетворення датчика SHARP-GP2Y0A710K0F

Разом із тим варто зазначити, що контрастність та колір об'єкта майже не впливають на рівень вихідного сигналу датчика.

Методика вимірювання відстані з використанням інфрачервоного датчика SHARP-GP2Y0A710K0F

В основу методики визначення відстані датчиком SHARP-GP2Y0A710K0F покладена лінійна залежність вихідного сигналу від величини зворотної вимірюваної відстані L – $1/L$. Ця залежність дається виробником в описі технічних характеристик датчика [9, 12, 13]] і має вигляд, наведений на рис. 2.

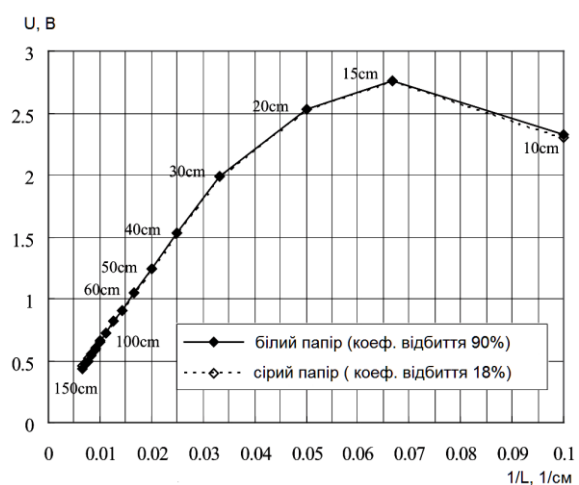


Рис. 2. Залежність вихідного сигналу датчика від величини зворотної вимірюваної відстані

Із цього рисунка видно, що залежність $U = f(1/L)$ на відрізку від 0,0059 1/см до 0,033 1/см лінійна. А це означає, що необхідно визначити параметри цього відрізка та використати їх для перерахунку напруги на виході датчика у відстань.

Рівняння прямої описується виразом:

$$y = k \cdot x + b, \quad (1)$$

де $k = \operatorname{tg}(\varphi)$ – кутовий коефіцієнт прямої, а φ – кут між прямою та віссю OX ; b – точка перетину прямої з віссю OY (якщо $x=0$).

Разом із тим рівняння прямої за двома точками (x_1, y_1) та (x_2, y_2) має вигляд:

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}, \quad (2)$$

де (x_1, y_1) та (x_2, y_2) – координати точок, через які проходить пряма.

З рівняння (2) можна визначити кутовий коефіцієнт прямої як:

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}. \quad (3)$$

Визначимо рівняння прямої для лінійної ділянки залежності $U = f(1/L)$ (рис. 2). Варто зазначити, що необхідний нам діапазон вимірювань лінійного переміщення елементів конструкції дорожньої машини визначається як їхніми розмірами, так і конструкцією безпосередньо дорожньої машини. Для різних машин він буде різним. Для екскаватора та автогрейдера цей діапазон вимірювань лежить у межах від 30 см до 160 см. Відповідна лінійна ділянка залежності $U = f(1/L)$ (рис. 2) буде мати межі від 0,0059 1/см до 0,033 1/см.

На рис. 3 наведено фрагмент залежності $U = f(1/L)$, у межах якої будуть проводитися вимірювання відстані з використанням датчика SHARP-GP2Y0A710K0F.

Для нашого випадку координати початку та кінця лінійного відрізка залежності $U = f(1/L)$ мають координати А (0,0059 1/см; 0,4 В) та В (0,033 1/см; 2,0 В). Лінія перетинає вісь U за умови $1/L=0$ у точці 0,048 В, тобто $b=0,048$ В. Визначаємо кутовий коефіцієнт:

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{2 - 0,4}{0,033 - 0,0059} = \frac{1,6}{0,0271} = 59 \text{ В} \cdot \text{см}.$$

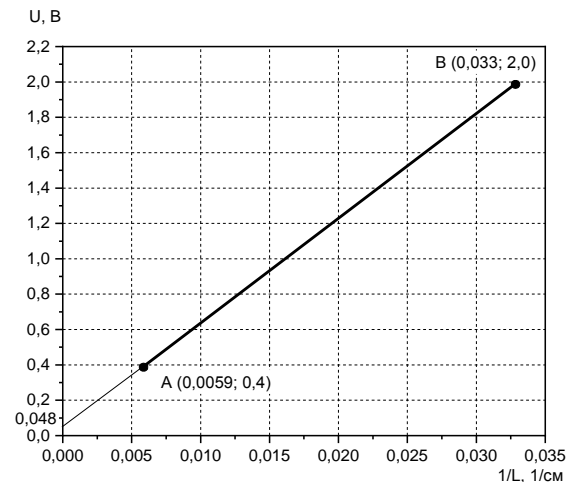


Рис. 3. Лінійна ділянка залежності вихідного сигналу датчика від величини зворотної вимірюваної відстані

Отже, апроксимаційний вираз для лінійної ділянки функції $U = f(1/L)$ буде мати вигляд:

$$U = 59 \cdot \frac{1}{L} + 0,0048. \quad (4)$$

Розрахункова формула для визначення відстані L інфрачервоним датчиком SHARP-GP2Y0A710K0F буде мати вигляд:

$$L = \frac{59}{U - 0,0048}. \quad (5)$$

На рис. 4 наведена функція перетворення (5) відповідно до заданого діапазону вимірювань відстані.

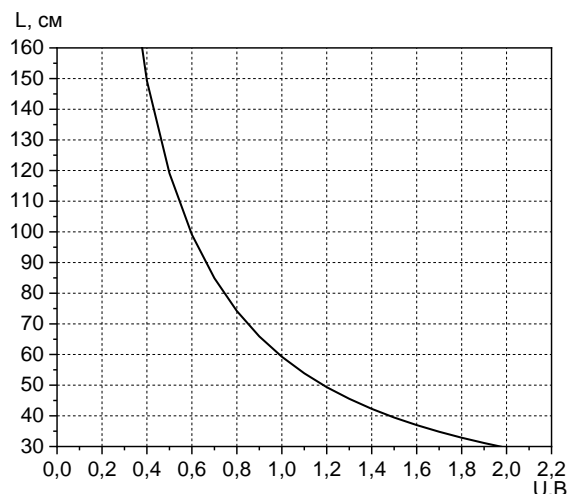


Рис. 4. Розрахункова функція перетворення датчика SHARP-GP2Y0A710K0F

Отримані внаслідок експериментальних досліджень дані вимірювань відстані до об'єкта були систематизовані та наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати вимірювань відстані інфрачервоним датчиком

Виміряна напруга на виході датчика, В	Розрахункова відстань, см	Виміряна відстань, см	Похибка вимірювань, см
0,1	619,7479	619,744	-0,00379
0,2	302,2541	302,245	-0,00855
0,3	199,8645	199,867	0,00302
0,4	149,2915	149,288	-0,00316
0,5	119,14378	119,154	0,01107
0,6	99,12634	99,1241	-0,00219
0,7	84,86766	84,8578	-0,00978
0,8	74,19517	74,1756	-0,01953
0,9	65,90706	65,9148	0,00776
1	59,28457	59,2724	-0,01214
1,1	53,87144	53,8783	0,00693
1,2	49,36412	49,3657	0,00166
1,3	45,55281	45,5501	-0,00264
1,4	42,28784	42,2941	0,00634
1,5	39,4596	39,4462	-0,01334
1,6	36,98596	36,9778	-0,00808
1,7	34,80415	34,8091	0,00496
1,8	32,86542	32,8491	-0,0163
1,9	31,13128	31,1155	-0,01569
2	29,57097	29,5578	-0,01309
2,1	28,1596	28,1678	0,00821
2,2	26,87682	26,8742	-0,00258

Дослідження показали, що отримані експериментально дані відрізняються від розрахункових. Похибка має випадковий характер (рис. 5), лежить у межах ціни молодшого розряду АЦП і не перевищує ± 2 мм.

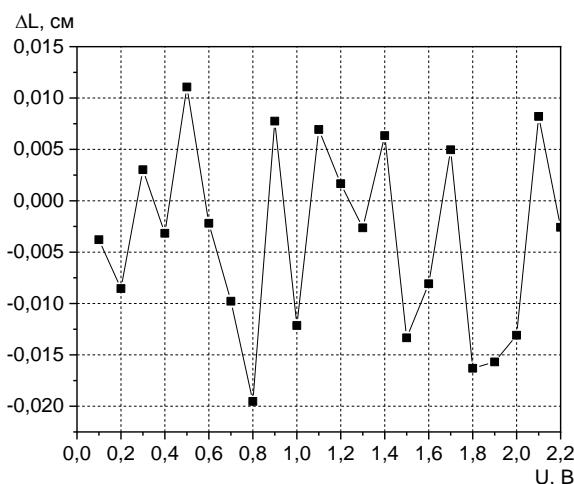


Рис. 5. Похибки вимірювань відстані інфрачервоним датчиком

Закон розподілу похибок близький до нормального (рис. 6). Можна стверджувати, що похибки вимірювань визначаються шумами АЦП.

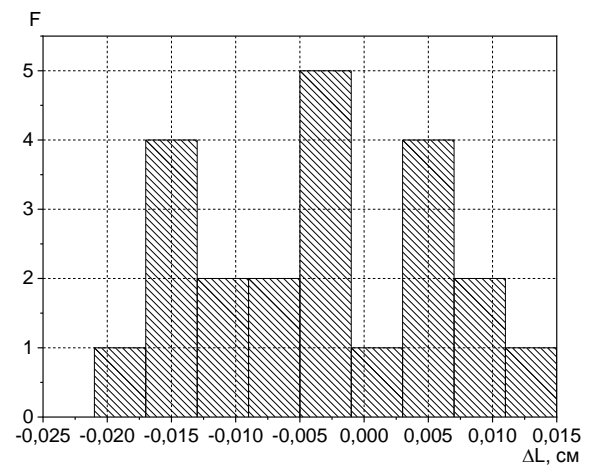


Рис. 6. Гістограма похибок вимірювань відстані інфрачервоним датчиком

Отже, датчик SHARP-GP2Y0A710K0F є аналоговим. Він не є функціонально закінченою вимірювальною системою та потребує як додаткового підсилення вихідного сигналу, так і аналого-цифрового перетворення. Функція перетворення датчика має нелінійний характер. Тому у використанні датчика в складі вимірювальних комплексів необхідно вживати додаткових заходів до її лінеаризації. Інфрачервоний датчик дозволяє проводити вимірювання із заданою точністю (± 2 мм) у діапазоні від 30 см до 170 см.

Дослідження ультразвукового вимірювача відстані HC-SR04

Ультразвуковий датчик HC-SR04 [6–8] – це стабільний і точний вимірювач відстані, який не має «сліпих зон». Він може вимірювати відстань від 0 мм до 1500 мм, точність досягає 3 мм.

Для проведення вимірювань необхідно виконати таку послідовність дій [10, 11] (рис. 7):

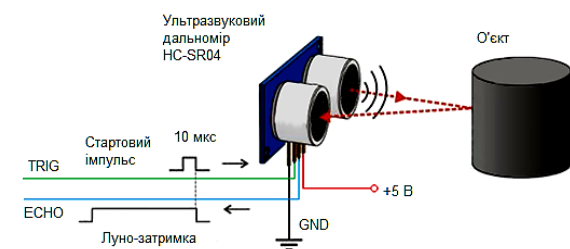


Рис. 7. Сигнали управління датчиком HC-SR04

1. Коротким імпульсом (2–5 мс) переводимо датчик відстані в режим ехолокації, у процесі якого в навколишній простір випромінюються ультразвукові хвилі із частотою 40 КГц.

2. Чекаємо, поки датчик проаналізує відбиті сигнали й після затримки визначаємо відстань.

3. Отримуємо значення відстані. Для цього чекаємо, поки HC SR04 видасть на вході ЕСНО імпульс, пропорційний відстані. Ми визначаємо тривалість імпульсу за допомогою функції `pulseIn`, яка поверне нам час, що пройшов до зміни рівня сигналу (у нашому випадку до появи зворотного фронту імпульсу).

4. Отримавши час, ми переводимо його у відстань у сантиметрах шляхом ділення значення на константу (для датчика SR04 це 29,1 для сигналу «туди», стільки ж для сигналу «назад», що в сумі дасть 58,2).

5. Якщо датчик відстані не виконує зчитування сигналу, то перетворення вихідного сигналу ніколи не прийме значення короткого імпульсу – LOW. Тому що в деяких датчиків час затримки варіюється залежно від виробника.

6. Якщо відстань становить більше ніж 3 м, за умови якої HC-SR04 починає працювати не стійко, час затримки краще виставляти більше ніж 20 мс, тобто 25 мс або 30 мс.

У процесі досліджень датчика HC-SR04 спостерігалася залежність результатів вимірювання фіксованої відстані 50,5 см від температури. Результати досліджень наведені на рис. 8.

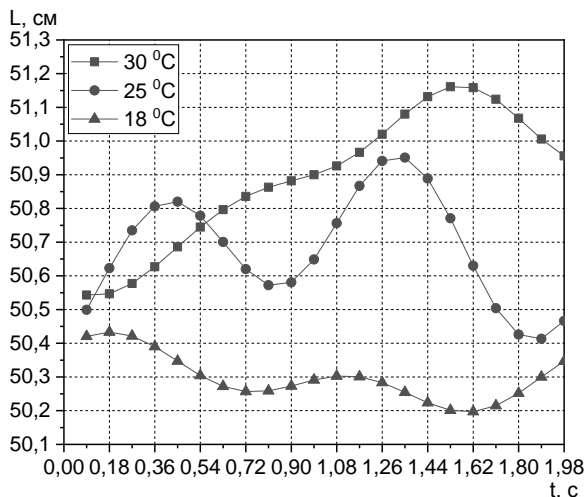


Рис. 8. Залежність вимірюваної відстані датчиком HC-SR04 від температури

Установлено, що на інтервалі в 2 с найменші флуктуації результатів вимірювань ± 2 мм були за умови температури навколишнього середовища $T = 18$ °C. У процесі зростання температури до $T = 30$ °C флуктуації результатів вимірювань становили вже ± 10 мм.

Висновки

Унаслідок проведених досліджень методу комплексування для зменшення похибок вимірювань лінійного переміщення елементів конструкції дорожньої машини досліджені ультразвуковий HC-SR04 та інфрачервоний Sharp GP2Y0A21YK вимірювачі відстані. Оцінено похибки вимірювань відстані датчиком Sharp GP2Y0A21YK. Інфрачервоний датчик дозволяє проводити вимірювання із заданою точністю (± 2 мм) у діапазоні від 30 см до 170 см. Також оцінено похибки вимірювань відстані датчиком HC-SR04. За час вимірювань найбільш стабільними були вимірювання за умови $T = 18$ °C, $\Delta L = -0,3$ см. Із збільшенням температури збільшується і похибка вимірювань: якщо $T = 25$ °C, ΔL лежить у межах від $-0,1$ см до $+0,45$ см; якщо $T = 30$ °C, ΔL лежить у межах від $+0,05$ см до $+0,65$ см. Уже навіть у разі температури навколишнього середовища $T = 25$ °C похибка вимірювання відстані буде перевищувати інструментальну похибку в 0,02 см.

Унаслідок комплексування датчиків HC-SR04 та Sharp GP2Y0A21YK відносна похибка вимірювань може бути зменшена майже в 1,5 раза.

Запропоновані в цій роботі рішення доцільно використовувати в процесі наукових досліджень конструкції дорожньої машини та в навчальному процесі.

Література

1. Коваль А. О., Єфіменко Н. М. Обґрунтування необхідності інтелектуалізації інформаційно-вимірювальної системи дорожніх машин. Проблеми інформатики і моделювання: сб. науч. тр. 10-й Межд. конф. Харків: НТУ «ХП», 2010. С. 98–105.
2. Холодов А. М., Ничке В. В., Назаров Л. В. Землеройно-транспортные машины: справочник. Харьков: Высшая школа, 1982. 192 с.
3. Датчик SHARP-GP2Y0A710K0F. URL: <http://robocraft.ru/files/sensors/Sharp/GP2Y0A02YK0FGP2Y0A02YK0F.pdf>.
4. Sensor SHARP-GP2Y0A710K0F. URL: <http://playground.arduino.cc/Main/SharpIR>.
5. SHARP GP2Y0A02YK0F. URL: http://zelectro.cc/SHARP_GP2Y0A02YK0F.
6. Ультразвуковой датчик. URL: <https://arduino.ua/prod182-yltrazvykovoi-datchik-rasstoyaniya-hc-sr04>.
7. Sensor HC-SR04. URL: <https://arduinomaster.ru/datchiki-arduino/ultrazvukovoj-dalnomer-hc-sr04/>
8. Ограничения HC-SR04. URL: <https://arduinomaster.ru/datchiki-arduino/ultrazvukovoj-dalnomer-hc-sr04/>

9. Инфракрасный дальномер. URL: <https://ru.coursera.org/lecture/roboty-arduino/3-2-infrakrasnyi-dal-nomier-06s8t>.
10. Разработка и эксплуатация ультразвукового сенсора наполнения бака. URL: <https://habr.com/post/313816>.
11. Ультразвуковой датчик расстояний. URL: http://www.alexeyk.com/ru/text/review_HCSR04_arduino.html.
12. ИК-дальномеры SHARP. URL: <http://roboforum.ru/wiki>.
13. Эксплуатация оптических дальномеров. URL: http://www.hvwttech.com/products_view.asp?ProductID=91.

References

1. Koval A. O., Yefimenko N. M. Obgruntuvannia neobkhidnosti intelektualizatsii informatsiivnyvmiriuvanoi systemy dorozhnikh mashyn. Problemy informatiki i modelirovaniya: sb. nauch. tr. 10-j Mezhd. konf. Khar'kov: NTU "KHPI", 2010. S. 98–105.
2. Kholodov A. M., Nichke V. V., Nazarov L. V. Zemlerojno-transportnye mashiny: spravochnik. Khar'kov: Vysshaya shkola. 1982. 192 s.
3. Datchik SHARP-GP2Y0A710K0F. URL: <http://robocraft.ru/files/sensors/Sharp/GP2Y0A02YK0FGP2Y0A02YK0F.pdf>.
4. Sensor SHARP-GP2Y0A710K0F. URL: <http://playground.arduino.cc/Main/SharpIR>.
5. SHARP GP2Y0A02YK0F. URL: http://zelectro.cc/SHARP_GP2Y0A02YK0F.
6. Ul'trazvukovoj datchik. URL: <https://arduino.ua/prod182-yltrazvykovoiodatchik-rasstoyaniya-hc-sr04>.
7. Sensor HC-SR04. URL: <https://arduinomaster.ru/datchiki-arduino/ultrazvukovoj-dalnomer-hc-sr04>.
8. Ogranicheniya HC-SR04. URL: <https://arduinomaster.ru/datchiki-arduino/ultrazvukovoj-dalnomer-hc-sr04>.
9. Infrakrasnyj dal'nomer. URL: <https://ru.coursera.org/lecture/roboty-arduino/3-2-infrakrasnyi-dal-nomier-06s8t>.
10. Razrabotka i ehkspluatatsiya ul'trazvukovogosenhora napolneniya baka. URL: <https://habr.com/post/313816>.
11. Ul'trazvukovoj datchik rasstoyanij. URL: http://www.alexeyk.com/ru/text/review_HCSR04_arduino.html.
12. ИК-дальномеры SHARP. URL: <http://roboforum.ru/wiki>.
13. Ekspluatatsiya opticheskikh dal'nomerov. URL: http://www.hvwttech.com/products_view.asp?ProductID=91.

Коваль Александр Андрійович, к.т.н., доцент, кафедра метрології та безпеки життєдіяльності, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна, koval_al@ukr.net, +38068-60-62-067,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5690-2749>.

Коваль Андрій Олександрович, к.т.н., кафедра метрології та безпеки життєдіяльності, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна, koval_andrey79@ukr.net, +38068-60-62-068, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6819-6423>.

Исследование метода комплексирования для уменьшения ошибок измерений линейного перемещения элементов конструкции дорожной машины

Аннотация. Обосновано комплексное использование ультразвуковых и оптических методов дистанционного измерения линейных перемещений элементов конструкции дорожных машин. Показано, что для уменьшения ошибок измерений необходимо комплексировать ультразвуковой и оптический метод измерения линейного перемещения.

Ключевые слова: комплексирование, дальномер, погрешности измерений, ультразвук, оптический метод, дорожная машина.

Коваль Александр Андреевич, к.т.н., доцент, кафедра метрологии и безопасности жизнедеятельности, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, ул. Ярослава Мудрого, 25, г. Харьков, Украина, 61002, koval_al@ukr.net, +38068-60-62-067, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5690-2749>.

Коваль Андрей Александрович, к.т.н., кафедра метрологии и безопасности жизнедеятельности, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, ул. Ярослава Мудрого, 25, Украина, г. Харьков, 61002, koval_andrey79@ukr.net, +38068-60-62-068, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6819-6423>.

Research the complexity method to reduce errors in the measurement of linear movement of elements of road machine design

Abstract. Problem. Currently, the problem of optimal control of the road machines is one of the most pressing tasks. Consequently, there is a significant need for on-board multifunctional measuring systems. Along with this, today measuring systems are mainly used only to provide control of power units. It is still relevant to determine the spatial position of the working bodies of the road machine in order to optimize their movement when performing working technological processes. **Goal.** The goal is to investigate the measurements of linear movement of road machine design elements when complexing ultrasonic and optical sensors of linear movements. **Methodology.** The analytical and experimental research methods for the development and application of onboard measuring systems have been used. When complex the method of sensors combined into one

system, the methods of system analysis were used. **Results.** Functional features of application of optical and ultrasonic gauges for measurements of linear moving elements of a design of the road machines are revealed. Principles of measurements of linear moving are investigated at complex use of gauges in a uniform measuring system. **Originality.** In order to improve the accuracy of technological processes and optimal control of the road machine, it is proposed to measure the linear movement of structural elements both relative to each other and relative to the earth's surface. The combined use of ultrasonic and optical methods will significantly reduce measurement errors. **Practical value.** The use of the proposed method for measuring the relative position of the structural elements of a road machine design will make it possible to perform high-quality technologi-

cal processes at any time of the year or day, regardless of the current natural and weather conditions.

Key words: complexation, rangefinder, measurement errors, ultrasound, optical method, road machine.

Oleksandr Koval, PhD, Associate Professor, Department of Metrology and life safety, Kharkiv national automobile and highway University, Yaroslava Mudrogo str., 25, Ukraine, Kharkiv, 61002, koval_al@ukr.net, +38068-60-62-067,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5690-2749>.

Andrii Koval, Candidate of Technical Sciences, Department of Metrology and life safety, Kharkiv national automobile and highway University, Yaroslava Mudrogo str., 25, Ukraine, Kharkiv, 61002, koval_andrey79@ukr.net, +38068-60-62-068, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6819-6423>.
