

СИСТЕМА ДЛЯ БЕЗКОНТАКТНОГО ВИМІРЮВАННЯ КООРДИНАТ ТОЧОК ПОВЕРХНІ СТІНКИ ВЕРТИКАЛЬНИХ СТАЛЕВИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ РЕЗЕРВУАРІВ

Х.В. Паньків

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 727170,
e-mail: ktsu@nuing.edu.ua

Розроблена система для безконтактних дистанційних вимірювань координат точок поверхні стінки вертикальних сталевих циліндричних резервуарів, яка за допомогою розробленого кутового позиціонера проектує скануючу лінію лазера на стінку резервуара і фотографує її твірну. Після застосування до одержаних фотографій методів обробки зображень за наведеною методикою за допомогою розробленого програмного забезпечення розраховуються координати точок поверхні стінки. Наведено залежність похибки непрямих вимірювань координат точок поверхні стінки від радіуса резервуара та кількості точок вимірювання, що дало змогу розрахувати сумарну зведену похибку розробленої системи вимірювання координат точок поверхні стінки, яка становить 0,098% при вимірюванні резервуара радіусом 5 м з семи точок вимірювання. Проведено промислову апробацію розробленої системи.

Ключові слова: вертикальний сталевий циліндричний резервуар, безконтактні вимірювання, лазер, координати точок.

Разработана система для бесконтактных дистанционных измерений координат точек поверхности стенки вертикальных стальных цилиндрических резервуаров, которая с помощью разработанного углового позиционера проектирует сканирующую линию лазера на стенку резервуара и фотографирует ее образующую. После применения к полученным фотографиям методов обработки изображений по приведенной методике с помощью разработанного программного обеспечения рассчитываются координаты точек поверхности стенки. Приведена зависимость погрешности косвенных измерений координат точек поверхности стенки от радиуса резервуара и количества точек измерения, что дало возможность рассчитать суммарную приведенную погрешность разработанной системы измерения координат точек поверхности стенки, которая составляет 0,098% при измерении резервуара радиусом 5 м с семи точек измерения. Проведена промышленная апробация разработанной системы.

Ключевые слова: вертикальный стальной цилиндрический резервуар, бесконтактные измерения, лазер, координаты точек.

The system for contactless distance measuring of the wall surface points coordinates of vertical steel cylindrical tanks is developed. It uses a developed angular positioner to project a scanning laser line on the tank wall and make photo of its generatrix. After the image processing methods had been applied to the obtained photos, the coordinates of the wall surface points were calculated with the help of the mentioned methodology and developed software. The error dependence of indirect measurements of the tank wall surface points coordinates on the tank radius and number of measuring points is shown. It made it possible to calculate the integral reduced error of the developed system for contactless distance measuring. The integral error is 0.098% when measuring the tank with the radius of 5 m by using seven measuring points. The industrial testing of the developed system was conducted.

Key words: vertical cylindrical steel tank, contactless measurement, laser, points coordinates

Вертикальні сталеві циліндричні резервуари (РВС), які знаходяться на території України в переважній більшості знаходяться в експлуатації понад 20 років, що зумовлює необхідність їх діагностування для підтвердження можливості їх подальшої безпечної експлуатації. Для попередньої оцінки стану РВС використовуються візуально-оптичні та геодезичні методи. Визначення відхилення твірної стінки РВС від вертикалі проводять за допомогою каретки згідно ДСТУ 4147-2003. Цей процес є дуже трудомістким і має високі вимоги до погодних умов, за яких дозволяється проводити вимірювання. Існуючі лазерні скануючі системи [1, 2] є простими в експлуатації, проте їх вартість є високою, що перешкоджає їх широкому застосуванню в Україні.

Для визначення координат точок поверхні стінки резервуара розроблено систему, яка про-

ектує скануючу лінію лазера на стінку резервуара і фотографує її твірну (рис. 1).

Система складається з скануючого лазера, кутового позиціонера, лазерного далекоміра, фотоапарата та портативного комп'ютера (ПК) з необхідним програмним забезпеченням. За допомогою кутового позиціонера проводиться лазерна розгортка (скануюча лінія) зеленого кольору, яка проектується на стінку резервуара під чітко визначеним кутом, що задається позиціонером. Проекція фотографується і за допомогою розробленого програмного забезпечення за отриманою фотографією визначаються координати точок твірної стінки резервуара. Для цього потрібно виміряти відстань від приладу до вимірюваної твірної. За допомогою лазера червоного кольору на лазерній проекції твірної на заданій висоті позиціонується опорну точку, до якої вимірюється відстань. Трику-

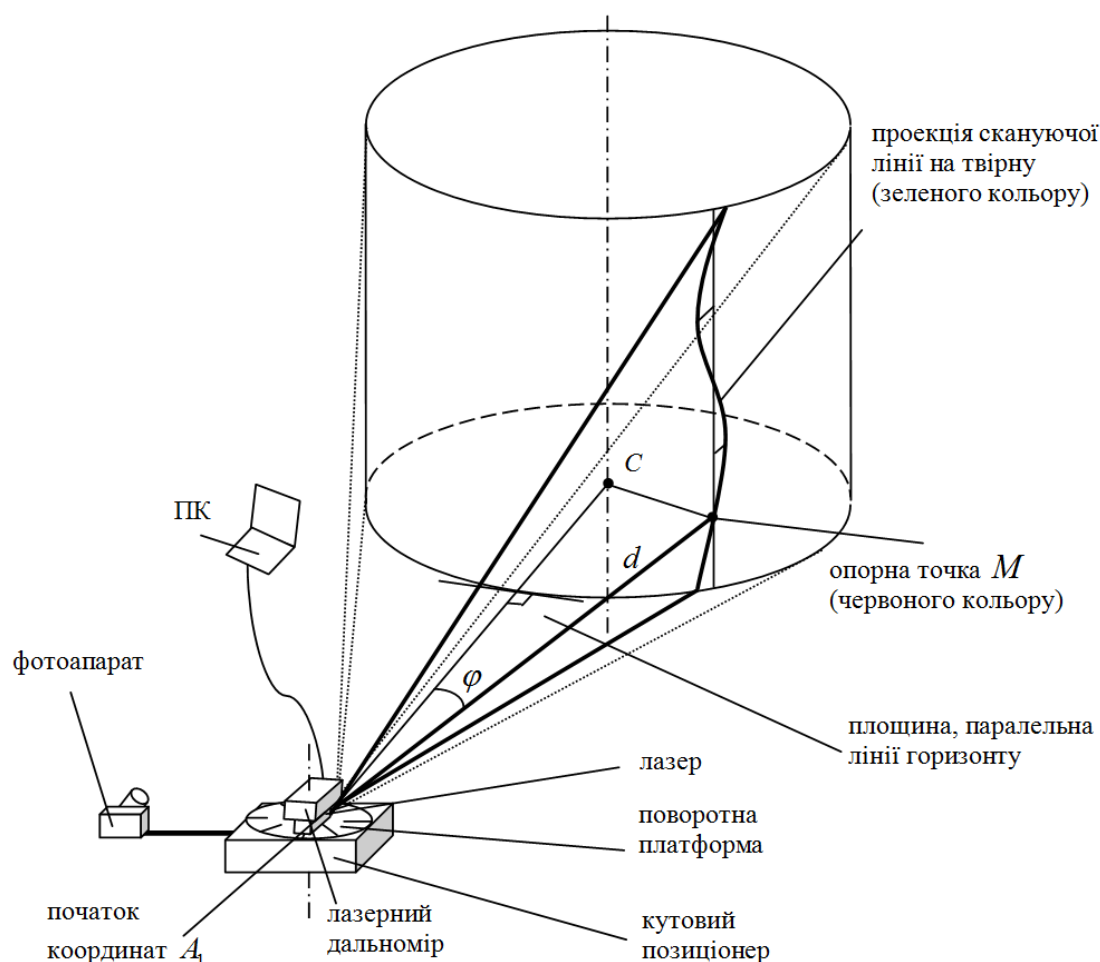


Рисунок 1 – Система для визначення координат точок поверхні стінки резервуара

тник АІМС лежить в площині, паралельній до горизонту. Фотоапарат знаходиться на фіксованій відстані від кутового позиціонера, вони закріплені на кронштейні таким чином, що оптична вісь об'єктива фотоапарата паралельна напрямку нульового кута азимуту кутового позиціонера. При проведенні вимірювань кронштейн встановлюється паралельно горизонту і перпендикулярно до нормалі до стінки резервуара, таким чином напрям нульового кута азимуту кутового позиціонера спрямований по нормалі до стінки РВС.

Параметри внутрішнього калібрування камери, такі як фокусна відстань, кут нахилу пікселя, координати принципової точки та дисторсію можна визначити в результаті калібрування фотоапарата, наприклад, за методом Zhengyou Zhang [3]. Для цього фотографується плоский об'єкт у вигляді шахової дошки під різними ракурсами. За одержаними фотографіями визначаються параметри фотоапарата [4]. Слід зауважити, що в сучасних цифрових фотоапаратах, наприклад, у фотоапараті Nikon D5200, кут нахилу пікселя можна вважати прямим, координати принципової точки вибирати як середину зображення, а фокусну відстань отримати з інструкції користувача, яка додається до об'єктива фотоапарата, зокрема для об'єктива AF-S DX NIKKOR 18–55mm VR фокусна від-

стань становить від 12 мкм залежно від оптичного масштабування [5]. Дисторсією лінзи в сучасних фотоапаратах можна знехтувати зважаючи на сучасні досягнення в виготовленні об'єктивів та те, що найбільше дисторсія проявляється лише на краях зображення. Також в сучасних об'єктивах практично відсутня хроматична аберация.

Для виключення попередньої обробки зображення фотоапаратом доцільно проводити зйомку в RAW-форматі. Слід зауважити, що практично кожен сучасний фотоапарат має в комплекті спеціальне програмне забезпечення для його обробки та перетворення в інші формати. Зокрема у фотоапараті Nikon D5200, використовується NEF-формат і спеціальне програмне забезпечення ViewNX 2.

Враховуючи вимоги до системи для визначення координат точок поверхні стінки резервуара, розроблено функціональну схему кутового позиціонера, наведену на рис. 2. Вимірювання відстані до резервуара здійснюється за допомогою професійного лазерного далекоміра Bosch DLE50 [6].

Логічний керуючий пристрій, після отримання та декодування команди оператора, через силові ключі подає напругу на реле включення лазера та приводу обертового дзеркала пристрою формування скануючої лінії чи на об-

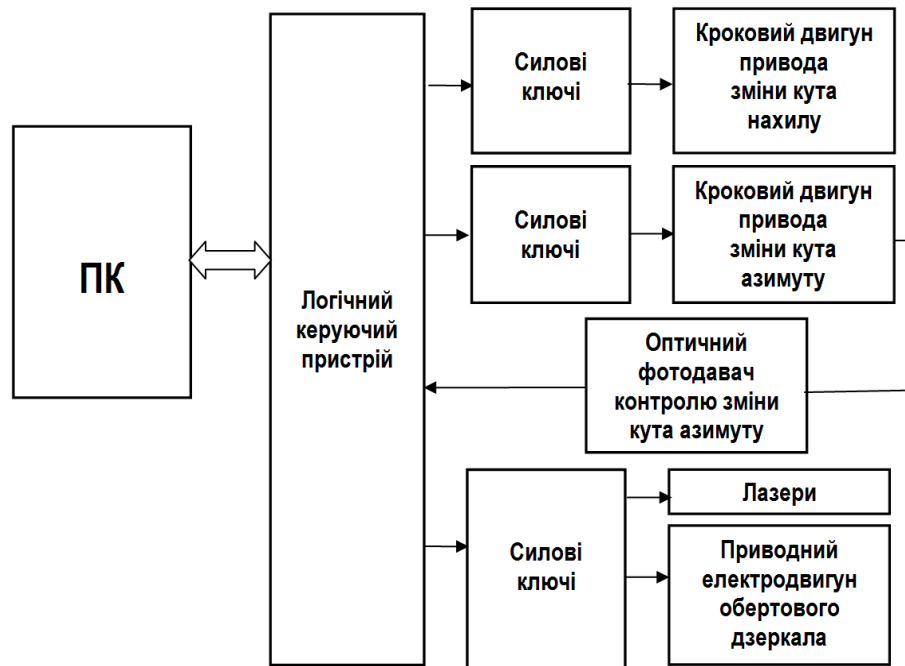


Рисунок 2 – Функціональна схема кутового позиціонера системи для визначення координат точок поверхні стінки резервуара

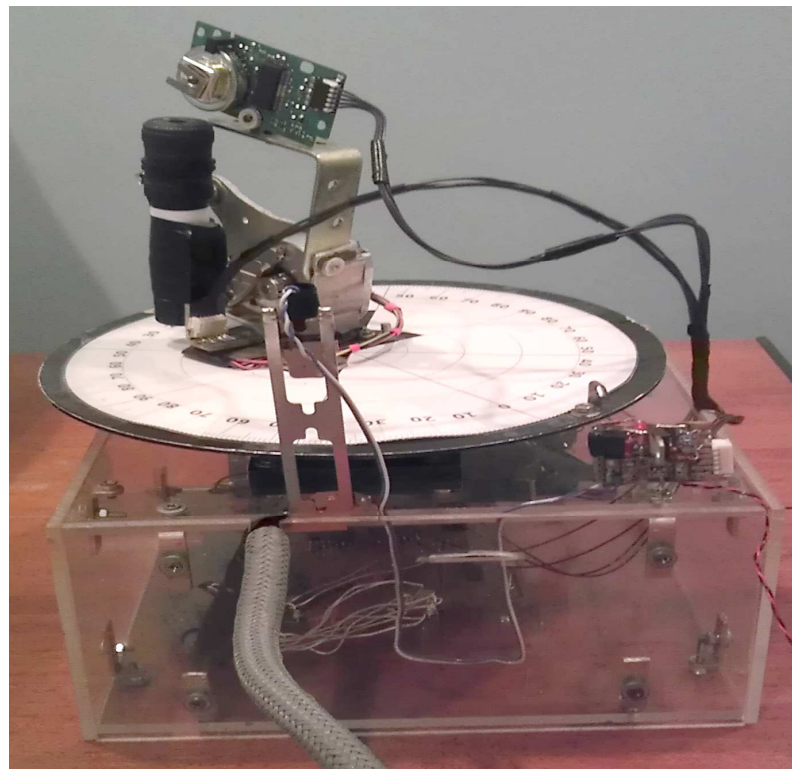
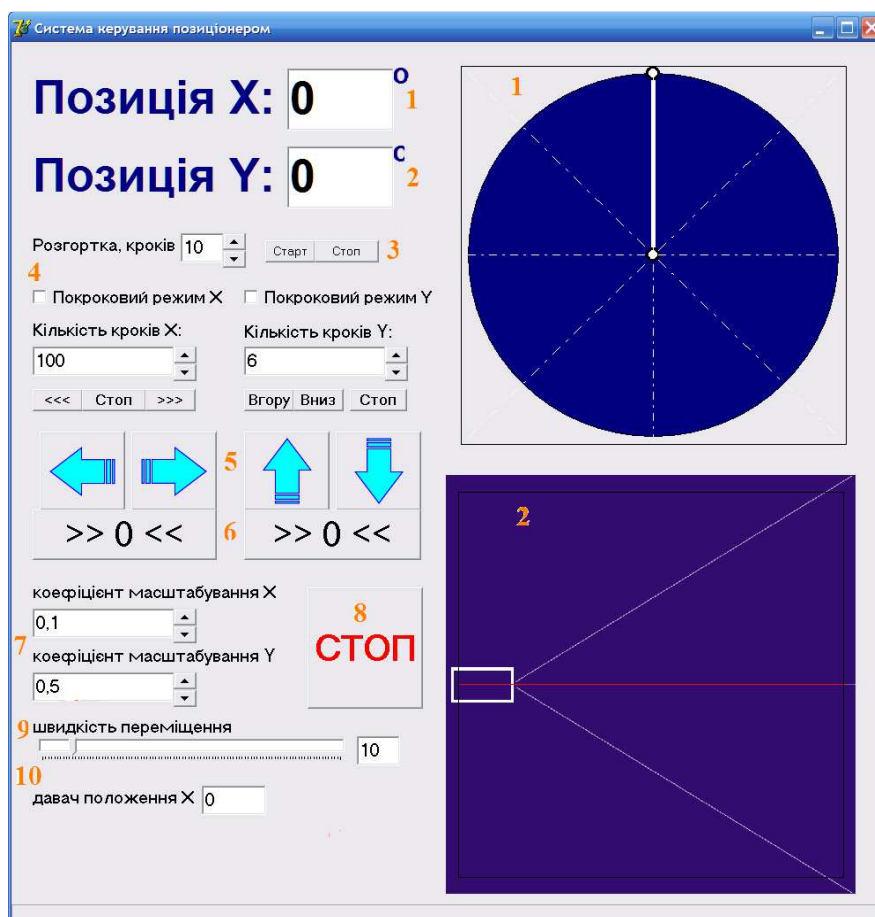


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд кутового позиціонера

мотки відповідних крокових електродвигунів, які обертають платформу в заданому напрямі або позиціонують опорний лазерний промінь. На рух платформи реагує оптичний фотодавач, який передає сигнал зворотного зв'язку назад до ПК, яка, в свою чергу, обробивши його, відображає фактичне положення платформи на моніторі. Зовнішній вигляд кутового позиціонера наведено на рис. 3.

Оператор має можливість віддалено керувати кутовим позиціонером за допомогою ПК, на якому запущено керуючу програму, що дає змогу обмінюватися даними через інтерфейс паралельного порту LPT. Для розроблення програми керування позиціонером обрано середовище Delphi [7]. На рис. 4 наведено інтерфейс системи керування кутовим позиціонером.



1) позиція X (азимут); 2) позиція Y (кут нахилу); 3) розгортка із заданням кроків; 4) покроковий режим X, Y; 5) кнопки ручного переміщення механізмів по координатних осях X, Y; 6) встановлення у початкове положення; 7) коефіцієнт масштабування X, Y; 8) аварійне зупинення; 9) швидкість переміщення; 10) покази датчика положення

Рисунок 4 – Віконний інтерфейс системи керування кутовим опозиціонером

Для визначення циліндричних координат точок поверхні стінки резервуара визначаються координати опорної точки M , яка утворюється шляхом проекції червоної точки лазерного променя на кожен твірну стінки резервуара на заданій висоті. Для цього визначається відстань d_j від опори приладу до цієї точки та кут φ_j між нормаллю до стінки резервуара та твірною (рис. 5).

Перше положення кутового позиціонера приймається за початок координат. Вісь ординат направляється по нормалі до резервуара. Тоді координати опорної точки $M(x_j^i; y_j^i)$ визначаються за формулами:

$$\begin{cases} x_j^i = d_j \cdot \sin(\varphi_j), \\ y_j^i = d_j \cdot \cos(\varphi_j) \end{cases} \quad (1)$$

Після того як проведено всі вимірювання видимої з даного положення опори поверхні стінки резервуара, опора і кутовий позиціонер переносяться в наступне положення і вимірювання повторюються знову.

Координати всіх точок переводяться в систему координат першого положення опори:

$$\begin{cases} x_j^{i-1} = -x_j^i \cdot \cos(\alpha_{li} + \alpha_{il}) - \\ \quad - y_j^i \cdot \sin(\alpha_{li} + \alpha_{il}) + l_i \cdot \sin(\alpha_{li}), \\ y_j^{i-1} = x_j^i \cdot \sin(\alpha_{li} + \alpha_{il}) - \\ \quad - y_j^i \cdot \cos(\alpha_{li} + \alpha_{il}) + l_i \cdot \cos(\alpha_{li}), \end{cases} \quad (2)$$

де j – номер точки;
 i – номер опори, відносно якої визначаються координати;
 l_i – відстань між i -ю та першою опорами;
 α_{li} – кут між нормаллю до стінки резервуара з першої опори та прямою, що утворена першою та i -ю опорами;
 α_{il} – кут між нормаллю до стінки резервуара з i -ї опори та прямою, що утворена першою та i -ю опорами.

Координати осі резервуара x_c і y_c відносно першого положення опори визначаються шляхом мінімізації виразу:

$$\sum_j [(x_j^1 - x_c)^2 + (y_j^1 - y_c)^2 - R^2]^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

де R – номінальний радіус резервуара.

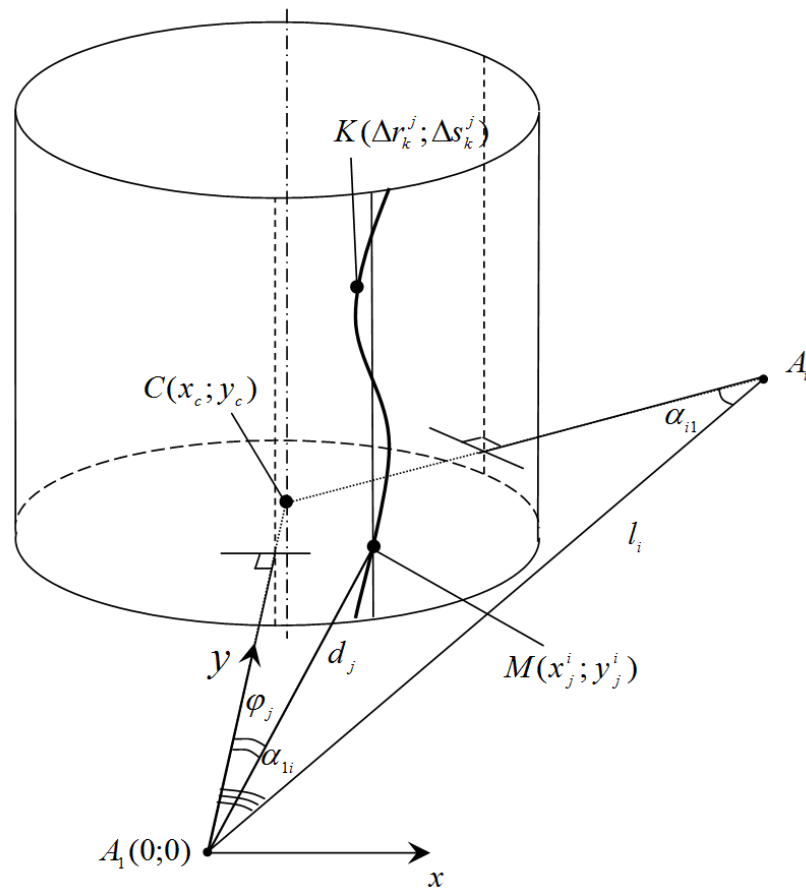


Рисунок 5 – Система вимірювання циліндричних координат точок поверхні резервуара

Після цього потрібно перерахувати координати всіх точок відносно осі резервуара і перевести координати всіх точок поверхні резервуара в циліндричну форму, для чого треба врахувати висоту, на яку піднята опорна точка, і перенести початок координат вниз на цю відстань.

За координатами опорної точки по фотографії визначаються координати всіх точок твірної. Для цього за проекцією твірної на фотографії визначаються координати Δx_k^j і Δy_k^j в пікселях кожної точки К твірної відносно опорної точки j та переводяться в циліндричну систему координат з початком в центрі резервуара:

$$\begin{aligned} \Delta s_k^j &= \Delta y_k^j \cdot Mas \cdot y_j^i; \\ \Delta r_k^j &= \frac{\Delta x_k^j \cdot Mas \cdot y_j^i \cdot d_j}{a}; \end{aligned} \quad (4)$$

де Mas – масштаб фотографії в пікселях;
 a – довжина кронштейну, тобто відстань між фотоапаратом та кутовим позиціонером.

Масштаб фотографії Mas визначається за розміром матриці та роздільною здатністю фотоапарата, які входять в його технічні характеристики. Зокрема, для фотоапарата Nikon D5200 розмір матриці становить $w_m \times h_m = 23,5 \times 15,6$ мм, а максимальна роздільна здатність $n_w \times n_h = 6000 \times 4000$ пікселів

[5]. Тобто мінімальний масштаб матриці становить $w_m/n_w = h_m/n_h = 4$ мкм/піксель, що з врахуванням фокусної відстані f становить від $Mas = w_m/(n_w \cdot f) = 0,00033$ 1/піксель. Для визначення розміру об'єкта його розмір в пікселях множиться на відстань до об'єкта і на масштаб матриці фотоапарата [8]. При використанні іншого розширення фотоапарата масштаб перераховується. Оскільки площина матриці фотоапарата спрямована паралельно твірним стінки РВС, то твірні на фотографії перпендикулярні до горизонту і їх розмір залежить від відстані до них, яка визначається як ордината опорної точки сфотографованої твірної за формулою (1). Якщо висота РВС не дає змогу зняти його одним кадром з певної відстані, то одним з варіантів вирішення цієї проблеми є зйомка РВС у перспективі з подальшою корекцією. Для цього змінюється кут нахилу фотоапарата.

Перед початком вимірювань необхідно провести перевірку стану зовнішньої поверхні стінки резервуара на відсутність забруднень, бризок металів, напливів, задирок для можливості проведення зовнішніх вимірів [9].

Обробка фотографій, отриманих за допомогою розробленого методу здійснюється в середовищі Matlab [10] з використанням декореляційного розтягнення, розбиття фотографії за трьома кольорами та бінаризація за кожним кольором зокрема. Результатом обробки зобра-

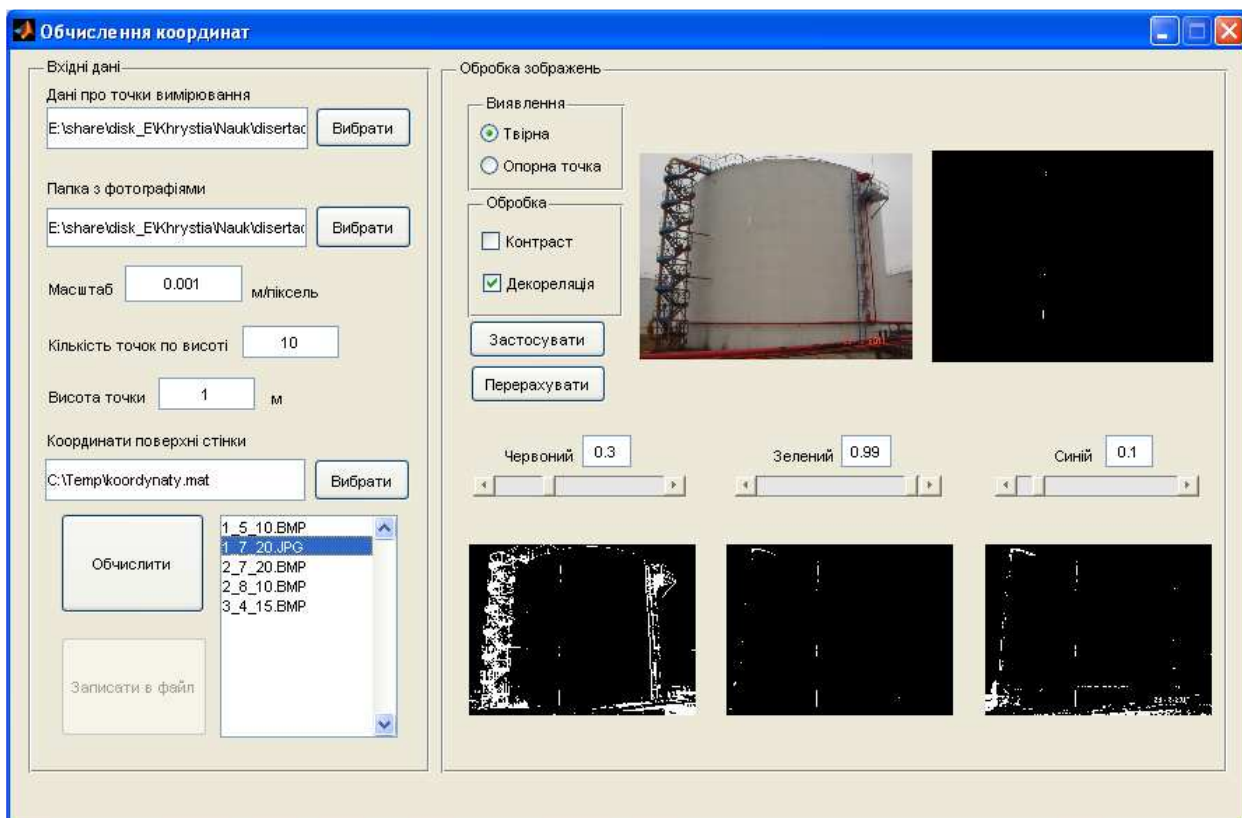


Рисунок 6 – Вікно програми обробки фотографій та розрахунку координат

ження є бінарний масив, де одиницями позначено проекцію лазерного променя на твірну резервуара (рис. 6).

Декореляційне розтягнення покращує співвідношення кольорів на зображенні з урахуванням кореляційних залежностей. При перетворенні значень вихідних кольорів зображення діапазон відображення, в більшості випадків, збільшується. Інтенсивності кольорів кожного пікселя перетворюються у власний колірний простір з кореляційною матрицею, розтягуються, вирівнюються і трансформуються назад.

Бінаризація зображення полягає у перетворенні його пікселів в масив бінарних елементів: в «1», якщо інтенсивність кольору перевищує задане значення, і в «0» в протилежному випадку.

Якщо в результаті обробки фотографії не вдалося виявити твірну як суцільну лінію, доцільно скористатися інтерполяційними процедурами з метою обчислення координат точок, виявити які на фотографії не вдалося.

Слід звернути увагу, що обробку фотографії слід проводити окремо для розпізнавання на ній твірної та опорної точки, для чого встановлено перемикачі «Виявлення».

Сумарна похибка вимірювання координат точок поверхні стінки резервуара складається з похибок вимірювання координати опорної точки та похибки вимірювання координат точок твірної по фотографії відносно координат опорної точки.

Для оцінювання залежності кількості опор n , з яких проводиться вимірювання для забез-

печення необхідного рівня точності, від радіуса резервуара R приймається, що резервуар є колом, вписаним в фігуру, утворену прямими між опорами. Тоді:

$$d = R \cdot \text{ctg}(\varphi),$$

$$\varphi = 90 - \frac{180}{n}. \quad (5)$$

Графік залежності похибки вимірювання від радіуса резервуара та кількості опор вимірювання (рис. 7) враховує похибку при переведенні координат в перше положення опори.

Як видно з рис. 7, чим більший радіус резервуара, тим з більшої кількості опор проводиться фотографування для забезпечення необхідного рівня точності. Для резервуара радіусом 5 м при проведенні вимірювань з 7 опор похибка вимірювання радіальної координати становить 0,098%, тобто 4,9 мм.

Для забезпечення такої точності відтворення поверхні стінки РВС з врахуванням методичної похибки при використанні кубічних сплайнів, яка залежить від кроку дискретизації та похідної функції четвертого порядку, для максимально допустимої згідно [11] вміятини висотою 45 мм при мінімальній її висоті 3 м достатньо провести вимірювання по вертикалі в зоні дефекту в трьох точках.

Промислова апробація розробленої системи була проведена на РВС НГВУ «Долинафтогаз». В результаті обробки отриманих фотографій за допомогою розробленого програмного забезпечення отримано координати 8-ї твірної стінки РВС, виміряної з одного положення

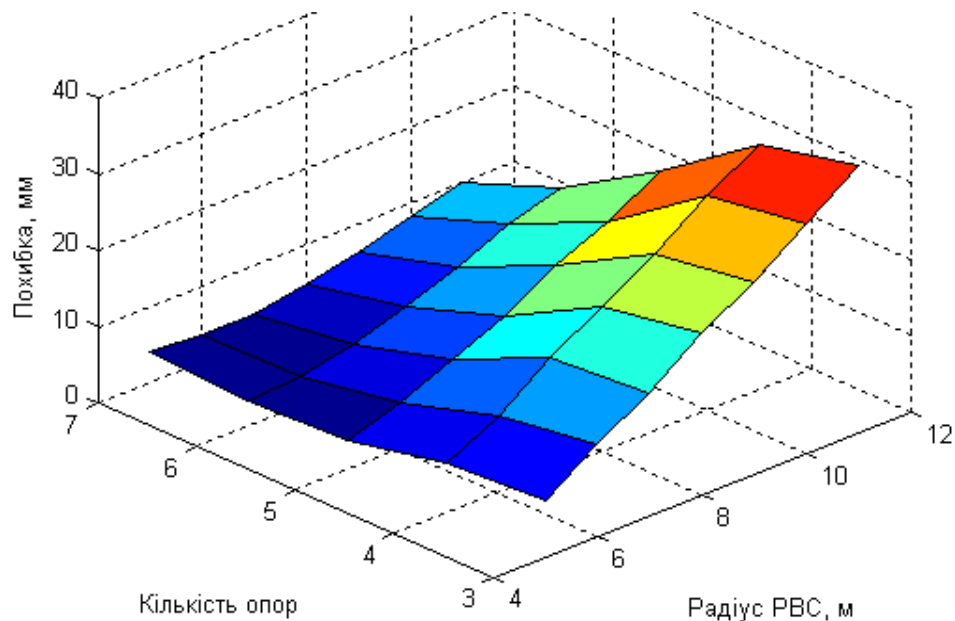
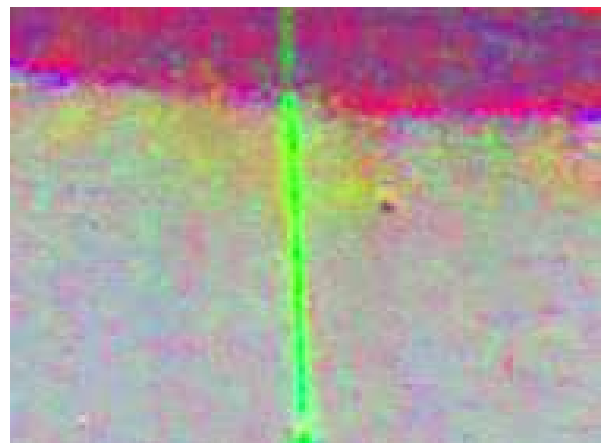


Рисунок 7 – Залежність похибки вимірювання координати r від радіуса РВС та кількості опор



а)



б)

а) фотографія без обробки; б) фотографія після декореляційного розтягнення

Рисунок 8 – Зображення скануючої лінії на різних видах поверхонь

опори. Отримані значення порівнювалися з результатами вимірювань відхилень 8-ї твірної стінки РВС від вертикалі за даними протоколу геометричного калібрування. Математичне сподівання різниці між вимірюваннями за допомогою каретки та за допомогою розробленої системи дорівнює $-0,25$ мм, середньоквадратичне відхилення рівне $2,86$ мм.

Слід зауважити, що похибка обчислення координат стінки буде залежати від способу обробки фотографії: чим чіткіше буде виділена проекція твірної, тим точнішим буде результат. Також під час проведення експериментальних досліджень проведено дослідження можливості виявлення скануючої лінії на непофарбованій поверхні, що показано на рис. 8.

Як видно з рис. 8 б) після декореляційного розтягнення чітко видно проекцію лазерного променя навіть на поверхню, не покриту фарбою.

Розроблену систему можна використовувати також для визначення координат інших великогабаритних об'єктів, обробляючи виміряні параметри з врахуванням геометричних особливостей об'єкта.

Література

- 1 Leica Geosystems – when it has to be right [Електронний ресурс] / Leica Geosystems. – Sweden, 2013. – Режим доступу: <http://www.leica-geosystems.com/en/index.htm>.
- 2 Transforming the Way the World Works. Engineering & Construction, Surveying, Agriculture, Fleet and Field Service Management [Електронний ресурс] / Trimble. – USA, 2013. – Режим доступу: <http://www.trimble.com>.
- 3 Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [Електронний ресурс] / Z. Zhang // IEEE Transactions on Pattern Analysis

and Machine Intelligence. – 2000. – Vol. 22, № 11. – P. 1330-1334. – Режим доступу : <http://research.microsoft.com/en-us/um/people/zhang/Papers/TR98-71.pdf/>

4 Bouguet J. Camera Calibration Toolbox for Matlab [Електронний ресурс] / Jean-Yves Bouguet. – USA, 2010. – Режим доступу : http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html.

5 Nikon D5200 [Електронний ресурс] / Nikon Europe U.K.. – Україна, 2013. – Режим доступу: <http://www.nikon.ua/uk-UA/product/digital-cameras/slr/consumer/d5200>

6 Лазерный дальномер DLE 50 Professional [Електронний ресурс] / ООО «Роберт Бош». – Москва, 2003. – Режим доступу: <http://www.bosch-pt.com/productspecials/professional/dle50/ru/ru/start/index.htm>.

7 Культин Н. Б. Основы программирования в Delphi XE: учеб. пособие / Н. Б. Культин. – С.: «БХВ-Петербург», 2011. – 416 с. – ISBN 978-5-9775-0683-0.

8 Назаров А. С. Фотограмметрия [Текст] : учеб. пособие для студентов вузов / А. С. Назаров. – Мн.: ТетраСистемс, 2006. – 368 с. : ил. – ISBN 986-470-402-5.

9 Большаков В. Д. Теория математической обработки геодезических измерений / В. Д. Большаков, П. А. Гайдаев. – М.: Недра, 1977. – 367 с.

10 Кетков Ю. Л. MATLAB 7: программирование, численные методы / Ю. Кетков, А. Кетков, М. Шульц. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 752 с. – ISBN 5-94157-347-2.

11 Пронкин Н. С. Основы метрологии : практикум по метрологии и измерениям : [учеб. пособие для вузов] / Пронкин Н. С. – М. : Логос; Университетская книга, 2007. – 392 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
21.04.14*

*Рекомендована до друку
професором **Заміховським Л.М.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)*

*професором **Лютаком І.З.**
(Прикарпатський національний університет
ім. В. Стефаника, м. Івано-Франківськ)*