



УДК 629.3.017.5

- © В.Б. Агєєв, канд. техн. наук,
- © Ю.В. Бабін,
- © З.А. Зарецький,
- © В.С. Момот,
- © О.А. Кривенчук (ДП “ДержавтотрансНДІпроект”)

# УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ КАЛІБРУВАННЯ (ПОВІРКИ) СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ТА ШЛЯХУ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ПІД ЧАС ВИПРОБУВАНЬ КОЛІСНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

**Анотація.** Пропонується методика калібрування (повірки) високоточних систем вимірювання швидкості та шляху, що використовуються під час випробувань колісних транспортних засобів; проведено аналіз бюджету похибки запропонованого методу калібрування, а також наведено отримані результати калібрування бортового вимірювального комплексу БИК-1.

**Ключові слова:** колісний транспортний засіб, система вимірювання швидкості, похибка вимірювання, калібрування, періодична повірка, Правила ЄЕК ООН, датчик, ціна імпульсу.

**Аннотация.** Предлагается методика калибровки (поверки) высокоточных систем измерения скорости и пути, используемой во время испытаний колесных транспортных средств; проведен анализ бюджета погрешности предложенного метода калибровки, а также приведены полученные результаты калибровки бортового измерительного комплекса БИК-1.

**Ключевые слова:** колесное транспортное средство, система измерения скорости, погрешность измерения, калибровка, периодическая поверка, Правила ЕЭК ООН, датчик, цена импульса.

**Annotation.** The methods of calibration of precision measurement systems speed and path, one used during testing of wheeled vehicles, the analysis error budget proposed calibration method, and the results are given on-board calibration of measuring complex BIK-1.

**Keywords:** wheeled vehicle, the system speed measurement, measurement error, calibration, periodic verification, UNECE Regulations sensor, price momentum.

## Вступ

Відповідно до вимог чинного законодавства засоби вимірювальної техніки (далі – ЗВТ), що перебувають у сфері поширення державного метрологічного нагляду, підлягають періодичній повірці, а якщо вони використовуються акредитованими у встановленому порядку випробувальними лабораторіями, то підлягають також калібруванню [1, 2].

Через високі метрологічні характеристики більшості ЗВТ, що використовуються для випробувань колісних транспортних засобів (далі – КТЗ), та необхідність застосування для їх періодичної повірки і калібрування спеціалізованих,

іноді унікальних, стендів у експлуатації виникають труднощі технічного та фінансового характеру, пов'язані з підтвердженням їх метрологічних характеристик.

## Основна частина

Під час проведення дорожніх випробувань КТЗ одним із параметрів, який необхідно контролювати в якості основного або режимного, є швидкість КТЗ. Причому в більшості випадків згідно з вимогами чинних в Україні нормативних документів, наприклад, Правил ЄЕК ООН №№ 13, 13Н, 51, 68, 89 тощо, похибка вимірювання швидкості КТЗ не повинна перевищувати (0,5–1,0) %.



Таблиця 1

Метрологічні характеристики ЗВТ для вимірювання швидкості КТЗ

Модель	Принцип роботи	Діапазон вимірювання, км/год	Похибка, км/год, за	
			ТО*	СК*
Microstar	Ефект Доплера	0,5–400	$\leq \pm 1,0$	
VBSS100	GPS-приймач	0–400	$\leq \pm 0,1$	$\pm 0,01$
Correxit H-CE	Фотоелектричний	0,5–250	$\leq \pm 0,2$	ІВ

\* Скорочення: “ТО” – технічний опис; “СК” – сертифікат калібрування виробника; ІВ – інформація відсутня.

Нині для забезпечення такої високої точності вимірювання найбільшого розповсюдження набули системи, побудовані з використанням в якості первинного перетворювача одного з таких датчиків: на ефекті Доплера, спеціальні GPS-приймачі, фотоелектричні. У **табл. 1** наведено метрологічні характеристики типових представників ЗВТ, що використовують зазначені датчики.

Згідно з прийнятою практикою похибка вимірювання зразкових ЗВТ, призначених для повірки та калібрування, повинна бути як мінімум утричі меншою (краще на порядок) похибки ЗВТ, що використовується при випробуваннях [3]. Тобто для систем вимірювання швидкості КТЗ вона повинна становити (0,1-0,3) %, що потребує, як зазначалось вище, застосування спеціальних стендів, які забезпечують імітування руху КТЗ (при нерухомому датчику рухається дорожнє покриття), або спеціальних симуляторів для GPS-приймача. На жаль, у більшості органів, що проводять роботи з повірки та калібрування ЗВТ, таке високоточне та дороге обладнання відсутнє.

Використання методу дорожніх випробувань не забезпечує необхідної точності калібрування (повірки) через складність підтримання з високою точністю незмінної швидкості КТЗ на встановленому відрізку дороги.

Вихідний сигнал датчиків, що використовуються у ЗВТ, наведених в **табл. 1**, по суті прямокутні імпульси, частота яких пропорційна швидкості КТЗ, а кожний імпульс відповідає величині пройденого шляху (2,5-10) мм (ціна імпульсу). Зазвичай, це значення встановлюється користувачем ЗВТ за допомогою відповідного програмування, передбаченого виробником. Тобто, первинними параметрами, що вимірюються, є пройдений шлях та час, а такі похідні, як швидкість та сповільнення, обчислюються за допомогою відповідних перетворень.

Досвід тривалої експлуатації зазначених датчиків виявив таку позитивну властивість, як практична незмінність метрологічних характеристик під час експлуатації, а несправності чи дефекти, які

можуть виникнути, призводять до їх повної відмови, що унеможливує отримання недостовірних результатів випробувань. Таким чином, за наявності заводського (від виробника) сертифіката калібрування в експлуатації достатньо, на наш погляд, перевірити програмно встановлену ціну імпульсу вихідного сигналу датчика. Заводський сертифікат калібрування містить інформацію про реальні метрологічні характеристики датчика, отримані за допомогою спеціального обладнання, зазначеного вище, і які, зазвичай, значно вищі, ніж декларує виробник в експлуатаційній документації.

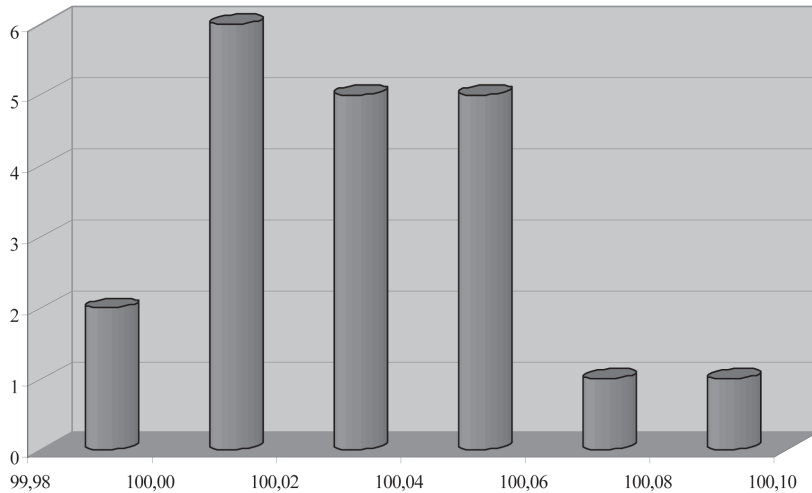
Зважаючи на наведене, пропонується процедуру калібрування або повірки ЗВТ, подібних вказаним у **табл. 1**, проводити у такі два етапи:

- перевірка ціни імпульсу вихідного сигналу датчика;
- калібрування або повірка каналу вимірювання швидкості ЗВТ.

**Перевірка ціни імпульсу вихідного сигналу датчика** здійснюється методом дорожніх випробувань із використанням встановленого на КТЗ фотоствору. На прямолінійній ділянці дороги на відстані, наприклад, 100 м один від одного встановлюються світловідбивні елементи (світлоповертачі), КТЗ проїжджає з постійною швидкістю цей відрізок (точність підтримання незмінної швидкості не впливає на результати визначення ціни імпульсу), а спеціальна програма запам'ятовує загальну кількість імпульсів на встановленому відрізку та обчислює ціну імпульсу. З метою зменшення випадкової складової похибки доцільно провести серію заїздів та застосувати для обробки отриманого масиву даних статистичні методи.

Похибка визначення (перевірки) ціни імпульсу вихідного сигналу датчика включає такі основні складові:

- а) похибка визначення довжини відрізка дороги між встановленими світловідбивними елементами. Залежить від точності застосованого ЗВТ. Сучасні лазерні рулетки на відстані до 200 м мають абсолютну похибку вимірювання, що не перевищує



**Рис. 1.** Результати визначення довжини відрізка дороги, що проїжджав КТЗ ( $s_{\text{прсер}} = 100,035$  мм,  $\sigma_{\text{пр}} = 0,0269$  мм,  $\varepsilon_{\text{імп}} = \pm 0,035$  %)

$\pm 5$  мм. З урахуванням можливої похибки розмітки та встановлення на дорозі світловідбивних елементів приймаємо загальну абсолютну похибку  $\delta_1 = \pm 20$  мм, що на відрізку дороги 100 м призведе до відносної похибки  $\varepsilon_1 = \pm 0,02$  %;

б) похибка щодо можливого недотримання прямолінійного руху КТЗ на відрізку дороги між встановленими світловідбивними елементами. Залежить від декількох факторів, серед яких основними є кваліфікації водія, швидкість КТЗ, на який проводиться визначення ціни імпульсу вихідного сигналу датчика, технічний стан КТЗ, а також застосування додаткових технічних засобів, направлених на дотримання прямолінійного руху КТЗ. Для визначення величини цієї похибки було проведено чотири групи проїздів відрізка дороги довжиною 100 м зі швидкістю 10, 30, 60 та 90 км/год з використанням датчика VBSS100, побудованого на базі GPS-приймача (табл. 1). Кожна група включала

20 вимірів. Результати проведених експериментальних досліджень наведені у табл. 2, а на рис. 1, в якості прикладу, представлена гістограма розподілення отриманих значень довжини відрізка дороги  $s_{\text{пр}}$ , що проїжджав КТЗ на швидкості 10 км/год. За відносну похибку щодо можливого недотримання прямолінійного руху КТЗ приймаємо найбільше з обчислених значень  $\varepsilon_2 = \pm 0,035$  % при середньому квадратичному відхиленні  $\sigma_{\text{пр}} = 0,0269$  %, отримане на швидкості 10 км/год. Якщо за результатами заїздів отримані значення довжини відрізка будуть тільки перевищувати встановлену величину (похибка має знак "+"), то з метою зменшення цієї складової похибки, доцільно її частину вважати систематичною скла-

довою похибки і врахувати під час встановлення на дорозі світловідбивних елементів, зменшивши довжину відрізка дороги на цю величину;

в) похибка щодо можливого недотримання паралельності між прямою руху КТЗ на встановленому відрізку дороги та площиною світловідбивного елемента. Наприклад, відхил від паралельності у межах  $\pm 1^0$  на відстані 1 м між фотоствором, встановленим на КТЗ, і встановленим на дорозі світловідбивним елементом, за проведеними розрахунками, призведе до появи абсолютної похибки  $\delta_3 = \pm 20$  мм або до відносної похибки  $\varepsilon_3 = \pm 0,02$  % (для відрізка дороги 100 м). Необхідно зазначити, що використання в якості світловідбивних елементів автомобільних світлоповертачів, через особливі оптичні властивості їхньої поверхні, значно зменшує цю складову похибки. Проведені експериментальні дослідження показали, що відхил від паралельності на  $\pm 1^0$  при відстані 1 м між фотоствором і світло-

Таблиця 2

**Похибка щодо можливого недотримання прямолінійного руху КТЗ**

Параметр	Швидкість КТЗ, км/год			
	10	30	60	90
$s_{\text{прсер}}$ , М	100,035	100,025	99,981	99,971
$\sigma_{\text{пр}}$ , М	0,0269	0,0219	0,0188	0,0210
$\varepsilon_2$ , %	0,035	0,025	-0,019	-0,029

*Позначення:*  $s_{\text{прсер}}$  – середнє арифметичне значення довжини відрізка дороги, що проїжджав КТЗ;  $\sigma_{\text{пр}}$  – середнє квадратичне відхилення довжини відрізка дороги, що проїжджав КТЗ;  $\varepsilon_2$  – відносна похибка щодо можливого недотримання прямолінійного руху КТЗ.



Таблиця 3

Бюджет похибки визначення ціни імпульсу вихідного сигналу датчика

Найменування складової похибки	Величина, %
Відносна похибка $\varepsilon_1$ визначення довжини відрізка дороги між встановленими світловідбивними елементами	$\pm 0,02$
Відносна похибка $\varepsilon_2$ щодо можливого недотримання прямолінійного руху КТЗ на відрізку дороги між встановленими світловідбивними елементами	$\pm 0,035$
Відносна похибка $\varepsilon_3$ щодо можливого недотримання паралельності між прямою руху КТЗ на встановленому відрізку дороги та площиною світловідбивного елемента	$\pm 0,003$
Відносна похибка $\varepsilon_4$ , пов'язана з дискретним посиленням фотоствором світлових імпульсів	$\pm 0,0028$

відбивним елементом призводить до появи абсолютної похибки  $\delta_3 = \pm 3$  мм або до відносної похибки  $\varepsilon_3 = \pm 0,003$  %;

г) похибка, пов'язана з особливістю роботи фотоствору, а саме з дискретним посиленням світлових імпульсів і, як наслідок, можливою затримкою початку або кінця підрахунку загальної кількості імпульсів вихідного сигналу датчика, що призведе до умовної зміни довжини відрізка дороги між встановленими світловідбивними елементами. Абсолютне значення (мм) цієї похибки обчислюється за допомогою такої формули:  $\delta_4 = 138,889 \cdot v/f$ , де  $v$  – швидкість КТЗ, км/год;  $f$  – частота посилення імпульсів фотоствору, Гц.

Для фотоствору моделі PC50CNR10BA (фірма Carlo Gavazzi, Італія), що використовувався під час перевірки ціни імпульсу вихідного сигналу датчика,  $f = 5000$  Гц. Наприклад, при  $v = 100$  км/год

абсолютна похибка  $\delta_4 = \pm 2,8$  мм, а відносна похибка для відрізка дороги 100 м складе  $\varepsilon_4 = \pm 0,0028$  %;

д) похибка, зумовлена наявністю тілесного кута видимості оптичної системи фотоствору, похибка щодо можливого недотримання перпендикулярності між оптичною віссю фотоствору та площиною поверхні світловідбивного елемента, а також похибка через затримку спрацьовування фотоствору. Ці похибки не враховуються через те, що зазначені кути та затримка спрацьовування фотоствору однаково впливають на початок і кінець підрахунку загальної кількості імпульсів вихідного сигналу датчика, тобто, не впливають на умовну довжину відрізка дороги між встановленими світловідбивними елементами.

Результати аналізу складових похибки визначення ціни імпульсу вихідного сигналу датчика наведені у табл. 3.

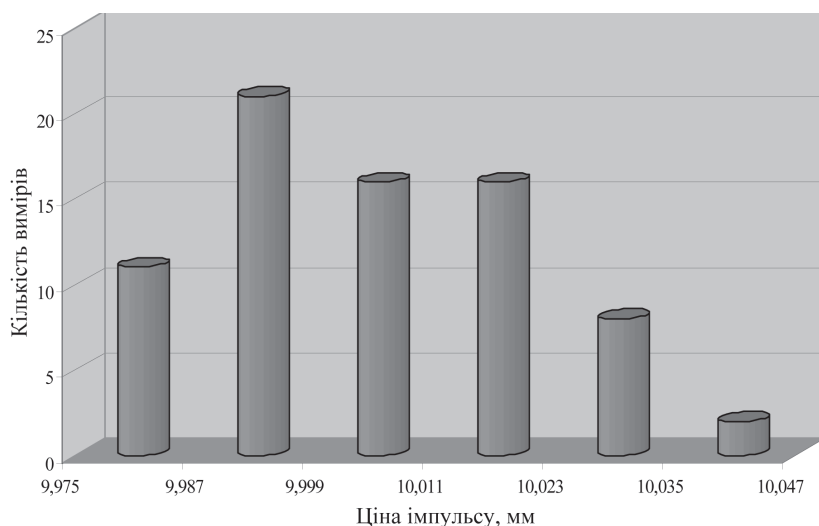


Рис. 2. Результати визначення ціни імпульсу датчика Microstar ( $\Delta_{\text{сер}} = 10,005$  мм,  $\sigma_{\text{имп}} = 0,0153$  мм,  $\varepsilon_{\text{имп}} = \pm 0,05$  %,  $u_{\text{Аимп}} = 0,0067$  мм)

Зважаючи на відсутність взаємозалежності між складовими похибки, загальна відносна похибка визначення ціни імпульсу вихідного сигналу датчика обчислюється за формулою:  $\varepsilon_{\text{имп}} = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + 2\varepsilon_3^2 + 2\varepsilon_4^2}$  [3] і з урахуванням значень, вказаних у табл. 1, дорівнює  $\pm 0,041$  % при відстані між встановленими світловідбивними елементами 100 м.

Калібрування (перевірка) каналу вимірювання швидкості КТЗ здійснюється за допомогою стандартного генератора прямокутних імпульсів та частотоміра, що використовується в якості зразкового ЗВТ. Замість сигналу датчика на вхід каналу вимірювання швидкості подається вихідний сигнал генератора, частота якого контролюється частотоміром і обчислюється за такою формулою:



Таблиця 4

Результати визначення ціни імпульсу вихідних сигналів датчиків

Параметр	Швидкість КТЗ, км/год							
	10		30		60		90	
	дат. 1	дат. 2	дат. 1	дат. 2	дат. 1	дат. 2	дат. 1	дат. 2
$\Delta_{\text{сеп}}$ , мм	10,024	9,997	9,998	9,998	9,994	10,002	10,001	10,003
$\sigma_{\text{імп}}$ , мм	0,0086	0,0027	0,0102	0,0022	0,0089	0,0019	0,0059	0,0021
$\varepsilon_{\text{імп}}$ , %	+0,24	-0,03	-0,02	-0,02	-0,06	+0,02	+0,01	+0,03
$u_{\text{Аімп}}$ , мм	0,0019	0,0006	0,0023	0,0005	0,0020	0,0004	0,0026	0,0007

*Позначення:*  $\Delta_{\text{сеп}}$  – середнє арифметичне значення ціни імпульсу вихідного сигналу датчика;  $\sigma_{\text{імп}}$  – середнє квадратичне відхилення ціни імпульсу;  $\varepsilon_{\text{імп}}$  – відносна похибка визначення ціни імпульсу;  $u_{\text{Аімп}}$  – стандартна невизначеність по типу А результатів вимірювання ціни імпульсу; дат. 1 – датчик Microstar; дат. 2 – датчик VBSS100

Таблиця 5

Результати калібрування вимірювального каналу швидкості БИК-1

$v_d$ , км/год	10	50	100	140	170	200
$f$ , Гц	277,8	1388,9	2777,8	3888,9	4722,2	5555,6
$v_k$ , км/год	10,00	50,00	100,02	140,05	170,05	200,04
$\varepsilon_{v1}$ , %	0,0	0,0	0,02	0,036	0,03	0,02

*Позначення:*  $v_d$  – швидкість КТЗ, що перевіряється;  $f$  – частота вихідного сигналу генератора;  $v_k$  – швидкість КТЗ за показаннями БИК-1;  $\varepsilon_{v1}$  – відносна похибка вимірювального каналу швидкості БИК-1

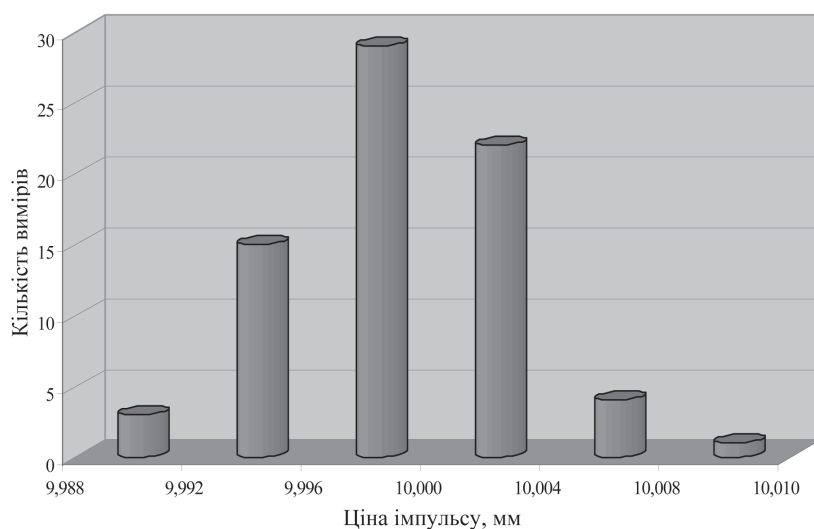


Рис. 3. Результати визначення ціни імпульсу датчика VBSS100 ( $\Delta_{\text{сеп}} = 9,999$  мм,  $\sigma_{\text{імп}} = 0,0037$  мм,  $\varepsilon_{\text{імп}} = \pm 0,01$  %,  $u_{\text{Аімп}} = 0,0016$  мм)

$f = 277,778 \cdot v / \Delta_0$ , де  $\Delta_0$  – ціна імпульсу датчика, мм.

Похибка калібрування (півірки) каналу вимірювання швидкості визначається точністю встановлення частоти вихідного сигналу генератора, тобто, відповідає похибці вимірювання частотоміра, яка, наприклад, для частотоміра моделі ЧЗ-38 становить  $\varepsilon_{v1} = \pm 0,075 \cdot 10^{-3}$  %. У порівнянні з похибкою визначення ціни імпульсу датчика  $\varepsilon_{\text{імп}}$  є дуже малою величиною і може не враховуватись. Необхідно зазначити, що відносна похибка сучасних частотомірів, як мінімум, ще на порядок менша.

З урахуванням наведеного можна вважати, що загальна





похибка описаного методу калібрування (повірки) визначається похибкою ціни імпульсу датчика і за проведеними вище розрахунками становить  $\varepsilon_{\text{кал}} = \pm 0,041\%$ .

Для перевірки проведених розрахунків щодо точності запропонованого методу було здійснено калібрування системи вимірювання швидкості КТЗ бортового вимірювального комплексу БИК-1, у якому можуть використовуватись датчики Microstar та VBSS100 (табл. 1).

У табл. 4 представлені результати визначення ціни імпульсу зазначених датчиків, а на рис. 2 та 3 узагальнено (для чотирьох значень швидкості) гістограми розподілення отриманих значень ціни імпульсу вказаних датчиків. Програмно встановлена ціна імпульсу зазначених датчиків становить 10 мм. Обсяг проведених вимірів відповідав описаному вище для визначення похибки щодо можливого недотримання прямолінійного руху КТЗ на відріжку дороги між встановленими світловідбивними елементами. У табл. 4 також наведені значення стандартної невизначеності по типу А результатів вимірювання ціни імпульсу датчиків, необхідність обчислення якої при калібруванні встановлена в [2]. Згідно з отриманими результатами максимальна відносна похибка визначення ціни імпульсу датчика становить:  $\varepsilon_{\text{имп}} = \pm 0,24\%$  (датчик Microstar) та  $\varepsilon_{\text{имп}} = \pm 0,06\%$  (датчик VBSS100).

У табл. 5 наведені результати калібрування вимірювального каналу швидкості. За величину відносної похибки приймається найбільше з отриманих значень:  $\varepsilon_{v1} = \pm 0,036\%$ .

Зважаючи на наявність інформації тільки про похибку вимірювання, було розраховано стандартну невизначеність по типу В ( $u_{Bv1}$ ) результатів калібрування вимірювального каналу швидкості. У таких випадках, зазвичай, береться припущення щодо рівномірного закону розподілення можливих виміряних значень параметра (швидкості) з симетричними межами  $\pm \varepsilon_{v1}$  [4]. Величина  $u_{Bv1}$  обчислюється за формулою:  $u_{Bv1} = \varepsilon_{v1} \cdot v_i / 100 \cdot \sqrt{3}$ , де  $v_i$  – значення швидкості КТЗ, при якому отримане найбільше значення  $\varepsilon_{v1}$ . Обчислене значення  $u_{Bv1}$  становить 0,029 км/год або  $u_{Bv1} = 0,021\%$ .

Загальна відносна похибка вимірювання швидкості обчислюється за формулою:  $\varepsilon_v = \sqrt{\varepsilon_{\text{имп}}^2 + \varepsilon_{v1}^2}$  і для бортового вимірювального комплексу БИК-1 становить  $\pm 0,24\%$  (датчик Microstar) та  $\pm 0,07\%$  (датчик VBSS100), що не суперечить даним, наведеним у табл. 1.

Зважаючи на відсутність взаємного впливу (кореляції) між отриманими результатами калібрування комплексу БИК-1 щодо визначення ціни імпульсу та показаннями вимірювального каналу швидкості, сумарна стандартна невизначеність обчислюється за формулою:  $u_c = \sqrt{u_{\text{имп}}^2 + u_{v1}^2}$  [4] і становить для обох датчиків  $\pm 0,03\%$ .

Отримані результати калібрування системи вимірювання швидкості КТЗ комплексу БИК-1 підтвердили проведені розрахунки щодо високої точності запропонованого методу калібрування (повірки).

### Висновки

1. Запропонований метод забезпечує високу точність при калібруванні (повірці) систем вимірювання швидкості, що входять до складу ЗВТ, призначених для випробувань КТЗ.
2. Метод не потребує використання спеціальних стендів або симуляторів і може бути реалізований у більшості органів, що проводять роботи з повірки та калібрування ЗВТ.
3. Результати калібрування системи вимірювання швидкості бортового вимірювального комплексу БИК-1, отримані за допомогою запропонованого методу, відповідають даним, наведеним у документації виробників датчиків, що використовуються у складі зазначеного комплексу, та підтверджують доцільність його використання в умовах експлуатації.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Закон України “Про метрологію та метрологічну діяльність” від 11.02.1998 № 113/98-ВР зі змінами.
2. ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (ISO/IEC 17025:2005, IDT).
3. Тюрин Н.И. Введение в метрологию. – М.: Издательство стандартов, 1973. – 279 с.
4. ДСТУ-Н РМГ 43:2006 Метрологія. Застосування “Руководства по выражению неопределенности” (РМГ 43-2001, IDT).