

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ MONITORING, DIAGNOSTICS AND MANAGEMENT BY ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

УДК 681.518.5

С.В. Зайченко, доктор техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-8446-5408
С.П. Шевчук, доктор техн. наук, професор, ORCID 0000-0002-7517-0501
А.В. Данілін, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-3207-1156
В.А. Побігайло, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2673-7329
Н.І. Жукова, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2254-1089
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕХАТРОННИЙ КОМПЛЕКС ДІАГНОСТУВАННЯ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

Для визначення напруженого стану трубопроводу необхідно визначення дійсного його положення. Визначення дійсного положення трубопроводу можливе шляхом використання мобільного робота. Використання малогабаритного легкого робота дозволить встановити положення трубопроводу у складних умовах, коли використання повно профільних діагностичних засобів неможливо. Аналіз можливих методів позиціонування мехатронних комплексів показав, що для визначення положення комплексу за допомоги мікроелектронних систем можливо використати три кути Ейлера і довжину траєкторії руху. Метою досліджень є розроблення аналітичних залежностей і експериментального мехатронного комплексу які дозволяють встановити дійсне положення осі трубопроводу. Для досягнення поставленої мети розроблені залежності які дозволяють визначити за кутами Ейлера і довжиною пройденого шляху траєкторію руху мехатронного комплексу. Після встановлення координат траєкторії руху комплексу розроблені залежності які дозволяють встановити положення осі трубопроводу. Розроблено експериментальний зразок мехатронного комплексу діагностування стану трубопроводів який дозволив підтвердити правомірність запропонованої методики при визначенні дійсного положення осі трубопроводів. Отримані аналітичні залежності можливо використати при дослідженні геометрії геотехнічних споруд.

Ключові слова: трубопровід, положення, система координат, кути Ейлера, довжина траєкторії, мехатронний комплекс.

Вступ

Сучасний етап розвитку засобів визначення властивостей і діагностування технічних об'єктів характеризується застосуванням останніх досягнень механіки, інформаційних технологій, електротехніки і теорії керування. Застосування таких напрямів розвитку науки і техніки в поєднанні з географією і геологією дозволило створити якісно нові напрями технічного прогресу: геоінформатику (геоінформаційні системи), телеметрію свердловин, внутрішньотрубну дефектоскопію та ін. Дані системи представляють собою інтегровані комп'ютерні системи, що знаходяться під управлінням спеціалістів-аналітиків, які здійснюють збір, зберігання, маніпулювання, аналіз, моделювання та відображення просторово-співвіднесених даних [1]. З причини наявності характерних ознак, таких як ІТ-технології, електронні системи, системи керування, різні типи датчиків, механічних, оптичних та інших систем збору інформації, данні системи можливо класифікувати як мехатронні [2]. Подібні роботизовані інформаційні комплекси

успішно зарекомендували себе в дослідженнях, при яких присутність людини ускладнена: розвідування вулканів, свердловин, пустель, морського дна, нафто-газосховищ та інші [3–8].

Одним з головних показників, які визначають належну надійність трубопроводів, являється дійсне положення трубопроводу. Встановлення різниці між проектним початковим станом трубопроводу і оперативними даними дозволяє контролювати, діагностувати і прогнозувати напружено-деформований стан споруди [9-15].

Мета і завдання досліджень

Метою роботи є визначення алгоритму дії і створення промислово-експериментального зразка мехатронного комплексу діагностування магістральних трубопроводів для встановлення дійсного профілю підземної споруди, що дозволяє провести аналіз його напруженого стану у випадку зміни проектного положення.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні завдання:

- аналіз існуючих методів визначення геометричних параметрів трубопроводів;
- аналіз способів позиціонування елементів мехатронних систем;
- розробка основ функціонування мехатронного комплексу, що дозволяє визначити задачі і область використання пристроїв даного класу;

Матеріал досліджень

Особливу складність при визначенні положення мехатронних систем викликає визначення положення центра системи відліку за показниками акселерометра шляхом подвійного інтегрування отриманих значень прискорень за часом [15]. В наслідок шумів і спотворень даних, пов'язаних з вібрацією, зміною положення і таруванням датчика, виникають значні похибки вимірювань (до 20 м).

Спрощення системи збору і переробки інформації з підвищенням точності отриманих даних здійснюється шляхом використання сучасних мікроелектронних систем (наприклад використавши залежності перетворення координат точки в просторі при переході від різних систем координат: початкової і поточної).

При русі діагностичного комплексу уздовж трубопроводу виробки положення датчиків постійно змінюється внаслідок нерівності поверхні контакту коліс. Площадка з розташованими датчиками відстані і гіроскопом, рухаючись зміщується відносно початкового положення і повертається на кути навколо осей початкової системи координат OX , OY , OZ (рис. 1).

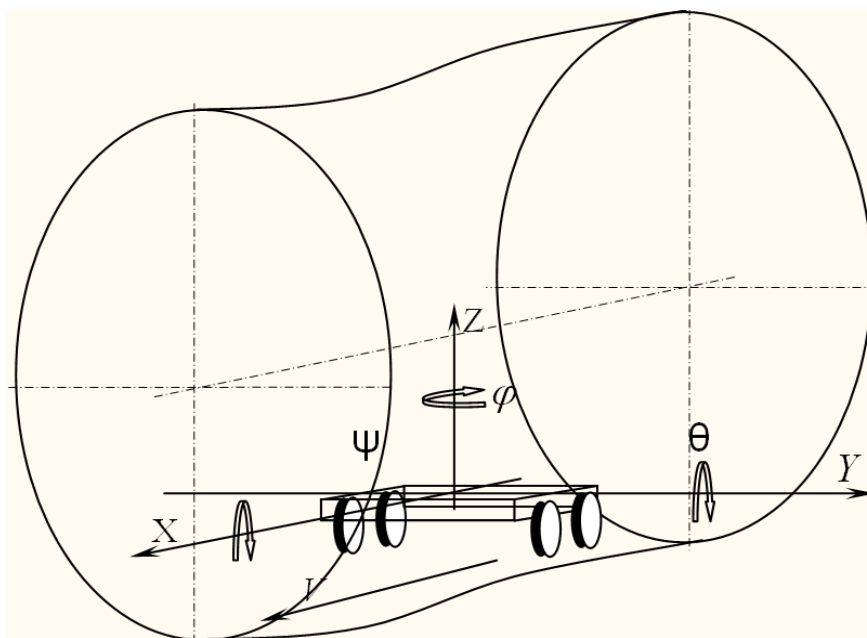


Рисунок 1 – Схема руху мехатронного комплексу

Для опису положення площадки комплексу в тривимірному просторі необхідно 6 параметрів. В якості параметрів, які описують положення площадки, обрано координати x , y , z і кути Ейлера φ , ψ , θ (рис. 2).

Серед різноманітних систем кутів Ейлера, які описують орієнтацію тіла відносно початкової системи координат, обрано систему, вектори обертання якої колінеарні осям OX , OY , OZ . Дані напрями обертання носять назву кутів крену ϕ , тангажу θ і ристання ψ . Перевага даної системи полягає у застосуванні сучасних мікроелектронних систем (MPU 6050) при контролі руху апаратів.

Для усунення похибок, пов'язаних з використанням акселерометрів для визначення положення діагностичного комплексу запропоновано використати данні гіроскопа і довжини шляху (траєкторії) L (рис. 2).

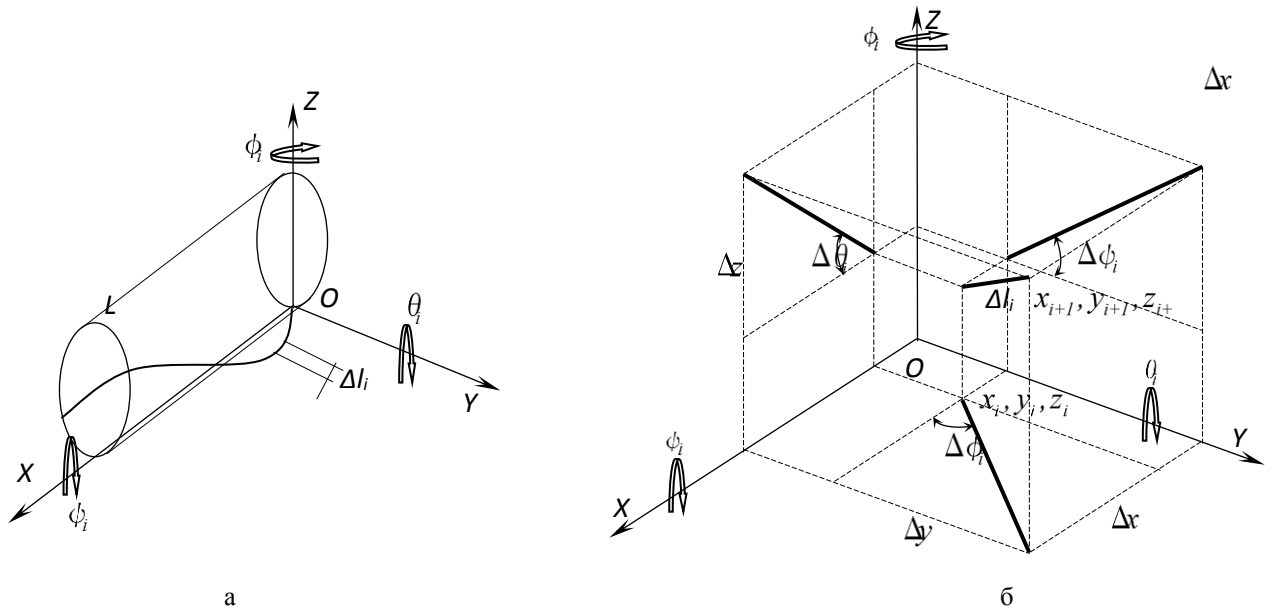


Рисунок 2 – Схема визначення положення мехатронного комплексу

Координати траєкторії руху комплексу x_i, y_i, z_i на кроці i можливо представити як суму проєкції елементарних кроків довжиною Δl на осі OX, OY, OZ (рис. 2 а, б):

$$\begin{cases} x_i = \sum_{i=1}^n \Delta x_i; \\ y_i = \sum_{i=1}^n \Delta y_i; \\ z_i = \sum_{i=1}^n \Delta z_i. \end{cases} \quad (1)$$

Знайдемо проєкцію кроку Δl на осі OX, OY, OZ з системи рівнянь визначивши кути з прямокутного паралелепіпеду утвореного проєкціями кроку $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ з діагоналлю довжиною кроку Δl (рис. 2, б):

$$\begin{cases} \sin \psi = \frac{\Delta z_i}{\sqrt{\Delta l^2 - \Delta x_i^2}}; \\ \sin \theta = \frac{\Delta z_i}{\sqrt{\Delta l^2 - \Delta y_i^2}}; \\ \sin \phi = \frac{\Delta y_i}{\sqrt{\Delta l^2 - \Delta z_i^2}}. \end{cases} \quad (2)$$

Рішення системи рівнянь (2):

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta x_i &= \Delta l \frac{(1 - \sin(\theta_i) \sin(\phi_i))^2 ((\sin(\theta_i) \sin(\phi_i) \sin(\psi_i))^2 - \sin(\theta_i)^2 \sin(\phi_i) - \sin(\psi_i)^2 + \sin(\theta_i)^2)^{\frac{1}{2}}}{(\sin(\theta_i) \sin(\phi_i))^2 - 1} \sin(\psi_i); \\ \Delta y_i &= \Delta l \sin(\phi_i) \sqrt{\frac{\sin(\theta_i)^2 - 1}{(\sin(\theta_i) \sin(\phi_i))^2 - 1}}; \\ \Delta z_i &= \Delta l \sin(\theta) \sqrt{\frac{\sin(\phi_i)^2 - 1}{(\sin(\theta_i) \sin(\phi_i))^2 - 1}}. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Отриманий масив даних представляє собою траєкторію руху діагностичного комплексу, яка у випадку забезпечення нижнього положення з врахуванням радіального зміщення буде відповідати трьохвимірній трасі трубопроводу.

$$\left\{ \begin{aligned} x_0 &= \sum_{i=1}^n \Delta l \cos \Delta \phi_i + R \sin \Delta \theta_i, \\ y_0 &= R \sin(\Delta \theta_i + \Delta \psi_i), \\ z_0 &= R(1 - \cos(\Delta \theta_i + \Delta \psi_i)) + R \cos \Delta \theta_i. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Для забезпечення нижнього положення комплексу розроблено алгоритм керування приводом (рис. 3). У якості способу керування частотою обертання двигунів запропоновано широтно-імпульсну модуляцію, що дозволить плавно змінювати швидкість двигунів. Керуючим сигналом системи являється положення комплексу $\Delta \psi$, яке для нижнього положення приймає мінімальне значення:

$$|\Delta \psi_i| < \psi_{min}. \quad (5)$$

Процес керування проходить в безперервному циклі з реєстрацією кількості кроків n довжиною Δl і положення комплексу ϕ, ψ, θ . При виконанні умови (5) масштабі модуляції повинні забезпечувати однакову частоту обертання двигунів. При не виконанні умови (5) діагностичний комплекс в результаті з'їзду з нижнього положення відхиляється від верхньої проекції осі трубопроводу, що не дозволить використати залежності (4) для побудови його профілю. При з'їзді з нижньої точки трубопроводу ліворуч (праворуч) умова (5) не виконується, при цьому драйвер отримує команду на гальмування правого (лівого) двигуна, що призводить до повернення комплексу у нижню точку перетину трубопроводу.

В багатьох випадках утримати комплекс при діагностуванні в нижньому положенні не представляється можливим з причини наявності перешкод різного походження. При цьому мехатронний діагностичний комплекс змушений рухатись по складній траєкторії відмінній від осі трубопроводу (рис. 4).

Визначимо положення точок осі трубопроводу по координатах траєкторії руху мехатронного комплексу x_n, y_n, z_n . Перехід між системами координат $[X'; Y'; Z'] \rightarrow [X, Y, Z]$ можливо здійснити за допомогою системи залежностей, яка враховує поступове переміщення і обертання:

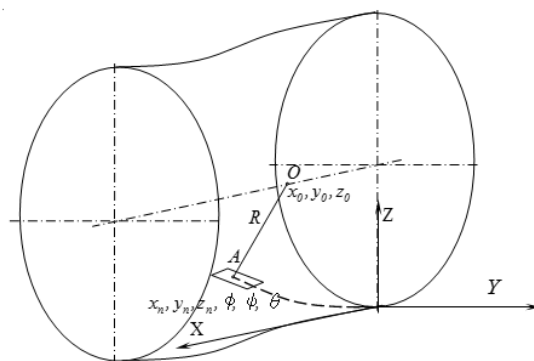


Рисунок 4 – Схема визначення координат осі трубопроводу по положенню комплексу

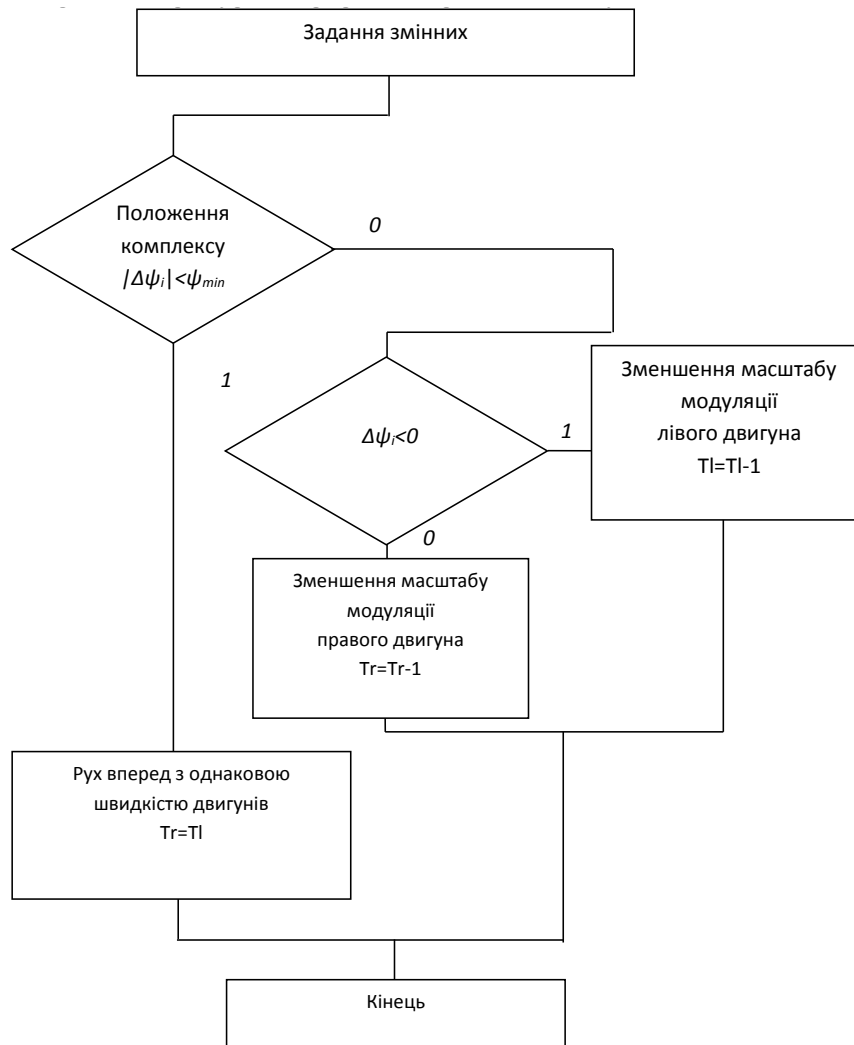


Рисунок 3 – Фрагмент алгоритму роботи програми мехатронного комплексу

Сумарний кут повороту, який визначає положення перпендикуляру AO до площадки комплексу відносно осі OZ :

$$\vec{\gamma} = \vec{\psi} + \vec{\theta}, \quad (6)$$

При чому напрям даного вектора γ співпадає з віссю трубопроводу. Виходячи з вище сказаного координати осі трубопроводу визначаються з виразу :

$$\begin{cases} x_0 = x_n; \\ y_0 = y_n - R \sin \gamma_n; \\ z_0 = z_n + R \cos \gamma_n. \end{cases} \quad (7)$$

Таким чином при будь-якому положенні комплексу за умови паралельності його корпусу дотичній площині до поверхні контакту можливо отримати координати осі профілю трубопроводу. Слід відзначити, що при поворотах і зміні по висоті послідовність отриманих точок буде змішана.

В якості бази діагностичного комплексу, на якій змонтовано датчики положення і відстані, використано жорстке двохколісне шасі з неповоротними колесами (рис. 5). Вага комплексу складає близько 1,7 кг. Для перевірки отриманих залежностей використано прямолінійну ділянку труби діаметром 0,5 мм.

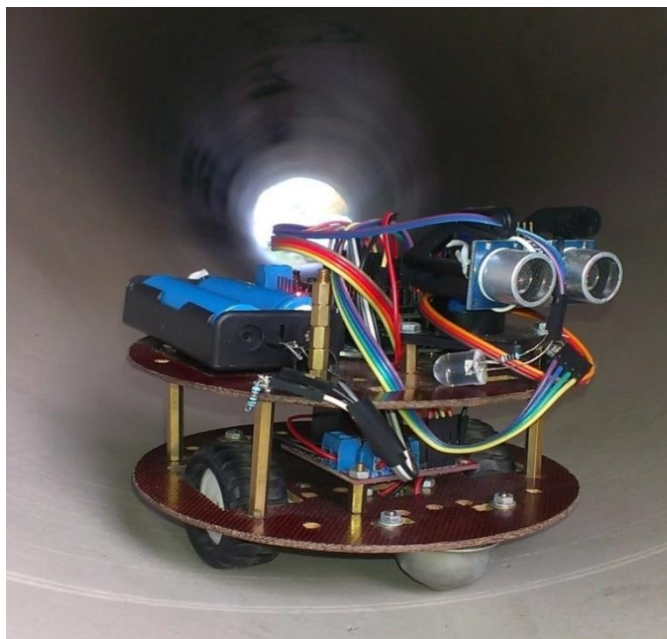


Рисунок 5 – Зовнішній вигляд шасі мехатронного комплексу для діагностування трубопроводу

Опитування датчиків положення MPU-6050 і положення YL-63 при русі мехатронного комплексу проводилось з різною частотою, яка відповідає 1, 6 і 12 значень за один оберт колеса, що зумовлено конструкцією останнього. При діаметрі колеса 0,042 м крок руху Δ складає 0,011 м. Дослідження проводились на трубі з внутрішнім діаметром 0,5 м з точністю виготовлення по ISO 2531, яка складає для кривизни 0,125% і 1% для овальності..

Фрагмент масиву даних на початку руху комплексу представлено у табл. 1

Таблиця 1 Данні датчика положення MPU-6050

Крок	ϕ	θ	ϕ
1	-0,01	0,00	-0,60
2	-0,03	0,02	-0,61
3	-0,06	0,04	-0,61
-	-	-	-
77	-0,61	-0,31	0,42
78	-0,59	-0,31	0,44

Дані, отримані з датчиків положення записуються, у масив $[\phi, \psi, \theta]$, після чого, використовуючи залежності (2), трансформуються у координати траєкторії руху комплексу $[x_n, y_n, z_n]$ рис. 6. На даному етапі можливо відмітити кривизну залежності поздовжньої координати x_n від кроків n , що пов'язано з проковзуванням коліс комплексу при підйомі. Збільшення швидкості комплексу до 0,05 м/с збільшує навантаження на привод на підйомі і спуску, і погіршує точність отриманих значень. Більшість дослідів проведена на швидкості 0,01 м/с.

Координати осі трубопроводу знайдені за залежністю (7) представлено на рис. 7, а, б. З отриманих результатів можливо зробити висновок про точність запропонованого способу вимірювання положення осі, яка складає для даного випадку до 0,004 м в горизонтальній площині (рис. 7, а) і 0,0045 м в вертикальній площині. Збільшення точності вимірювання можливе за рахунок використання високоточних одометрів, наприклад оптичних, що позбавлені ефекту проковзування контактуючих поверхней ролика і труби. Аналіз графіків свідчить про вплив на точність отриманих даних при зміщенні комплексу від нижньої точки трубопроводу, особливо при визначенні вертикальної координати.

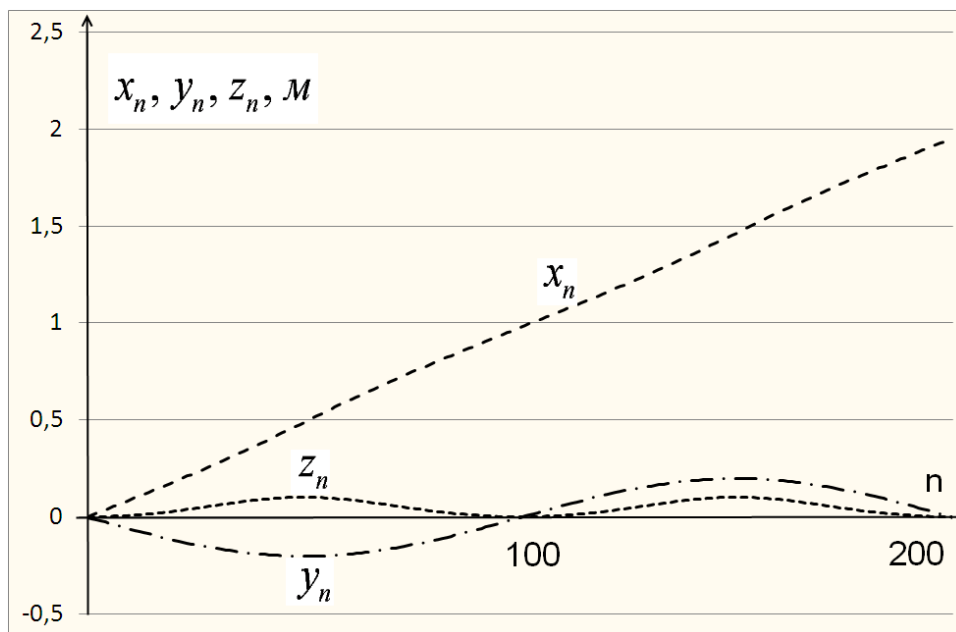


Рисунок 6 – Графік зміни координат руху мехатронного комплексу для кроку Δl 0,011 м

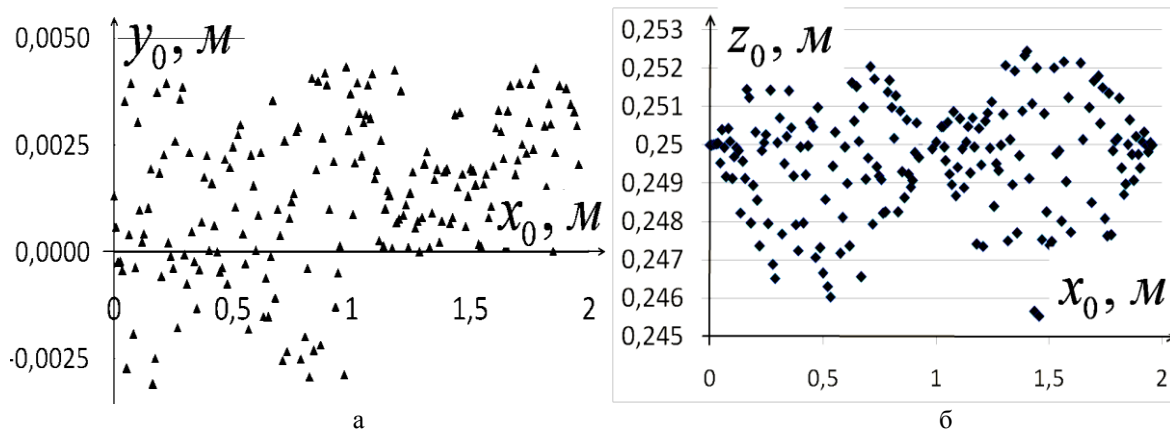


Рисунок 7 – Графіки зміни координат осі трубопроводу по довжині трубопроводу

Для оцінки впливу кроку діагностичного комплексу на точність вимірювання проводились при різних значення кута повороту колеса (2π , π , $\pi/6$), що відповідає кроку (0.011, 0.066, 0.132 м). При вказаних значення кроку відхилення склали в межах 0,004м, 0,007м і 0,01м, що свідчить про погіршення точності з збільшенням кроку руху комплексу.

Отримані данні дозволяють побудувати трьохвимірні геометричні моделі (рис. 8). трубопроводів, які є необхідним етапом при розрахунку напружень чисельними і аналітичними методами.

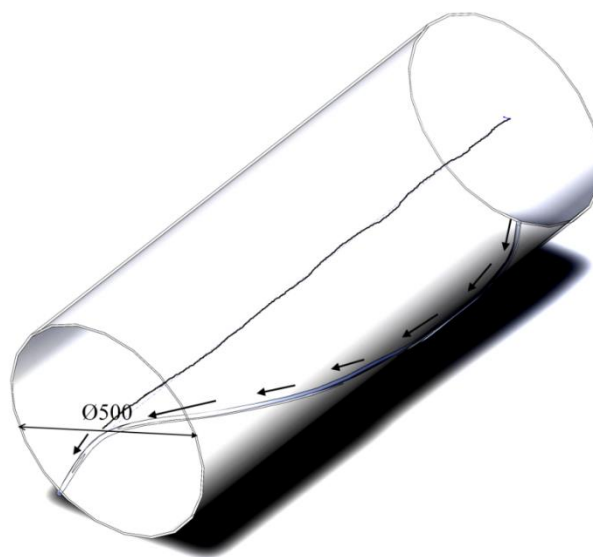


Рисунок 8 – Траєкторія руху діагностичного комплексу і положення осі ділянки трубопроводу за результатами досліджень

Висновки

У статті запропоновано використання мобільного комплексу для діагностування стану трубопроводу, що забезпечить проведення досліджень в складних умовах з мінімальними витратами. Розглянуто випадок просторового руху діагностичного комплексу в нижній частині трубопроводу з врахуванням можливого з'їзду з нижньої точки трубопроводу у випадку виникнення перешкод. Запропоновано залежності, які визначають по кутам Ейлера координати траєкторії руху комплексу і осі трубопроводу.

Використання отриманих даних дозволяє перевірити технологічні параметри магістрального трубопроводу на відповідність будівельній документації з визначенням локальних зміщень.

Порівнюючи данні про проектне положення і отримані в результаті діагностування, можливо визначити дійсне положення трубопроводу і уточнені дані про його напруженодеформований стан з визначенням виду дефекту.

В подальшому розробленій діагностичний комплекс можливо використовувати для дослідження перетину трубопроводів з метою встановлення ум'ятин, гофрів і неякісних стиків труб обладнавши датчиком відстані (лідаром).

Список використаних джерел

1. Koshkarev, A., Burkov, V. (1998). *Neoinformatyka. Tolkovanye osnovnikh terminov*. M.: HYS-Assotsyatsiya, 213s..
2. Ysyu, Kh., Ynouz, Kh., Symoiama Y. (1988). *Mekhatronyka*. M.: Myr, 318 s.
3. Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., & Scaramuzza, D. (2011). *Introduction to autonomous mobile robots*. MIT press.
4. Bares, J. E., & Wettergreen, D. S. (1999). Dante II: Technical description, results, and lessons learned. *The International Journal of Robotics Research*, 18(7), 621-649.
5. Durrant-Whyte, H., Majumder, S., Thrun, S., De Battista, M., & Scheduling, S. (2003). A bayesian algorithm for simultaneous localisation and map building. In *Robotics Research* (pp. 49-60). Springer Berlin Heidelberg.
6. Parcheta, C. E., Pavlov, C. A., Wiltsie, N., Carpenter, K. C., Nash, J., Parness, A., & Mitchell, K. L. (2016). A robotic approach to mapping post-eruptive volcanic fissure conduits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 320, 19-28.
7. Zaichenko, S., Shalenko, V., Shevchuk, N., & Vapnichna, V. (2017). Development of a geomechatronic complex for the geotechnical monitoring of the contour of a mine working. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(9 (87)), 19-25.
8. Marushchak, P. O., & Konovalenko, I. V. (2010). Izmereniye deformatsii materialov putem analiza tsifrovyykh izobrazheniy poverkhnosti. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 76(6). 55-61.

9. Mitrokhin, M. Yu., Spirin, V. A., & Aleksandrov, V. A. (2008). Vnutritrubnaya diagnostika trudnodostupnykh uchastkov lineynoy chasti MG. *Gazovaya promyshlennost*. (6). 72-74.
10. Egorov, I. N., & Kadkhim, D. A. (2011). Primeneniye mobilnykh robotov pri vnutritrubnoy diagnostike truboprovodov s peremennym poperechnym secheniyem. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Neftegazovoye delo*. (3). 73-85.
11. Golubkin, I. A., & Shcherbatov, I. A. (2014). Sistema upravleniya mobilnym kolesnym robotom dlya vnutritrubnoy inspektsii gazoprovodov. *Informatika i sistemy upravleniya*. (4). 129-140.
12. Voronchikhin, S. Yu., Samokrutov, A. A., & Sedelev, Yu. A. (2016). Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya tekhnologicheskikh truboprovodov kompressornykh stantsiy PAO «Gazprom» s primeneniyyem robotizirovannykh skanerov. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Vesti gazovoy nauki*. (3). 120-130.
13. Liu, J., Zhong, L., Wickramasuriya, J., & Vasudevan, V. (2009). uWave: Accelerometer-based personalized gesture recognition and its applications. *Pervasive and Mobile Computing*, 5(6), 657-675.
14. Jang, I. J., & Park, W. B. (2003, October). Signal processing of the accelerometer for gesture awareness on handheld devices. In *Robot and Human Interactive Communication, 2003. Proceedings. ROMAN 2003. The 12th IEEE International Workshop on* (pp. 139-144). IEEE.
15. Kozlov, A., Sazonov, I., Vavilova, N., & Parusnikov, N. (2013). Calibration of an inertial measurement unit on a low-grade turntable with consideration of spatial offsets of accelerometer proof masses. *Proc. ICINS*, 126-129.

S. Zaichenko, doctor of technical Sciences, Conf.Assoc.Prof., **ORCID** 0000-0002-8446-5408
S. Shevchuk, doctor of technical Sciences, Professor, **ORCID** 0000-0002-7517-0501
A. Danilin, Cand.Sc.(Eng.), Conf.Assoc.Prof., **ORCID** 0000-0003-3207-1156
V. Pobihaylo, Cand.Sc.(Eng.), Conf.Assoc.Prof., **ORCID** 0000-0003-2673-7329
N. Zhukov, Cand.Sc.(Eng.), Conf.Assoc.Prof., **ORCID** 0000-0003-2254-1089
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

DIAGNOSTICS OF MAIN PIPELINES FOR THE MECHATRONIC COMPLEX

While receiving information under dangerous conditions, at which human presence is difficult or impossible, widely spread are the mobile robotic complexes. Particularly important information to determine the stressed-strained state of the underground workings is data on their geometry. Establishing the values of convergence of underground workings will make it possible to locate dangerous areas and decrease the number of emergency cases. In order to design an experimental sample, we developed basic approaches to create geomechatronic complexes, which define the main tasks, the scope of application, and quality criteria. The motion of the complex along an underground working is accompanied by a spatial change in the position of a distance sensor, which must be considered when establishing the actual values of the profile of a working. As parameters that take into account a change in the position, we proposed six components, three displacements and three Euler angles, which are registered by a microelectronic gyroscope that registers the distance traveled. The obtained analytical dependencies can be used in the study of the geometry of geotechnical structures.

Key words: pipeline, position, coordinate system, Euler angles, trajectory length, mechatronic complex.

References

1. Koshkarev, A., Burkov, V. (1998). *Heoynformatyka. Tolkovanye osnovnykh terminov*. M.: HYS-Assotsyatsiya, 213s.
2. Ysyy, Kh., Ynoue, Kh., Symoiama Y. (1988). *Mekhatronyka*. M.: Myr, 318 s.
3. Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., & Scaramuzza, D. (2011). *Introduction to autonomous mobile robots*. MIT press.
4. Bares, J. E., & Wettergreen, D. S. (1999). Dante II: Technical description, results, and lessons learned. *The International Journal of Robotics Research*, 18(7), 621-649.
5. Durrant-Whyte, H., Majumder, S., Thrun, S., De Battista, M., & Scheduling, S. (2003). A bayesian algorithm for simultaneous localisation and map building. In *Robotics Research* (pp. 49-60). Springer Berlin Heidelberg.

6. Parcheta, C. E., Pavlov, C. A., Wiltsie, N., Carpenter, K. C., Nash, J., Parness, A., & Mitchell, K. L. (2016). A robotic approach to mapping post-eruptive volcanic fissure conduits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 320, 19-28.
7. Zaichenko, S., Shalenko, V., Shevchuk, N., & Vapnichna, V. (2017). Development of a geomechatronic complex for the geotechnical monitoring of the contour of a mine working. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(9 (87)), 19-25.
8. Marushchak, P. O., & Konovalenko, I. V. (2010). Izmereniye deformatsii materialov putem analiza tsifrovoykh izobrazheniy poverkhnosti. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 76(6). 55-61.
9. Mitrokhin, M. Yu., Spirin, V. A., & Aleksandrov, V. A. (2008). Vnutritrubnaya diagnostika trudnodostupnykh uchastkov lineynoy chasti MG. *Gazovaya promyshlennost*. (6). 72-74.
10. Egorov, I. N., & Kadkhim, D. A. (2011). Primeneniye mobilnykh robotov pri vnutritrubnoy diagnostike truboprovodov s peremennym poperechnym secheniyem. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Neftegazovoye delo*. (3). 73-85.
11. Golubkin, I. A., & Shcherbatov, I. A. (2014). Sistema upravleniya mobilnym kolesnym robotom dlya vnutritrubnoy inspektsii gazoprovodov. *Informatika i sistemy upravleniya*. (4). 129-140.
12. Voronchikhin, S. Yu., Samokrutov, A. A., & Sedelev, Yu. A. (2016). Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya tekhnologicheskikh truboprovodov kompressornykh stantsiy PAO «Gazprom» s primeneniyyem robotizirovannykh skanerov. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Vesti gazovoy nauki*. (3). 120-130.
13. Liu, J., Zhong, L., Wickramasuriya, J., & Vasudevan, V. (2009). uWave: Accelerometer-based personalized gesture recognition and its applications. *Pervasive and Mobile Computing*, 5(6), 657-675.
14. Jang, I. J., & Park, W. B. (2003, October). Signal processing of the accelerometer for gesture awareness on handheld devices. In *Robot and Human Interactive Communication, 2003. Proceedings. ROMAN 2003. The 12th IEEE International Workshop on* (pp. 139-144). IEEE.
15. Kozlov, A., Sazonov, I., Vavilova, N., & Parusnikov, N. (2013). Calibration of an inertial measurement unit on a low-grade turntable with consideration of spatial offsets of accelerometer proof masses. *Proc. ICINS*, 126-129.

Надійшла 24.09.2018

Received 24.09.2018

УДК 621.313.821

В.В. Чумак, канд.тех.наук, доц. **ORCID** 0000-0001-8401-7931

О.В. Вишневський, аспірант **ORCID** 0000-0001-7814-9030

А.С. Стулішенко, магістр **ORCID** 0000-0001-9982-9246

Є.С. Ігнатюк, магістр **ORCID** 0000-0002-4675-8728

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

УДОСКОНАЛЕНА ВИСОКОЧАСТОТНА МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Хвильові процеси в електричних машинах представляють собою один з найменш вивчених режимів їх роботи, але ці процеси суттєво впливають на роботу міжвиткової і особливо корпусної ізоляції.

В цій роботі представлена точна високочастотна модель асинхронного двигуна. Запропонована модель дозволяє аналізувати обидва явища, як високочастотні аж до декількох мегагерц, завдяки статичному живленню, так і низькочастотних явищ, які зазвичай аналізуються за допомогою кількісних характеристик двигуна.

Представлено порівняння експериментальних і змодельованих частотних характеристик для двигуна 4А80А4.

Ключові слова: високочастотні явища, ємнісний ефект, міжвиткова ємність, вихрові струми, імпеданс, резонанс струмів.

Вступ. Електроприводи з ШІМ (широтно-імпульсна модуляція), статичні перетворювачі потужності і асинхронні двигуни мають широке застосування в різних галузях промисловості завдяки