

## ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИНИ

УДК 004.942

### РОЗРОБЛЕННЯ ВЕБ-ОРІЄНТОВАНОГО СИМУЛЯТОРА ДЛЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТУРБІННИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ ГАЗУ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

*М. О. Слабінога\*, Н. Б. Клочко*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська,  
15, м.Івано-Франківськ, 76019, slabinoha@i.ua*

*Стаття присвячена розробці веб-орієнтованого симулятора для імітаційного моделювання процесу функціонування лічильника ЛКГ G250. Програмно реалізовано математичну модель розрахунку коефіцієнта перетворення лічильника. Розроблено структуру звертання до симулятора та алгоритм взаємодії з користувачем. Підібрано засоби реалізації симулятора. Створено веб-орієнтований інтерфейс користувача для отримання розрахунків та виведення графіків розподілу коефіцієнта перетворення з урахуванням похибок вхідних величин, що підкоряються нормальному закону розподілу.*

*Ключові слова: похибка вимірювання, турбінні лічильники, веб-орієнтовані симулятори, метод Монте-Карло, моделювання.*

*Статья посвящена разработке веб-ориентированного симулятора для имитационного моделирования процесса функционирования счетчика ЛКГ G250. Программно реализована математическая модель расчета коэффициента преобразования счетчика. Разработана структура обращения к симулятору и алгоритм взаимодействия с пользователем. Подобраны средства реализации симулятора. Создан веб-ориентированный интерфейс для получения расчетов и вывода графиков распределения коэффициента преобразования с учетом погрешностей входных величин, подчиняющихся нормальному закону распределения.*

*Ключевые слова: погрешность измерения, турбинные счетчики, веб-ориентированные симуляторы, метод Монте-Карло, моделирование.*

*The article is devoted to the development of a web-based simulator for simulation of the operation of the GKG G250 flow meter. The mathematical model of calculating the conversion factor of the counter has been implemented programmatically. The structure of the requests to the simulator and the algorithm of interaction with the user were developed. The instruments and technologies for implementing the simulator were selected. A web-oriented interface has been created for obtaining calculations and outputting graphs for the distribution of the conversion coefficient, taking into account the errors of input quantities, which were normally distributed.*

*Keywords: measurement error, turbine flow meters, web-oriented simulators, Monte Carlo method, simulation.*

Проведення імітаційного моделювання процесу функціонування нафтогазового обладнання для оцінювання впливу похибки окремих величин на сумарну складову є важливою науково-прикладною проблемою. Віртуальні лабораторні симулятори на базі таких моделей, дозволяють легко інтегрувати процес практичного дослідження функціонування окремих вимірювальних

пристроїв в навчальні програми профільних дисциплін, зокрема, і для студентів дистанційної форми навчання. Тому розроблення таких віртуальних лабораторних симуляторів, зокрема для моделювання роботи турбінних лічильників газу, та інтеграція їх в навчальну програму дисципліни є важливою задачею з точки зору підвищення якості надання освітніх послуг.

Базовою моделлю для розробленого лабораторного стимулятора вибрано математичну модель турбінного лічильника газу, запропоновану у [1].

Турбінні газові лічильники призначені і відкалібровані в умовах рівномірного осьового потоку. А це означає, що якщо у потоці газу виникають завихрення на вході турбіни, то залежно від напрямку цих завихрень, турбіна може збільшити або зменшити швидкість

$$K = \frac{tg\beta}{rA} - \frac{0.345n(R+a)\frac{S}{A^2}\sin\beta}{r^{-2}} \times \left( \frac{St \cdot 4 \cdot e^{\frac{2.4919-k}{0.003}} \rho_c d (\rho_c^{0.5} + 2.08 - 1.5(x_a + x_y))}{D^2 \pi (T^{0.5} + 1.37 - 9.09 \rho_c^{0.125})} \right)^{-0.2} \quad (1)$$

де  $\beta$  – кут нахилу лопаті (кут атаки);  $A$  – кільцевий поперечний переріз потоку

$$(A = \pi R^2 - \pi a^2), \quad m^2; \quad \bar{r} = \sqrt{\frac{R^2 + a^2}{2}} -$$

середньоквадратичне значення внутрішнього та зовнішнього радіусів турбіни;  $R$  – зовнішній радіус турбіни, м;  $a$  – внутрішній радіус турбіни, м;  $S$  – площа поверхні леза лопаті ( $S = b(R - a)$ ),  $m^2$ ;  $n$  – кількість лопатей турбіни;  $D$  – діаметр труби, на якій встановлено турбінний лічильник, м ( $D = 2R$ );  $\rho_c$  – густина суміші газу,  $kg/m^3$ ;  $x_a$  – молярна частка азоту;  $x_y$  – молярна частка діоксиду вуглецю;  $T$  – термодинамічна температура газу, К;  $k$  – ентропійний коефіцієнт;  $St$  – число Струхала.

Рівняння (1) характеризує коефіцієнт перетворення турбінних лічильників, а саме: зміну кутової швидкості обертання турбіни в залежності від об'єму газу. Разом з тим (1) показує, що нелінійність зміни кутової швидкості за рахунок зміни витрати за нормальних умов експлуатації є функцією основних геометричних параметрів турбінного лічильника та критерію Рейнольдса. Другий доданок у рівнянні (1) враховує гальмівний момент робочого середовища за умов турбулентного потоку та інших процесів, що супроводжують зміну виду потоку від перехідного і до ламінарного [4]. Дана модель дозволяє враховувати систематичну і випадкову складові похибок при опрацюванні результатів вимірювання об'єму газу турбінними лічильниками, а також врахування параметрів потоку газу дозволяє точніше оцінити коефіцієнт перетворення. У [4] доведено, що поряд із відомим впливом конструктивних особливостей виконання турбіни (кут нахилу лопатей, їх геометричні розміри, шорсткість

обертання, що призведе до завищених або занижених показів лічильника, а отже, споживач або постачальник можуть зазнати втрат. Питанню вдосконалення моделі вимірювання об'ємної витрати присвячено ряд робіт [2-4]. Фізична модель роботи турбінних лічильників (1) запропонована у [1] була покладена в основу імітаційного моделювання методом Монте Карло. Наведемо цю формулу:

поверхні лопатей) потребує більш детального дослідження процесу гідродинамічної взаємодії вимірюваного потоку газу для різних його режимів (ламінарний, перехідний, турбулентний) з врахуванням критеріїв гідродинамічної подібності і параметрів природного газу, які безпосередньо впливають на сили динамічного та механічного опору вимірювального середовища. Залежність (1) дозволяє коригувати систематичну складову похибки на етапі проектування і метрологічної атестації, оскільки враховує і геометричні параметри турбіни, і параметри вимірюваного середовища, чим досягається підвищення точності результатів вимірювання турбінними лічильниками газу при їх калібруванні як еталонних засобів [1].

Розроблення веб-орієнтованого симулятора для імітаційного моделювання роботи турбінних лічильників газу дозволяє дослідити та оцінити вплив кожного з параметрів моделі (1) на коефіцієнт перетворення. Для реалізації симулятора вибрано метод Монте-Карло в силу його переваг та можливостей моделювання поведінки вхідних параметрів [5].

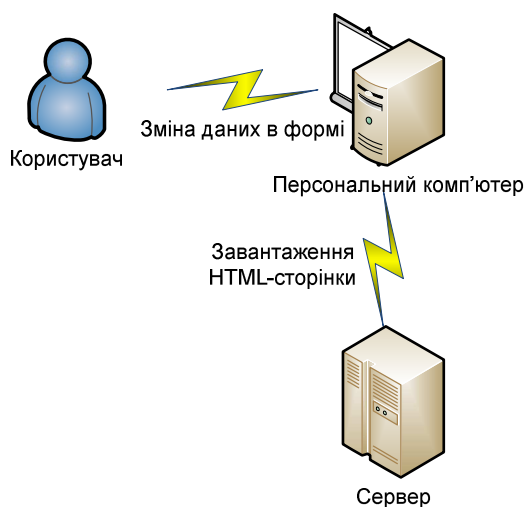
Оскільки загальною тенденцією в наданні освітніх послуг, зокрема за дистанційною формою, є впровадження веб-орієнтованих технологій в навчальний процес [6], було прийняте рішення про розробку лабораторного симулятора з використанням веб-орієнтованих мов програмування.

Розроблений симулятор передбачає наступні елементи графічного інтерфейсу:

- форму для введення даних користувачем, при цьому деякі параметри внесені за замовчуванням;
- текстову інформацію про коефіцієнт перетворення, геометричні параметри турбіни лічильника та параметри природного газу;

- графіки розподілу значень коефіцієнта перетворення турбінного лічильника та значення, яке вносить поправку на геометричні параметри турбіни і параметри природного газу з урахуванням допустимих відхилень вхідних величин. На даному етапі користувач має змогу оцінити систематичну і випадкову складові похибки визначення коефіцієнта перетворення турбінного лічильника газу.

Загальна структура взаємодії користувача з розробленим лабораторним симулятором наведено на рис. 1.



**Рисунок 1 – Загальна структура взаємодії користувача з лабораторним симулятором.**

Користувач за допомогою програми перегляду веб-сторінок (браузера) звертається до сервера із запитом на завантаження HTML-документа, в якому реалізований симулятор. Після зміни значення в одному з текстових полів форми та натискання клавіші Enter, проводиться розрахунок коефіцієнта перетворення турбінного лічильника та виведення графіків обчисленого коефіцієнта перетворення та коефіцієнта, що враховує вплив на геометрію турбіни та параметри газу (другий доданок у рівнянні (1)), в залежності від області допустимих значень вхідних величин.

Оскільки даний симулятор не передбачає збереження значень на сервері та призначений виключно для проведення одноразових експериментальних досліджень, не було необхідності взаємодіяти із серверною частиною. В силу цього авторами прийнято рішення вибрати клієнт-орієнтований веб-інтерфейс, тобто всі обчислювальні операції в процесі моделювання проводилися

безпосередньо в браузері користувача. Звертання до сервера відбувається одноразово, а саме під час першого завантаження сторінки, після чого користувач може працювати автономно. Саме тому серверні мови програмування, такі як PHP, не використовувалися, а реалізація запропонованої моделі та процес імітаційного моделювання здійснено на мові програмування Javascript та мові розмітки веб-сторінок HTML. У випадку розроблюваного стимулятора мова Javascript [7] володіє необхідними властивостями для реалізації моделі, а саме:

- наявність стандартних математичних функцій, зокрема операції обчислення синуса, косинуса, степеня, експоненти, а також вбудованих значень математичних констант;
- можливість генерації псевдовипадкових чисел з рівномірним законом розподілу;
- наявність великої кількості бібліотек для побудови графіків закону розподілу випадкових величин;
- зручність процесу розроблення завдяки відсутності вимог до середовища розроблення та можливості відлагодження програми безпосередньо в браузері користувача.

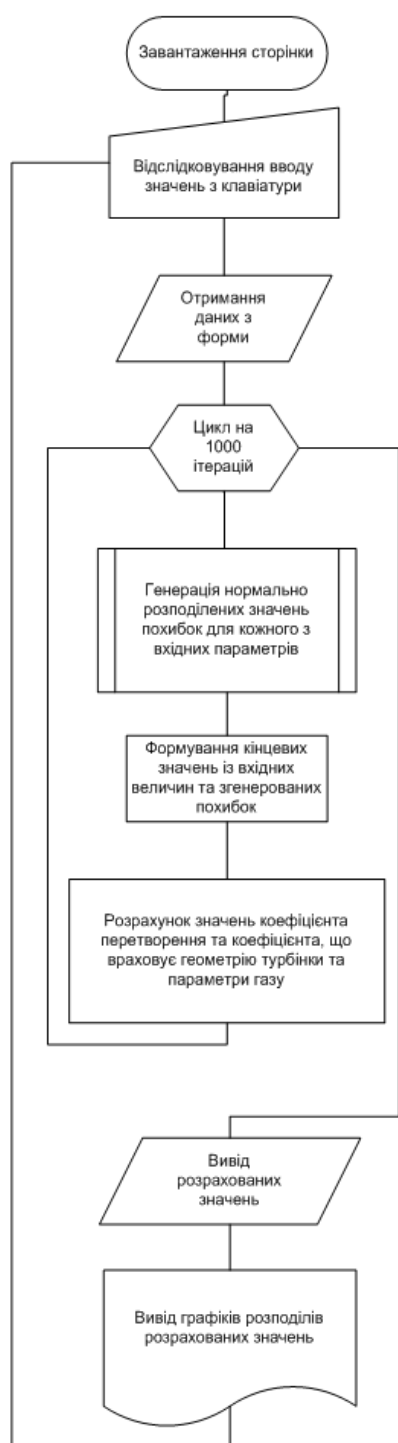
Для підвищення зручності користування інтерфейсом (User Experience) використано бібліотеку Bootstrap [8]. Дана бібліотека дозволяє зробити HTML-сторінку з вхідними даними та результатами симуляції адаптивною до будь-яких параметрів ширини та висоти вікна браузера, що дає можливість користуватися симулятором з мобільних пристроїв, у яких є доступ до мережі інтернет.

Для відображення графіків використано бібліотеку Plotly [9], що дає можливість побудови гістограми розподілу вибраних значень на основі масиву даних без використання громіздких вбудованих функцій.

Алгоритм функціонування програми симулятора наведено на рис. 2.

Після введення користувачем вхідних параметрів моделі та натискання кнопки Enter програма зчитує дані з форми, додаючи до вхідних величин шум, що підпорядковується нормальному закону розподілу і параметри відхилення якого також задаються користувачем. Таким чином, програма генерує 1000 значень кожного з вхідних параметрів з врахуванням шуму. Середнє значення коефіцієнта перетворення лічильника (перший доданок формули (1)) і значення, що враховує геометрію лічильника та параметри газу (другий

доданок формули (1)), відображається на екран в текстовому вигляді.



**Рисунок 2 – Алгоритм функціонування програми симулятора.**

Наступний етап передбачає створення графіків розподілів цих двох величин. Змінюючи значення вхідних параметрів,

користувач має можливість досліджувати вплив даних величин та значень їх похибок на кінцеве значення коефіцієнта перетворення турбінного лічильника газу. Початковий графічний інтерфейс користувача, що відображається при завантаженні сторінки симулятора браузером, показаний на рис. 3.

**Параметри газу**

Густина суміші газу:  ±  кг/м<sup>3</sup>

Молярна частка азоту:  ±

Молярна частка діоксиду вуглецю:  ±

Термодинамічна температура газу:  ±  К

Число Струхалія:  ±

**Параметри турбіни**

Кут нахилу лопаток:  ±  °

Зовнішній радіус турбіни:  ±  м

Внутрішній радіус турбіни:  ±  м

Кількість лопатей турбіни:

**Інші параметри**

Ентропійний коефіцієнт:  ±  м<sup>2</sup>/с

**Рисунок 3 – Початковий вигляд графічного інтерфейсу користувача.**

Геометричні параметри наведені на рисунку вище для турбінного лічильника типу ЛГК G250. Параметри природного газу взято із паспорту газу, а значення ентропійного коефіцієнту для різних значень об'ємної витрати наведені у [1].

Проблемою використання мови програмування Javascript є відсутність у ній стандартної функції генерації псевдовипадкових нормально розподілених значень. Саме тому було прийняте рішення використати в даній задачі, перетворення Бокса-Мюллера [10]. Такий підхід дозволяє згенерувати

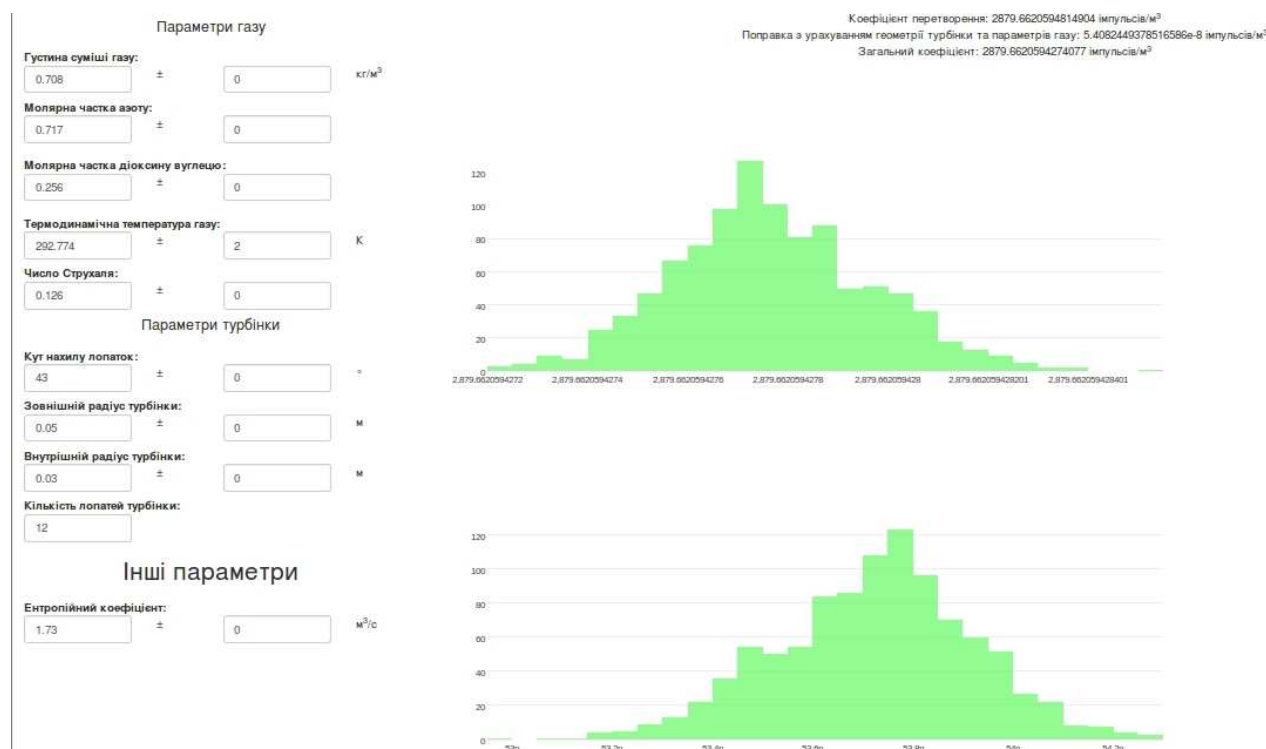
псевдовипадкову величину з нормальним законом розподілу із двох псевдовипадкових величин, яким притаманний рівномірний закон розподілу, за формулою:

$$a = \cos 2\pi x \sqrt{-2 \ln y}, \quad (1)$$

де  $a$  – величина, що підпорядковується нормальному закону розподілу;  $x$  та  $y$  –

величини, що підпорядковуються рівномірному закону розподілу.

Вікно графічного інтерфейсу користувача з додаванням значення похибки для одного з вибраних параметрів зображено на рис.4.



**Рисунок 4 - Вікно графічного інтерфейсу користувача після додавання значення похибки для одного з вибраних параметрів**

## ВИСНОВКИ

Розроблений веб-орієнтований симулятор легко інтегрується в існуючу систему Moodle, на базі якої Центром дистанційного навчання ІФНТУНГ здійснюється підготовка фахівців за дистанційною формою навчання. Роботу з розробленим симулятором включено як навчальний елемент в дисципліну кафедри інформаційно-вимірювальної техніки «Метрологія, технологічні вимірювання і прилади в нафтогазовій промисловості», в розділ «Вивчення засобів вимірювання витрати».

*І.Клочко Н. Б. Удосконалення методів оцінювання точності турбінних лічильників*

*газу: дис. кандидата техн. наук: 05.01.02 / Клочко Наталія Богданівна. – Івано-Франківськ, 2014. – 158 с. 2.Долішня Н.Б. Вдосконалення алгоритму опрацювання результатів вимірювання витрати природного газу турбінним лічильником газу / Н.Б. Долішня // Нафтогазова енергетика. – 2012. – № 2(18). – 127-131 с. 3.Оптимізація алгоритму опрацювання вимірювальної інформації турбінних лічильників газу при їх калібруванні / Н. Б. Клочко, Б. В. Долішній, Н. М. Піндус, С. А. Чеховський // Системи обробки інформації. – 2016. – Вип. 6. – 58-61 с. 4 Wadlow D. Chapter 28.4 Turbine and vane flowmeters / Wadlow D., Webster J.G. // The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook. – Boca Raton, FL: CRC*

Press. – Dec. 1998. 5 Клочко, Н. Б. Застосування методу Монте-Карло для оцінки похибки доплерівських вимірювачів швидкості та кута зносу [Текст] / Н. Б. Клочко, М. О. Слабінога, О. О. Тутка // *Методи та прилади контролю якості*. – 2016. – № 1. – С. 81-85. 6. Design and development of educational technology [Електронний ресурс] / EdX.org - Режим доступу: <https://www.edx.org/course/design-development-educational-mitx-11-132x>  
7. Haverbeke M.: *Eloquent Javascript* / M. Haverbeke. – San-Francisco: No Starch Press, 2014.-472 p. 8 Bootstrap – the most popular responsive front-end framework [Електронний

ресурс] / Bootstrap - Режим доступу: <https://www.getbootstrap.com>. 9. Plotly – make charts and dashboards online [Електронний ресурс] / Plotly - Режим доступу: <https://plot.ly>. 10 Martino L. et al. Efficient sampling from truncated bivariate Gaussians via Box-Muller transformation / L.Martino // *Electronics Letters* – 2012. – № 48 (24). – С. 1533 - 1534.

**Поступила в редакцію 11.04.2017 р.**

**Рекомендували до друку: докт.техн.наук, проф. Середюк О.Є., докт. техн. наук, проф. Райтер П.М.**