

DOI 10.32820/2079-1747-2021-28-48-55  
УДК 006.91

## УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАДУЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК ВИТРАТОМІРНИХ ПРИСТРОЇВ

©Канюк Г.І.<sup>1</sup>, Мезеря А.Ю.<sup>1</sup>, Близниченко О.М.<sup>1</sup>, Бикова Т.І.<sup>1</sup>, Сук І.В.<sup>2</sup>

*Українська інженерно-педагогічна академія<sup>1</sup>  
Київський енергетичний фаховий коледж<sup>2</sup>*

### Інформація про авторів:

**Канюк Геннадій Іванович (Канюк Геннадий Иванович, Kanyuk Gennady):**ORCID: 0000-0003-1399-9039; genadiykanuk@gmail.com; доктор технічних наук, професор, Українська інженерно-педагогічна академія, професор кафедри [автоматизації, метрології та енергоефективних технологій](#), вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Мезеря Андрій Юрійович (Мезеря Андрей Юрьевич, Mezerya Andrey):**ORCID: 0000-0003-2946-9593; [mezzar@mail.ru](mailto:mezzar@mail.ru); кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри [автоматизації, метрології та енергоефективних технологій](#), вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Близниченко Олена Миколаївна (Близниченко Елена Николаевна, Olena Blyznychenko):**ORCID: 0000-0002-2774-5200; [art-studio.diana@ukr.net](mailto:art-studio.diana@ukr.net); Українська інженерно-педагогічна академія, ст. викладач кафедри [автоматизації, метрології та енергоефективних технологій](#), вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Бикова Тетяна Іллівна (Быкова Татьяна Ильинична, Tatyana Bykova):**ORCID: 0000-0002-8872-0939; [bykova.t.i@uipa.edu.ua](mailto:bykova.t.i@uipa.edu.ua); Українська інженерно-педагогічна академія, ст. викладач кафедри [автоматизації, метрології та енергоефективних технологій](#), вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Сук Ірина Валентинівна (Сук Ирина Валентиновна, Irina Suk):**; Київський енергетичний фаховий коледж, заступник директора з навчально-виховної роботи, вул. Івана Сергієнка, 7, м. Київ, 02105, Україна.

Наведено аналіз роботи системи градування витратомірних пристроїв масовим і об'ємним способом, які застосовуються для градування витратомірів рідинних середовищ у різних галузях промисловості, у тому числі при проведенні модельних випробувань гідравлічних машин в спеціалізованих гідротурбінних лабораторіях. Показана мета роботи, що полягає в аналізі характеристик відхиляючих пристроїв і визначенні шляхів зниження похибок, що виникають при цьому.

Визначено, що найбільшу питому вагу в загальній похибці визначення масової та об'ємної витрати рідини складає похибка відхиляючого пристрою, яка залежить від його динамічних характеристик. Удосконалена система визначення профілю потоку рідини, що заповнює вимірювальний бак. Запропоновано пристрій контролю положення потоку рідини та методику визначення часу заповнення вимірювального бака з урахуванням використання сучасних лазерних датчиків, встановлених на вимірювальному баку.

Показано, що застосування лазерних датчиків положення з променями, що перетинаються, дозволяє знизити похибку вимірювання часу заповнення вимірювального бака, викликану як малою чутливістю пристроїв контролю положення потоку, так і несиметричністю потоку, що входить на відхиляючий пристрій.

**Ключові слова:** точність, помилка виміру, градування витратомірів, лазерні пристрої.

**Kaniuk G., Mezerya A., Blyznychenko O., Bykova T., Suk I.** "Improvement of metrological characteristics of calibrating units of flow measuring devices".

The paper presents an analysis of the operation of mass and volumetric calibration devices used for calibrating flow meters of liquid media in various industries, including model testing of hydraulic machines in specialized hydraulic turbine laboratories. The aim of the work is shown, which is to analyze the characteristics of deflecting devices and to determine the ways of decreasing the errors arising therefrom.

It was determined that the largest specific weight in the total error of determining the mass and volumetric fluid flow rate is the error of the deflecting device, which depends on its dynamic characteristics. The system for determining the profile of the liquid flow that fills the measuring tank was improved. A device to control the position of the liquid flow and a method of determining the time of filling the measuring tank, taking into account the use of modern laser sensors installed on the measuring tank, is proposed.

It is shown that the use of laser position sensors with intersecting beams makes it possible to reduce the measurement error of the measuring tank filling time caused by both low sensitivity of flow position control devices and asymmetry of the flow entering the deflecting device.

**Keywords:** accuracy, measurement error, calibration of flow meters, laser devices.

### **Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими і практичними завданнями**

Випробування моделей гідромашин, що проводяться на спеціальних гідравлічних стендах, характеризуються досить високою точністю вимірювання параметрів моделі, основним з яких є витрата рідини. Відносна похибка вимірювання витрати рідини не повинна перевищувати  $\pm 0,3\%$  [1, 2], що ставить завдання зниження як систематичних, так і випадкових складових похибки вимірювань [1, 2].

До найбільш ефективних засобів зниження систематичної складової похибки вимірювань витрати рідини відноситься градування витратомірних пристроїв [3, 4, 5].

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

На сьогоднішній день градування високоточних витратомірів рідинних середовищ здійснюється, як правило, за допомогою вагових або об'ємних витратомірних установок, в яких витрата  $Q$  [м<sup>3</sup>/с] визначається шляхом вимірювання маси  $m$  [кг] рідини або об'єму  $V$  [м<sup>3</sup>] рідини, що надійшла в ємність, що зважується, з вимірвальної ділянки установки, на якій розміщений градуований витратомір, за відомий час  $t$  [с] [6, 7], тобто:

$$Q_m = \frac{m}{t \cdot \rho} = \frac{m_1 - m_0}{t \cdot \rho} \cdot \frac{1 - (\rho_a / \rho_p)}{1 - (\rho_a / \rho)} \quad (1)$$

$$Q_V = \frac{V}{t} = \frac{V_1 - V_0}{t} \cdot \frac{1 - (\rho_a / \rho_p)}{1 - (\rho_a / \rho)}, \quad (2)$$

де  $m = m_1 - m_0$  – маса рідини, кг;  $m_0$  – маса бака з рідиною, що залишилася, кг;  $m_1$  – маса бака з рідиною, кг;  $\rho_a$  – щільність повітря за нормальних умов (температура  $T=20$  °С, тиск  $p=105$  кПа), кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_p$  – щільність стандартних об'єктів, що зважуються, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho$  – щільність рідини, кг/м<sup>3</sup>;  $V = V_1 - V_0$  – обсяг рідини, м<sup>3</sup>;  $V_0$  – обсяг рідини, що залишилася в баку, м<sup>3</sup>;  $V_1$  – обсяг рідини, що заповнила бак, м<sup>3</sup>.

Ці методи широко застосовуються для індивідуального градування вбудованих у гідравлічні стенди високоточних витратомірів, і дозволяють отримати найбільшу точність вимірювань [4-6].

Як показує аналіз рівнянь (1) і (2), загальна похибка вимірювання витрати рідини складається з похибок вимірювань маси  $\delta_m$ , часу заповнення вимірвального бака  $\delta_t$ ,

прискорення сили тяжкості  $\delta_g$ , щільності води  $\delta_p$  і похибки вимірювання щільності повітря  $\delta_{pa}$ . Джерелами систематичних похибок є похибки зважувального пристрою, похибки таймера, похибки роботи відхиляючого пристрою  $\delta_0$ , і похибки, обумовлені неточним виміром щільності води. Джерелами випадкових похибок є похибки зважувального та відхиляючого пристроїв.

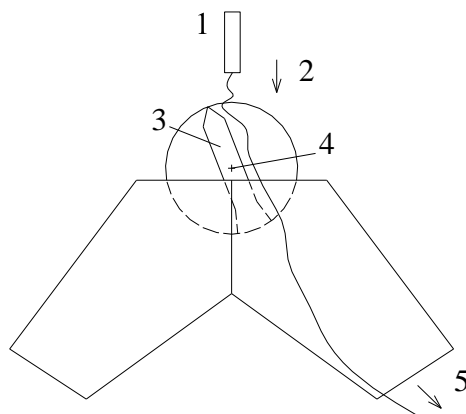
У реальних умовах величина похибки вимірювання маси  $\delta_m$  залежить від використовуваних способів вимірювання маси і становить близько 0,001%. Прискорення сили тяжіння визначається з похибкою  $\delta_g=0,002\%$ , час заповнення вимірювального бака визначається таймером з точністю  $\delta_t=0,001\%$ , щільності води та повітря визначаються з похибкою  $\delta_p=\delta_{pa}=0,03\%$  [2].

Найбільша питома вага в загальній похибці визначення масової та об'ємної витрати рідини становить похибка відхиляючого пристрою, яка залежить від його динамічних характеристик і повинна становити не більше 0,085% [2]. Аналогічні результати отримали й закордонні дослідники [8-14].

**Метою роботи** є аналіз роботи відхиляючого пристрою та визначення шляхів зниження виникаючих при цьому похибок.

### **Виклад основного матеріалу**

Відхиляючий пристрій, рекомендований ISO 4185-1980 для випробувань моделей гідравлічних машин (рис. 1), повинен забезпечувати максимальну швидкість з метою зниження можливості появи значних похибок при вимірюванні часу заповнення вимірювального бака. Це реалізується шляхом швидкого руху відхиляючого пристрою щодо струменя рідини, що формується насадкою. Включення та відключення таймера заповнення бака повинно здійснюватися безпосередньо в момент проходження відхиляючого пристрою гідравлічної центральної лінії.



**Рис. 1** – Відхиляючий пристрій

1 – насадка; 2 – вхідний потік; 3 – розподільна пластинка; 4 – вісь обертання; 5 – вихідний потік.

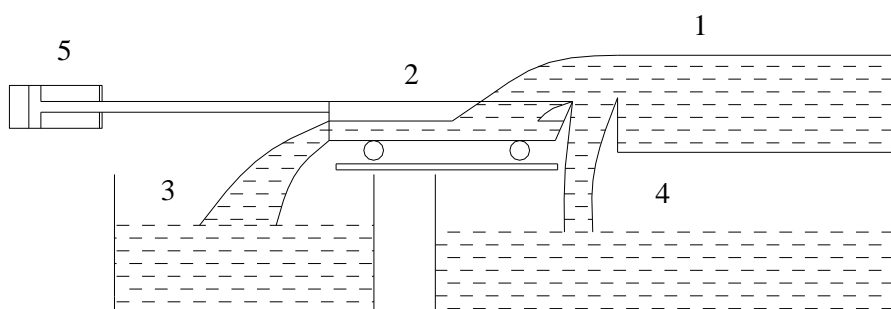
Для отримання високої точності градування датчиків витрати методом зважування необхідно виконання наступних умов [6, 7]:

- забезпечення необхідної точності зважувального пристрою, таймера та способів його пуску та зупинки;
- забезпечення малого впливу динамічних явищ при використанні динамометрів для визначення маси рідини;
- Проведення необхідної корекції результатів вимірювань маси на вплив сили атмосфери, що виштовхує;

- час повороту відхиляючого пристрою повинен бути невеликим порівняно з часом заповнення вимірвального бака;
- відхиляючий пристрій ніяким чином не повинен впливати на характеристики потоку протягом будь-якої фази вимірювань.

Великі величини витрати рідини ( $1 \text{ м}^3/\text{с}$  і більше), характерні для випробувань гідравлічних машин, і, пов'язані з цим труднощі технічної реалізації точного відхиляючого пристрою, вимагає створення принципово нової конструкції пристрою.

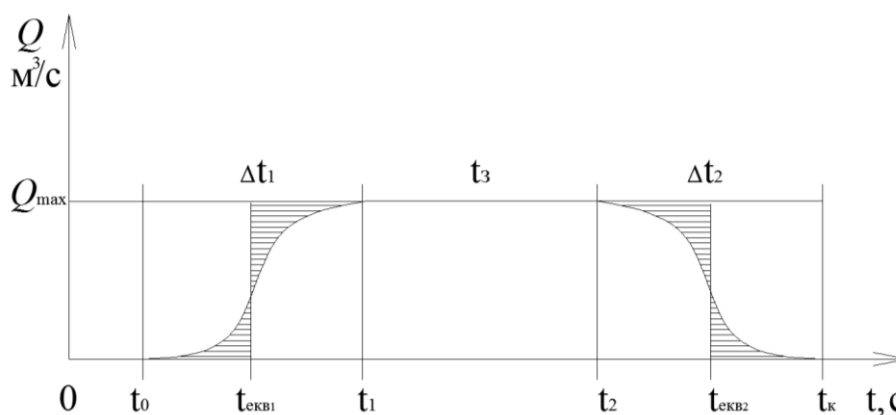
На відміну від відхиляючого пристрою, рекомендованого ISO 4185, відхиляючий пристрій, застосований в гідротурбінній лабораторії «Турбоатом» являє собою перекидний візок, що приводиться в рух гідравлічним поршнем (рис. 2).



**Рис. 2** – Схема установки для градування витратомірних пристроїв  
1 – нижній бак; 2 – перекидний візок; 3 – вимірвальний бак; 4 – водозлив; 5 – приводний гідравлічний поршень.

Для оцінки впливу роботи відхиляючого пристрою на точність відтворення витрати рідини, проведемо аналіз його роботи (рис. 3).

Процес заповнення вимірвального бака можна розбити на кілька характерних ділянок:  $0 - t_0$  – рух візка від моменту запуску до моменту зіткнення візка з потоком води;  $\Delta t_1 = t_1 - t_0$  – рух візка від моменту дотику до моменту повного «захоплення» потоку;  $t_3$  – час заповнення вимірвального бака;  $\Delta t_2 = t_k - t_2$  – рух візка від початку відкату до повного «отпуску» потоку.



**Рис. 3** – Графік роботи відхиляючого пристрою

Об'єм рідини, що заповнює вимірвальний бак за час роботи відхиляючого пристрою визначається інтегральним значенням:

$$V = V_1 + V_3 + V_2 = \int_{t_0}^{t_1} Q(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt + \int_{t_2}^{t_k} Q(t) dt \quad (3)$$

де  $V_1$  – обсяг рідини, що заповнює вимірювальний бак під час «захоплення» потоку перекидним візком, м<sup>3</sup>;  $V_3$  – обсяг рідини, що заповнює вимірювальний бак за час повного "захоплення" потоку, м<sup>3</sup>;  $V_2$  – об'єм рідини, що заповнює вимірювальний бак під час «відпустки» потоку, м<sup>3</sup>

При постійних швидкостях «захоплення» і «відпустки» потоку, вираз (3) можна переписати в наступному вигляді:

$$V = \frac{Q_{\max}}{2} \cdot \Delta t_1 + Q_{\max} \cdot t_3 + \frac{Q_{\max}}{2} \cdot \Delta t_2 \quad (4)$$

При рівності  $\Delta t_1 = \Delta t_2$  визначається еквівалентний час заповнення вимірювального бака:

$$t_{\text{екв}} = t_3 + \Delta t \quad (5)$$

Таким чином, точність роботи відхиляючого пристрою залежить від точності визначення часу «захоплення» і «відпустки» потоку  $\Delta t_1$  і  $\Delta t_2$  (фіксація моментів дотику) і часу заповнення вимірювального бака  $t_3$ .

Сигналом включення та відключення таймера, в даний час, служить сигнал фотоелектричних датчиків, що замикають електричний ланцюг при дотику візка з потоком рідини і стінкою нижнього бака. Основною вимогою, що пред'являються до чутливих елементів, є швидкодія і надійність спрацьовування. Світлові діючі не повною мірою відповідають вимогам, що висуваються.

Їх головним недоліком є можливість затримки спрацьовування, що призводить до появи похибок при визначенні часу заповнення вимірювального бака. Для забезпечення надійної роботи відхиляючого пристрою і точного визначення часу заповнення бака запропоновано використовувати як чутливі елементи лазерні датчики положення з променями, що перетинаються.

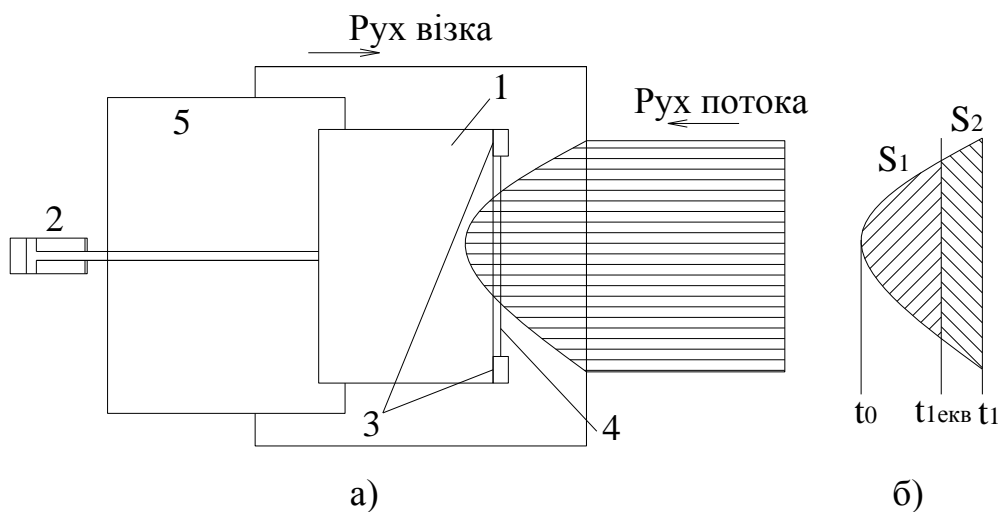
Лазерні датчики з променями, що перетинаються, дозволяють не тільки з високою точністю визначати зміщення, але також виконувати вимірювання товщини потоку рідини. Крім того, вони забезпечують високу швидкість спрацьовування та високу точність при вирішенні близько 0,2 мкм [15]

Функціональні можливості датчиків фірми ZX Omron, що є провідною фірмою в розробці лазерних датчиків, представлені в таблиці.

**Таблиця 1** - Функціональні можливості датчиків серії ZX фірми Omron

Підсилювач ZX-LDA	Головка датчика ZX-LD	Головка датчика ZX-LD V
- Два цифрові 5-розрядні дисплеї - Частота вимірювань - до 0,15 мс з налаштуванням - 3 цифрові виходи - 1 аналоговий вихід зі ступінчастим регулюванням від -5 В до +5 В або від 0 до 20 мА	- Діапазон вимірювання 40±10 мм, 100±40 мм, 300±200 мм - Точність виміру: до 0,002 мм - Фокусування у формі плями або смуги - Розмір вимірювальної головки: 33 мм x 39 мм x 17 мм	- Діапазон виміру 30 ± 2 мм - Точність вимірювання: до 0,25 μм - Ширина зони вимірювання: від 1 до 2,5 мм, 5 мм, 10 мм - Дистанція спрацьовування до 500 мм/2000 мм - Роздільна здатність: 4 μм - Розмір вимірювальної головки: 45 x 55 x 21 мм

Завдяки наявності променів, що перетинаються, лазерні датчики дозволяють визначати площу поперечного перерізу потоку (рис. 4), що дає можливість враховувати несиметричність потоку, що входить на відхиляючий пристрій.



**Рис. 4** – Відхиляючий пристрій з лазерними датчиками положення  
 а) робота перекидного візка з лазерними датчиками: 1 – перекидний візок; 2 – привід; 3 – лазерні датчики; 4 – промені, що перетинаються; 5 – вимірвальний бак. б) визначення еквівалентного часу заповнення вимірвального бака з урахуванням профілю потоку.

Площа поперечного перерізу потоку, що входить на візок, визначається виразом:

$$S = \sum_{t=t_0}^{t_1} h_t \frac{v}{f}, \quad (6)$$

де  $S$  – площа поперечного перерізу потоку  $m^2$ ;  $h$  – ширина потоку, виміряна лазерним датчиком,  $m$ ;  $v$  – швидкість руху візка,  $m/c$ ;  $f$  – Частота опитування лазерних датчиків,  $Гц$ . Очевидно, що еквівалентний час початку заповнення вимірвального бака  $t_{екв}$  буде знаходитися в момент, коли площі поперечного перетину потоку  $S_1$  і  $S_2$  рівні. Умову рівності  $S_1 = S_2$  при постійній швидкості руху візка і частоті опитування лазерних датчиків, можна представити у вигляді:

$$\sum_{t=t_0}^{t_{екв}} h_t = \sum_{t=t_{екв}}^{t_1} h_t \quad (7)$$

Як видно з формули (7), похибка визначення еквівалентного часу заповнення вимірвального бака, обумовлена несиметричністю потоку, залежить, в основному, від похибки вимірювання ширини потоку. Лазерні датчики дозволяють визначати ширину потоку з абсолютною похибкою в 0,002 мм, тоді відносна похибка вимірювання ширини потоку складе  $2 \cdot 10^{-6}\%$  при ширині потоку в 1 м.

Розрахунок еквівалентного часу заповнення вимірвального бака за запропонованою методикою доцільний у разі великих витрат рідини, що протікає в трубопроводі або відкритих вимірвальних каналах, малих швидкостях руху перекидного візка або несиметричних профілях потоку рідини. В інших випадках для визначення еквівалентного часу заповнення вимірвального бака досить скористатися формулою (5).

### **Висновок**

Похибка визначення еквівалентного часу заповнення вимірювального бака, обумовлена несиметричністю потоку, залежить, в основному, від похибки вимірювання ширини потоку. Лазерні датчики дозволяють визначати ширину потоку з абсолютною похибкою в 0,002 мм, тоді відносна похибка вимірювання ширини потоку становить  $2 \cdot 10^{-6} \%$  при ширині потоку в 1 м.

Застосування лазерних датчиків положення з перетинаються променями дозволяє знизити похибки вимірювання часу заповнення вимірювального бака, викликані як малою чутливістю пристроїв контролю положення потоку, так і несиметричністю потоку, що входить на відхиляючий пристрій.

Розрахунок еквівалентного часу заповнення вимірювального бака за запропонованою методикою доцільний у разі великих витрат рідини, що протікає в трубопроводі або відкритих вимірювальних каналах, малих швидкостях руху перекидного візка або несиметричних профілях потоку рідини.

### **Список використаних джерел**

1. МЭК 60193: Модельные приёмо-сдаточные испытания гидравлических турбин, насосов гидроаккумулирующих станций и насос-турбин. – Изд. 2-е. – 1999.
2. Артюх С. Ф. Погрешности измерения среднего расхода жидкости в модельных установках гидротурбин / С. Ф. Артюх, В. Б. Большаков, А. Ю. Мезеря // *Український метрологічний журнал*. – Вип. 4. – 2003. – С. 36–39.
3. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ. Кн. 2 : справочник / П. П. Кремлевский ; под общ. ред. Е. А. Шорникова. – 5-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Политехника, 2004. – 412 с.
4. Кремлевский П. П. Расходомеры и счётчики количества веществ. Справочник / П. П. Кремлевский. – Изд. 5-е, пер. и доп. – СПб. : Машиностроение, 2002. – 409 с.
5. Абрамов Г. С. Практическая расходомерия в промышленности / Г. С. Абрамов, А. В. Барычев, М. И. Зимин. – М. : ОАО ВНИИОЭНГ, 2000. – 472 с.
6. Большаков В. Б. Визначення конструктиву та метрологічних характеристик еталонів одиниць об'ємної та масової витрати рідини / В. Б. Большаков, Н. І. Косач // *Український метрологічний журнал*. – 2001. – Вип. 4. – С. 50–53.
7. ISO 4185:1980. Измерение потока жидкости в закрытых трубопроводах – метод взвешивания [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://standartgost.ru/g/ISO\\_4185:1980](https://standartgost.ru/g/ISO_4185:1980), дата звернення 02.12.21).
8. Wang T. Coriolis flowmeters: a review of developments over the past 20 years, and an assessment of the state of the art and likely future directions / T. Wang, R. Baker // *Flow Meas. Instrum.* –2014. – Vol. 40, № 1. – P. 99–123.
9. Henry M. P. Prism Signal Processing for Sensor Condition Monitoring / M. P. Henry, O. Bushuev, O. Ibrayeva // 26th International Symposium on Industrial Electronics ISIE. – 2017. – Vol. 10, № 2. – P. 224–276.
10. Ibrayeva O. Matrix Pencil Method for Coriolis Mass Flow Meter Signal Processing in Two-Phase Flow Conditions / O. Ibrayeva, D. Salov // *International conference on Industrial Engineering (ICIE)*. – 2017. – P. 4.
11. Sarrazin F. Comparison between Matrix Pencil and Prony methods applied on noisy antenna responses / F. Sarrazin, A. Sharaiha, P. Pouliguen // *Loughborough Antenna and Propagation Conference Loughborough Antennas & Propagation Conference*. – 2011. – P. 1–44.
12. Li M. Complex Bandpass Filtering for Coriolis Mass Flow Meter Signal Processing / M. Li, M. P. Henry // 42nd IEEE Industrial Electronics Conference. – 2016. – Vol. 1, N 1 – P. 133–137.
13. Kretschmar M. Capacitive and Inductive Displacement Sensors / M. Kretschmar, S. Welsby // *Sensor Technology Handbook* / ed. J. Wilson. – Burlington : Newnes, 2005. – P. 193–222.
14. Pohanka M. Rapid Characterization of Monoclonal Antibodies using the Piezoelectric Immunosensor / M. Pohanka, O. Pavlis, P. Skladal // *Sensors*. – 2007. – N 7. – P. 341–353.

### **References**

1. *MJeK 60193: Modelnye priyomo-sdatochnye ispytaniya gidravlicheskih turbin, nasosov gidroakkumulirujushhih stancij i nasos-turbin* 1999, 2nd edn.
2. Artjuh, SF, Bolshakov, VB & Mezerja, AJu 2003, 'Pogreshnosti izmerenija srednego rashoda zhidkosti v modelnyh ustanovkah gidroturbin', *Ukrainskij metrologichnij zhurnal*, iss. 4, pp. 36-39.
3. Kremlevskij, PP 2004, *Rashodomery i schetchiki kolichestva veshhestv: spravochnik*, book 2, 5th edn, Politehnika, Sankt-Peterburg.

4. Kremlevskij, PP 2002, *Rashodomery i schjotchiki kolichestva veshhestv. Spravochnik*, 5th edn, Mashinostroenie, Sankt-Peterburg.
5. Abramov, GS, Barychev, AV & Zimin, MI 2000, *Prakticheskaja rashodometrija v promyshlennosti*, OAO VNIIOJeNG, Moskva.
6. Bolshakov, VB & Kosach, NI 2001, 'Vyznachennia konstruktyvu ta metro-lohichnykh kharakterystyk etaloniv odynyts obiemnoi ta masovoi vytraty ridyny', *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal*, iss. 4, pp. 50-53.
7. *Izmerenie potoka zhidkosti v zakrytyh truboprovodah – metod vzveshivanija* 1980, ISO 4185:1980, viewed 02 december 2021, <[https://standartgost.ru/g/ISO\\_4185:1980](https://standartgost.ru/g/ISO_4185:1980)>.
8. Wang, T & Baker, R 2014, *Coriolis flowmeters: a review of developments over the past 20 years, and an assessment of the state of the art and likely future directions*, *Flow Meas. Instrum.*, vol. 40, no. 1, pp. 99-123.
9. Henry, MP, Bushuev, O & Ibryaeva, O 2017, *Prism Signal Processing for Sensor Condition Monitoring*, *2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics ISIE*, vol. 10, no. 2, pp. 224-276.
10. Ibryaeva, O & Salov, D 2017, 'Matrix Pencil Method for Coriolis Mass Flow Meter Signal Processing in Two-Phase Flow Conditions', *International conference on Industrial Engineering (ICIE)*, pp. 4.
11. Sarrazin, F, Sharaiha, A & Pouliguen, P 2011, 'Comparison between Matrix Pencil and Prony methods applied on noisy antenna responses', *Loughborough Antenna and Propagation Conference Loughborough Antennas & Propagation Conference*, pp. 1-44.
12. Li, M & Henry, MP 2016, 'Complex Bandpass Filtering for Coriolis Mass Flow Meter Signal Processing', *42nd IEEE Industrial Electronics Conference*, vol. 1, no. 1, pp. 133-137.
13. Kretschmar, M & Welsby, S 2005, 'Capacitive and Inductive Displacement Sensors', in Wilson, J (ed.), *Sensor Technology Handbook*, Newnes, Burlington, pp. 193-222.
14. Pohanka, M, Pavlis, O & Skladal, P 2007, 'Rapid Characterization of Monoclonal Antibodies using the Piezoelectric Immunosensor', *Sensors*, no. 7, pp. 341-353.

Стаття надійшла до редакції 12 грудня 2021 року