

СЕКЦІЯ 9 МЕТРОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИМІРЮВАННЯ МАСИ

УДК 531.751.3

НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕТАЛОН ОДИНИЦІ МАСИ В ДІАПАЗОНІ ВІД 2 КГ ДО 20 КГ

Ціпоренко С. В.

Державне підприємство "Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів"

(ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ»), Київ, Україна

E-mail: s_tsiporenko@ukrcsm.kiev.ua

Зважаючи на потреби вітчизняної науки, медицини, промисловості, інших галузей економіки та сфер діяльності у достовірних і простежуваних результатах вимірювань у діапазоні понад 1 кг у 2019 році було створено еталон одиниці маси в діапазоні від 2 кг до 20 кг. У 2020 році еталону надано статус національного та присвоєно номер НДЕТУ М-06-2019.

Еталон складається з комплексу засобів вимірювальної техніки та допоміжних технічних засобів. Основу еталона складають дві еталонні гири у формі циліндра, виготовлені зі спеціальної полірованої немагнітної нержавіючої сталі. Номінальна маса кожної гири становить 1 кг. Для передавання розміру одиниці маси від еталонних гир використовують компаратори маси СС1000S-L, АХ10005 та ХР26003L.

Еталон розміщено у спеціально обладнаному, термостатному, ізольованому приміщенні. В приміщенні розташовані столи на спеціальних віброізольованих фундаментах, не пов'язаних з підлогою та стінами приміщення. Автономна система підтримання умов навколишнього середовища, забезпечує цілодобове підтримування у ваговій кімнаті температури $20 \pm 0,3$ °С та відносної вологості 50 ± 5 %.

Національний еталон забезпечує передавання одиниці маси в діапазоні від 2 кг до 20 кг. Розширена невизначеність передавання одиниці маси $U(k = 2, P = 0,95)$ становить:

- гирям номінальною масою 2 кг – не більше $0,2 \cdot 10^{-6}$ кг;
- гирям номінальною масою 5 кг – не більше $0,5 \cdot 10^{-6}$ кг;
- гирям номінальною масою 10 кг – не більше $1,0 \cdot 10^{-6}$ кг;
- гирям номінальною масою 20 кг – не більше $3,3 \cdot 10^{-6}$ кг.

Для передавання розміру одиниці використовують метод калібрування «вгору». Для цього складають відповідну схему зважування, яка математично описується перевизначеною системою рівнянь. Відповідно до такої схеми зважування виконують порівняння маси певних комбінацій гир за методом диференційного зважування. Отримані за кожним рівнянням результати

вимірювання сумісно обробляють за методом найменших квадратів, що дозволяє розрахувати не лише дійсні значення маси кожної гирі, задіяної у схемі зважування, але й оцінити стандартні невизначеності цих значень та коваріації між ними.

У таблиці 1 показані результати вимірювань та обчислень маси гир в тому числі гир, які приймали участь у вимірюваннях як у 2019 році (дослідження проводились у діапазоні до 20 кг), так і у 2023 році (дослідження проводились у діапазоні до 10 кг).

Таблиця 1

Номинальна маса гирі, кг	Максимально допустима розширена невизначеність для гир класу E ₁ , кг	Результати досліджень 2019 р.		Результати досліджень 2023 р.	
		Умовне значення маси, кг	Розширена невизначеність, кг	Умовне значення маси, кг	Розширена невизначеність, кг
2	$0,33 \cdot 10^{-6}$	2,000001353	$0,115 \cdot 10^{-6}$	2,000001409	$0,118 \cdot 10^{-6}$
2	$0,33 \cdot 10^{-6}$	2,000000827	$0,115 \cdot 10^{-6}$	2,000000831	$0,115 \cdot 10^{-6}$
5	$0,83 \cdot 10^{-6}$	4,999998279	$0,276 \cdot 10^{-6}$	4,999998272	$0,286 \cdot 10^{-6}$
10	$1,66 \cdot 10^{-6}$	10,00000160	$0,551 \cdot 10^{-6}$	10,00000193	$0,556 \cdot 10^{-6}$
10	$1,66 \cdot 10^{-6}$	10,00000248	$0,551 \cdot 10^{-6}$	10,00000279	$0,556 \cdot 10^{-6}$
20	$3,33 \cdot 10^{-6}$	20,00000123	$2,331 \cdot 10^{-6}$	-	-

Як видно з таблиці, розширені невизначеності результатів вимірювань, проведених у 2019 р. та 2023 р., є меншими за максимально допустимі для гир класу E₁ та не перевищують відповідних значень, приписаних еталону. При цьому, різниці між умовними значеннями маси одних і тих самих гир, обчислені за результатами вимірювань у різні роки, не перевищують відповідних значень розширеної невизначеності, приписаних еталону. Це свідчить не тільки про високу стабільність еталона та повторюваність результатів вимірювань, але й підтверджує приписані еталону метрологічні характеристики.

Ключові слова: маса, гиря, національний еталон, метод найменших квадратів, невизначеність.

УДК 004.716

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ZigBee У ПОБУДОВІ Mesh-МЕРЕЖ ПРИЛАДІВ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ

Мітронов В. О.
АТЗТ «УКРВЕЕСКОМ», Київ, Україна
E-mail: vl.aquarius@gmail.com

Моніторинг великих промислових об'єктів завжди викликав складнощі в розміщенні та передачі інформації з приладів вимірювання параметрів контрольованого об'єкту. Не завжди просто вирішуються питання енергопостачання, прокладання та захисту від умов промислового об'єкту ліній зв'язку. Тому затребуваним рішенням стає побудова бездротової мережі приладів з автономним чи змішаним живленням. Існує багато технологій бездротових мереж, але не всі вони стабільно працюють в складних умовах електричних заводів, що генерує технологічне обладнання, металевого пилу в повітрі, крапель розплавленого металу тощо. Досвід використання різних типів трансиверів довів завадостійкість систем, заснованих на трансиверах LoRa, але в умовах моніторингу промислових об'єктів великих розмірів та складної конфігурації (наприклад доменна піч) та наявності великої кількості металевих конструкцій, що екранують сигнал, топології мереж типу зірка занадто складно використовувати. Найвдалішим рішенням здається використання Mesh-мереж.

Mesh-мережа – це багатокрокова мережа, пристрої якої можуть виконувати функції маршрутизаторів і здатні пересилати пакети даних до координатора мережі різними шляхами по ланцюжку вузлів мережі. Пристрої Mesh-мережі можуть пересилати пакети даних більш ніж через один сусідній пристрій. Особливістю такої побудови мережі є зона суцільного покриття великої площі без мертвих зон, масштабованість та стійкість до втрати окремих пристроїв, самоорганізація. В такій мережі можна суттєво знизити потужності трансиверів пристроїв, що сприятливо позначиться на споживанні електроживлення. Фізичні параметри передавача для побудови мережі передачі невеликих обсягів даних визначаються стандартом IEEE 802.15.4 а визначає, які властивості повинні мати пристрої, з яких будується мережа специфікація стека ZigBee (ZigBee Specification). Технологія ZigBee розробляється групою незалежних організацій із 2001 року. ZigBee Альянс є некомерційною структурою, до якої входять понад 160 організацій. Це виробники електронних компонентів, розробники програмного забезпечення, OEM-виробники. Лідерами Альянсу є такі потужні компанії, як Ember, Freescale, Honeywell, Invensys, Mitsubishi, Motorola, Philips, Samsung. Альянс розробляє специфікації протоколу ZigBee для створення надійних і недорогих систем бездротової передачі даних. Для побудови мережі ZigBee у неліцензованому діапазоні 2,4 ГГц передбачено 16 каналів завширшки до 5 МГц. Стандарт передбачає напівдуплексний режим роботи. Мережа ZigBee дозволяє передавати дані з граничною швидкістю

передачі по радіоканалу – 250 кБ/с. Для запобігання доступу до інформації, що передається в мережі, можливо використовувати 128-бітове шифрування даних за протоколом AES. Мережа ZigBee розроблена з урахуванням завадостійкості. Для боротьби з завадами використовуються такі механізми: розширення спектру сигналу, що передається, процедура запобігання колізій, вимірювання параметрів каналу передачі, контроль цілісності даних, підтвердження прийому і повторні відсилання пакетів. Для розширення спектру вихідний двійковий сигнал перетворюється на псевдовипадкову послідовність, в результаті чого в ефір передається шумоподібний сигнал. Метод розширення спектра сигналу, що передається (DSSS) дозволяє ефективно боротися з вузькосмуговими завадами. Такі мережі чудово підходять для вирішення завдань як моніторингу об'єктів, так і міжмашинної взаємодії (*Machine-to-Machine, M2M*) та ПоТ (*Industrial Internet of things, IoT*, інтернету речей).

В доповіді проаналізовані порівняльні характеристики застосування LoRaWAN та ZigBee мереж в проекті «CLOUD.UKRVES.COM» для роботи з бездротовими датчиками та використанням хмарних технологій.

Ключові слова: моніторинг промислових об'єктів, ZigBee, ПоТ, передача і зберігання даних, енергоефективність, безпека.

УДК 53.089.62

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЕЦИЗІЙНОСТІ ЛАБОРАТОРНОГО ОБЛАДНАННЯ НАВЧАЛЬНИХ ПРАКТИКУМІВ

Самборська В. В.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: o.uze@kpi.ua

Аналіз завдань учбових лабораторних практикумів показує, що більшість з них пов'язані з калібруванням засобів вимірювальної техніки за допомогою зразкових установок.

Модернізація обладнання учбових лабораторій, яка пройшла за декілька останніх років на кафедрі «Автоматизації та систем неруйнівного контролю» полягала в більшості випадків в заміні об'єктів досліджень на сучасні вимірювальні перетворювачі та прилади, які мають похибки в 5-10 разів менші за засоби, які використовувалися попередньо. Це створило ситуацію за якої досліджуване обладнання за показниками точності має паритет або перевищує рівень показників зразкового обладнання, які застосовуються при виконанні лабораторних робіт. Як наслідок, це вимагає корекції мети лабораторних робіт та зміну статистичних методів обробки результатів експериментів. При цьому, як первинне, постало питання про оцінку співвідношення реального рівня метрологічних характеристик обладнання лабораторних практикумів.

Оскільки невизначеність результатів вимірювання обумовлюється прецизійністю засобу вимірювання та точністю, яку засіб отримує в процесі калібрування, то за мету дослідження поставлена оцінка границь похибок, які визначаються тільки методичними та інструментальними похибками лабораторного обладнання безвідносно до похибок їх калібрування. Тобто проводилася оцінка прецизійності вимірювальних засобів. Усі нормативно-технічні передумови дослідження відповідали чинній в Україні групі стандартів ДСТУ ГОСТ ІСО 5725:2005 Точність (правильність і прецизійність) методів та результатів вимірювання.

Розроблена методика проведення експериментів включала одночасне багаторазове калібрування групи однотипних досліджувальних перетворювачів на існуючому зразковому обладнанні, похибки яких були одного порядку, з подальшою статистичною обробкою отриманих результатів методами регресійного (конфлюєнтного) та кореляційного аналізів. Для генерації сигналів використовували зразкові установки, а за контрольовані змінні приймали почергово сигнали від всіх засобів вимірювання, які були задіяні в дослідженнях. Подальша побудова парних регресій отриманих даних визначала сумарні показники випадкових похибок об'єднань -1) зразкової установки та одного з перетворювачів; 2) двох перетворювачів між собою (сигнали одного з перетворювачів приймалися за контрольовану змінну). Після аналізу рівня кореляційних залежностей випадкових похибок окремо по кожному перетворювачу, які отримані при декількох циклах калібрування, приймалося рішення щодо співвідношення прецизійності зразкових установок та досліджуваних засобів вимірювання лабораторних практикумів.

В якості прикладу застосування розробленої методики визначення прецизійності обладнання наведені результати дослідження співвідношення точнісних характеристик зразкової установки в вигляді балки чистого згину та шести фольгових тензорезисторів виробництва корпорації ZEMIC USA однієї з лабораторних робіт практикуму “ТЕНЗОМЕТРІЯ”.

За інформативні сигнали приймалися:

- для балки чистого згину – її прогин, який вимірювався індикатором часового типу ІЧ 10-0.01 з ціною поділки 0.01 мм;
- для тензорезисторів – цифровий сигнал тензоперетворювача ТП002 (виробництво АТЗТ УКРВЕСКОМ) з границею приведених похибок 0,01 % та діапазоном перетворення $\pm \Delta U/U=3,2$ мВ/В.

Кількість калібрувань (навантажень) прийнято 5, кількість точок при кожному навантаженні 4, загальна кількість точок експерименту для кожного тензорезистора – 20. Для зручності аналізу похибок усі результати представлені в одиницях поділок індикатора часового типу $\Delta y = 0,01$ мм. Математична модель характеристики калібрування тензорезисторів вибрана лінійною $y=a_0+a_1 \cdot x$ та зворотною до її статичної характеристики, де y – прогин в мм, x – цифрові сигнали ТП002.

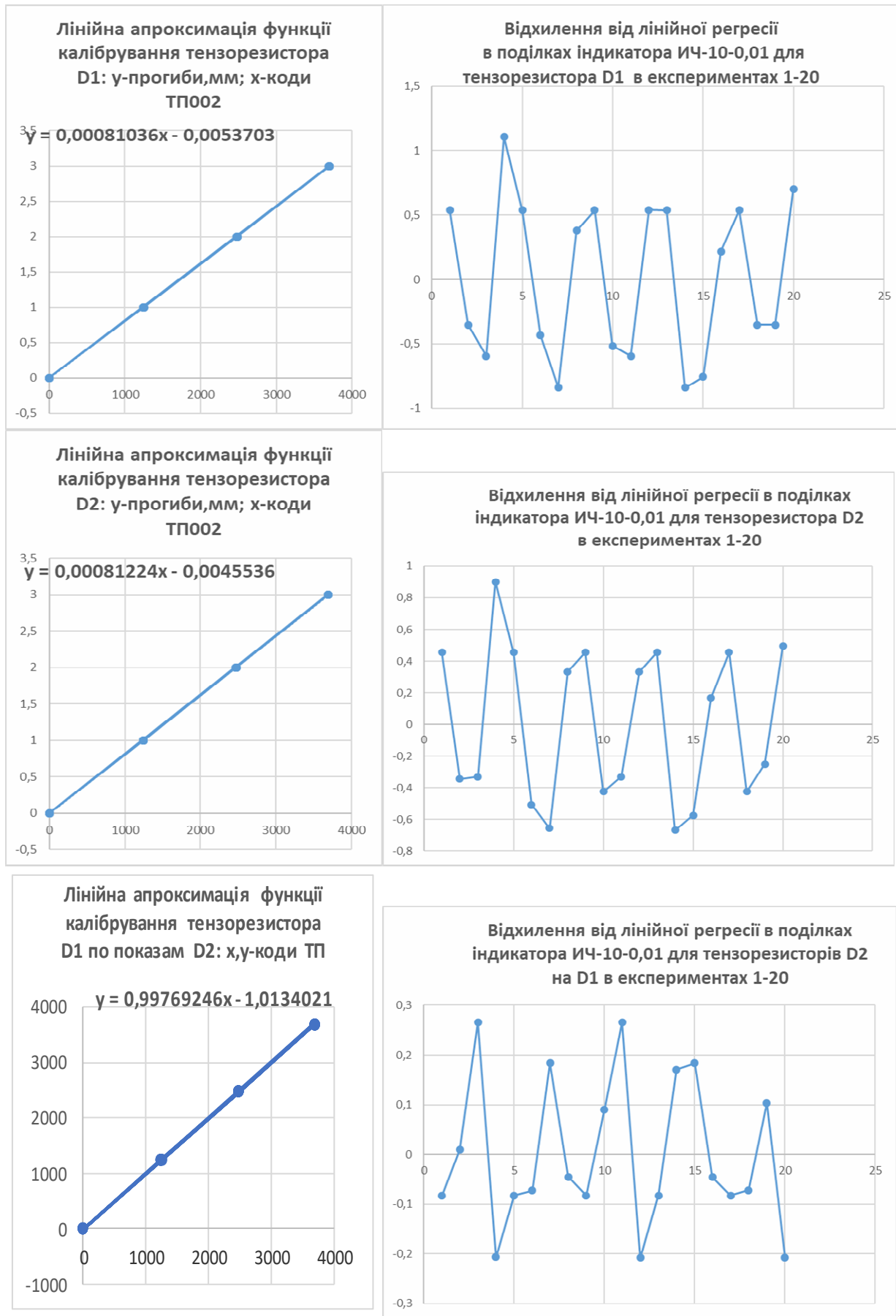


Рис.1. Результати експериментальних досліджень

Результати досліджень представлені на рис. 1. Зменшення діапазону похибок калібрування від $(1,1+0,84)=1,94$ поділок для тензорезистора D1 та $(0,9+0,66)=1,56$ поділок для тензорезистора D2 при використанні зразкової установки до $(0,26+0,21)=0,47$ поділок при використанні як зразкового засобу одного з тензорезисторів, показує що основні похибки процесу калібрування в цьому випадку визначаються похибками зразкової установки-балки чистого згину, які перевищують похибки досліджуваних тензорезисторів більше ніж втричі.

Методика була використана для визначення співвідношень параметрів прецизійності засобів вимірювання температури, надлишкового тиску, кутів повороту, об'ємної витрати повітря, маси, прискорення та відносної деформації. Стандартні вимоги до співвідношення параметрів точності зразкових установок до точності сучасних досліджуваних в лабораторних практикумах засобів вимірювання 1:3 підтвердили оптичні ділильні головки ОДГ-5 та набори зразкових гирь класу точності М1. ОДГ-5 використовуються як задавачі кутів з границями допустимих похибок ± 5 кутових секунд, гирі як міри маси при калібруванні вагових перетворювачів та мають границі абсолютних похибок ± 50 мг на 1 кг, що становить $\delta=0,005$ %.

Ключові слова: обладнання лабораторне, зразкова установка, прецизійність, калібрування, контрольовані змінні.

УДК 629.7.018

ВИКОРИСТАННЯ КОМПЛЕКСУ ОБЛАДНАННЯ КОМПАНІЇ NOTTINGER BRÜEL & KJÆR ДЛЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ

*Курочкін О. В., Зайцев В. М.
ПП «АНВІТ», Київ, Україна
E-mail: info@anwit.kiev.ua*

Випробування в аеродинамічних трубах – це один з важливих етапів у проектуванні та виробництві багатьох складних технічних конструкцій. До аеродинамічних натурних випробувань звертаються в випадках, коли надійні (точні) математичні моделі розрахунків силових впливів при експлуатації конструкцій відсутні або невідомі суттєві параметри існуючих моделей. Це відноситься до різноманітних будівельних конструкцій, транспортних засобів, а для аерокосмічних систем це обов'язковий етап розробок. Суть полягає у вимірюванні аеродинамічних сил та моментів, що впливають на модель літака або космічного корабля в контрольованому середовищі. Повна ідентифікація силових впливів зводиться до визначення проєкцій головного вектору сил та головного моменту сил на три осі координат $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$. В більшості випадків системи координат обираються ортогональні, які пов'язані з конструктивними особливостями досліджуваних об'єктів. Як правило це зводиться до створення вимірювальних систем з одноосьовими

перетворювачами сил та моментів, орієнтація вимірювальних осей яких відома в вибраній системі координат з наступним перерахунком складових силових векторів на осі вибраної системи координат. Часто визначення проєкцій головних векторів сил недостатньо, тоді кількість точок, в яких аналізують силові впливи на конструкцію, збільшують і вимірювальна система суттєво ускладнюється за рахунок збільшення кількості перетворювачів, електронних каналів перетворення сигналів та системи комп’ютерної обробки інформації.

Для забезпечення високої точності вимірювань, підвищення надійності датчикової апаратури, зменшення кількості електронних каналів перетворення сигналів, автоматизації обчислення в комп’ютерно-інтегрованих вимірювальних системах був створений багатокомпонентний датчик силових та моментних впливів MCS10, який використовує інтегрований пружний елемент з тензорезисторними перетворювачами шести параметрів: F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z [1].

Застосування багатоосьових датчиків є найбільш ефективним рішенням для створення повноцінних багатокоординатних вимірювальних систем з мінімальною кількістю вимірювальних каналів. Такі системи застосовуються для випробувань як повнорозмірних рухомих об’єктів, на які діють сили до 200 кН, так і об’єктів міні- та мікророзмірів із силовими впливами в діапазоні від 0 до 5 кН. Клас точності 0,1-0,2 %.

Оскільки силові впливи є векторними величинами, то калібрування вимірювальної системи повинно включати не тільки калібрування самого багатоосьового перетворювача, а й визначення напрямлених властивостей перетворювача в стендовому обладнанні. Якщо перша частина калібрування виконується на зразковому обладнанні корпорації-виробника HOTTINGER BRÜEL & KJÆR (НБК), то визначення орієнтації вимірювальних осей можливе після встановлення датчиків в експериментальне обладнання. Калібрування на підприємстві-виробнику включає визначення коефіцієнтів S_{ij} залежностей вихідних сигналів всіх $j=6$ каналів вимірювання від $i=6$ силових факторів: F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z . З визначених коефіцієнтів S_{ij} формується матриця впливів, а після визначення оберненої до неї матриці отримуємо коефіцієнти матриці чутливостей K_{ij} . При використанні всіх елементів матриці K_{ij} компенсують перехресні впливи силового параметра “ j ” на канал вимірювання силового параметра “ i ”. Наприклад, матриця чутливостей при $i=j=3$ залежностей розмірів проєкцій сили на три осі координат F_x , F_y , F_z від значень сигналів по відповідним каналам U_x , U_y , U_z використовується для розв’язання задачі вимірювання згідно матричному рівнянню

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Процес обчислення перехресних впливів в режимі реального часу згідно (1) може бути автоматизований з використанням стандартних алгоритмів, які є складовою частиною програмного забезпечення багатоканальних вимірювальних перетворювачів QuantumX MX або SomatXR MX (виробник НВК) [2]. Оброблені сигнали можуть бути виведені безпосередньо як стандартизовані аналогові електричні сигнали і доступні для системи автоматизації.

Подальша обробка, візуалізація та зберігання результатів експериментальних досліджень виконується за допомогою спеціального програмного забезпечення CATMAN AP, яке виконує аналіз отриманих даних на персональних комп'ютерах під керуванням операційної системи Windows [3].

Використання обладнання НВК під час випробувань в аеродинамічній трубі дає такі головні переваги експериментаторам: висока точність вимірювання; висока надійність датчикової та електронної перетворюючої апаратури; легка інтеграція в існуючі системи аеродинамічних труб; збір і аналіз даних у реальному часі; широкий вибір датчиків механічних величин; підтримка більшості галузевих стандартів та регламентів.

Ключові слова: багатокомпонентні перетворювачі, тензорезисторні датчики, аеродинамічна труба.

Література

- [1] Multiaxis Force Sensor MCS10: Measures 6 Forces and Moments Simultaneously. [Online]. Available: <https://www.hbm.com/en/5626/multi-axis-sensor-mcs10>
- [2] QuantumX: The Universal and Distributable Data Acquisition System. [Online]. Available: <https://www.hbm.com/en/2128/quantumx-compact-universal-data-acquisition-system>
- [3] catman Data Acquisition Software: Connect. Measure. Visualize. Analyze. [Online]. Available: <https://www.hbm.com/en/2290/catman-data-acquisition-software>

УДК 539.37: 669.162.213.2

СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ СИЛОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА КОЖУХ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ

Зайцев В. М.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: viniza@ukr.net

Зупинки роботи доменних печей більше за 60-80 діб пов'язані в більшості випадків з виконанням капітальних ремонтних робіт, або з довгостроковою консервацією об'єктів. В період вводу до експлуатації – задування печі після таких тривалих зупинок, металеві кожухи печей сприймають критичні силові навантаження. Зокрема, це викликано тепловими розширеннями залишків чавуну, які за цей час прийняли твердий стан. Керування роботою технологічного процесу на цих етапах для уникнення аварійних ситуацій

потребує безперервного моніторингу напруженого стану металевого кожуха печі. Незважаючи на високу аварійність - розрив броні печей при їх задуванні, в тому числі і в останні роки, і в тому числі в Україні, відсутні автоматичні системи моніторингу напружено-деформованого стану кожухів печей.

В доповіді порівняні принципи побудови таких моніторингових систем з точки зору їх інформативності. Розглянуті варіанти з вимірюванням:

1) зміни загальної довжини броні на фіксованих рівнях поду, горна і заплечиків печі;

2) визначенням абсолютних деформацій розширень на базових довжинах $l=200-500$ мм у визначених точках кожухів;

3) визначенням відносних деформацій у визначених точках кожухів.

При виборі принципу вимірювання одним з критеріїв була вартість обладнання, яка б забезпечила визначення необхідної кількості параметрів напруженого стану кожуха. Показано що при кількості точок більше 40, оптимальним рішення є моніторинг відносних деформацій фольговими тензорезисторами, які приклеюються безпосередньо на кожух печі.

Основними перевагами такої системи є:

- a) високі точності перерахунку полів відносних деформацій, які вимірюються тензорезисторами в поля механічних напружень деформацій;
- б) висока точність вимірювання відносних деформацій;
- в) незмінність інформативності при зміні напрямків головних напружень.

В доповіді представлені результати впровадження системи тензометрування на доменній печі ММК (м. Маріуполь) в процесі її задування в лютому 2022 року.

Представлені принципові проєктні рішення створених

- цифрових тензорезисторних перетворювачів деформації ААЛГ (виробництво АТЗТ УКРВЕСКОМ), створених з використанням тензорезисторів виробництва корпорації ZEMIC (КНР), та аналого-цифрових перетворювачів на базі дельта-сигма перетворювачів AD7195 корпорації Analog Devices;
- мережі з 38 цифрових перетворювачів ААЛГ;
- комп'ютерно-інтегрованої системи моніторингу та реєстрації інформації;
- системи візуалізації з використанням хмарної системи CLOUD.UKRVES.COM.

Система моніторингу реєструвала та архівувала інформацію з цифрових датчиків деформації з інтервалом 15 с. На рис. 1 наведено фото звіту, який розсилався з інтервалом 3 години на електронну корпоративну пошту спеціалістам, які приймали керівні рішення. В лівій половині – графічні представлення перерахованих показів датчиків в механічні напруження (зелений колір допустимі значення) на рівнях 4,300; 5,600; 6,650; 8,100 м доменної печі. В правій частині звіту – часові залежності механічних напружень найбільше навантаженої точки з кожного рівня.

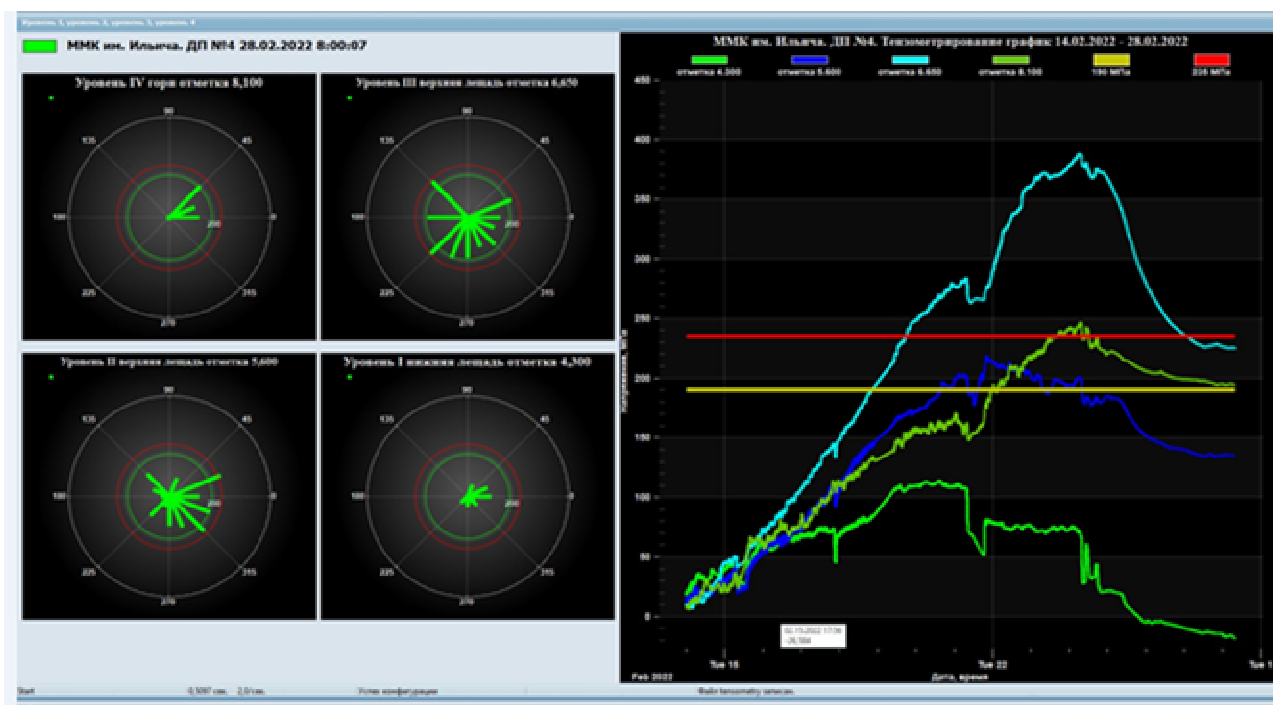


Рис.1. Звіт моніторингової системи

Ключові слова: доменна піч, система моніторингу, тензорезисторні датчики, датчики деформації.