

ГОРЖИЙ ІГОР

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
e-mail: igor.vnz2016@gmail.com

ПИСАРЕЦЬ АННА

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
<https://orcid.org/0000-0002-4474-1834>
e-mail: anna.v@ukr.net

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ТАХОМЕТРИЧНИХ ЛІЧИЛЬНИКІВ ГАЗУ

Вирішення проблем, пов'язаних з точним обліком природного газу, потребує комплексного підходу, який охоплює розробку та впровадження нових технологій, а також вдосконалення існуючих приладів обліку.

Для комерційного обліку газу широкого розповсюдження набули прилади, що базуються на різних методах вимірювання [1]. При цьому особливе місце посідають тахометричні лічильники, а саме: мембранні, роторні та турбінні.

Основну увагу у роботі приділено розробці методики розрахунку моменту інерції чутливого елемента роторного лічильника газу, що є особливо важливим етапом проектування таких приладів.

Запропоновано алгоритм визначення моменту інерції вісімкоподібного ротора, що передбачає умовний його поділ на окремі геометричні складові: вал, голівку зубця та центральну частину. Авторами отримано математичні вирази для моментів інерції кожної складової та ротора в цілому.

Перспективою подальшої роботи є дослідження впливу геометричних параметрів чутливого елемента на метрологічні характеристики роторного лічильника газу.

Ключові слова: газ, тахометричний лічильник газу, роторний лічильник газу, проектування, чутливий елемент, момент інерції.

HORZHYI IGOR, PYSARETS ANNA

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

TACHOMETRIC GAS METERS OPERATION FEATURES

Solving problems related to accurate metering of natural gas requires a comprehensive approach that includes the development and implementation of new technologies, as well as the improvement of existing metering instruments.

For commercial gas metering, instruments based on various measurement methods are widely used. In this case, a special place is occupied by tachometric meters, namely: membrane, rotary and turbine. The features of using each meters type depending on operating conditions are considered.

High accuracy, a wide range of measured flow rates and relatively low cost are characteristic features of rotary meters, which contributes to their use in both residential and industrial sectors.

The aim of the work is to develop a method for calculating the sensitive element moment of inertia of a rotary gas meter. This is one of the especially important stages in the design of such instruments.

The sensitive element moment of inertia significantly affects the dynamic characteristics performances of the instrument, sensitivity and starting torque. Therefore, determining the optimal relationship between the sensitive element geometric parameters and other measuring chamber characteristics is an extremely important issue when designing rotary gas meter.

The authors proposed an algorithm for determining the moment of inertia of a figure-eight-shaped rotor, which assumes a conditional rotor division into separate geometric components such as shaft, tooth head and central part. This made it possible to determine the sensitive element moment of inertia as the sum of the moments of inertia of the individual components relative to the rotor rotation axis. Mathematical expressions for the moments of inertia of each component and the rotor as a whole were substantiated.

Based on the developed methodology, an assessment of the inertia moment for a figure-eight-shaped rotor was carried out. The influence of changing the rotor wall thickness on the moment of inertia was investigated with other sensitive element geometric characteristics remaining unchanged.

A prospect for further work is to study the influence of the sensitive element geometric parameters on the metrological performances of the rotary gas meter.

Keywords: gas, tachometric gas meters, rotary gas meter, design, sensitive element, moment of inertia.

Постановка проблеми

У сучасних умовах зростаючого попиту на енергоресурси та підвищення вимог до їх раціонального використання, проблеми, пов'язані з точним обліком природного газу, набувають особливої актуальності. Вирішення цих проблем потребує комплексного підходу, який включає як розробку та впровадження нових технологій, так і вдосконалення існуючих приладів обліку газу.

Для комерційного обліку газу широкого розповсюдження набули прилади, що базуються на методах змінного перепаду тиску (з використанням звукувальних пристроїв), вихровому, тахометричному (мембранні, роторні, турбінні) та акустичному [1].

При цьому особливе місце посідають тахометричні лічильники. Тахометричний метод вимірювання витрати передбачає наявність рухомого чутливого елемента (ЧЕ), що здійснює обертальний рух, у потоку вимірюваного середовища. При цьому частота обертання ЧЕ пропорційна об'ємній витраті.

Мембранні лічильники застосовуються переважно у побутових споживачів для обліку газу за надлишкового тиску до 0,1 МПа з витратою не більше 160 м³/год [1 – 3]. Основними перевагами таких

приладів є простота та надійність конструкції, низька вартість, широкий динамічний діапазон вимірювань, нечутливість до забрудненості газу.

Турбінні лічильники використовуються у якості приладів обліку на промислових підприємствах, газорозподільних станціях або об'єктах енергетики за номінальних витрат більше $65 \text{ м}^3/\text{год}$ [4]. До основних переваг таких лічильників можна віднести надійність конструкції та робочий надлишковий тиск до 10 МПа, проте суттєвим недоліком є порівняно вузький динамічний діапазон вимірювання [4].

Роторні лічильники зустрічаються як у побутових споживачів, так і в промисловому секторі, оскільки забезпечують високу точність вимірювань, мають широкий діапазон вимірюваних витрат та відносно невисоку вартість. Їх основними недоліками є необхідність високого ступеня очищення вимірюваного газу, а також значні габарити й вага для лічильників великих типорозмірів [5, 6].

ЧЕ роторного лічильника, що розглядається, є пара вісімкоподібних роторів. Принцип дії такого приладу окреслюється наступним. При проходженні газу через лічильник під дією різниці тиску на вході та виході з вимірювальної камери відбувається обертання роторів. Об'єм газу, витіснений за півоберта одного ротора, дорівнює об'єму, обмеженому внутрішньою поверхнею корпусу та бічною поверхнею ротора, що займає вертикальне становище. За повний оберт роторів витісняються чотири такі об'єми [7].

Поверхні роторів в процесі обертання безпосереднього зіткнення не мають, і між ними повинен бути створений зазор постійної величини. Це досягається встановленням на обох кінцях роторів по парі зубчастих коліс, відповідним чином заклинені на валах роторів.

Параметром, що визначає метрологічні характеристики первинного перетворювача витрати, є втрата тиску, що характеризує гідравлічний опір приладу у діапазоні вимірюваних витрат.

Втрата тиску на роторному перетворювачі витрат визначається як сума наступних складових: втрати енергії потоку за витрати, що відповідає порогу чутливості, обумовлені сумарним моментом сил механічного тертя та сил інерції; втрати, обумовлені моментом сил в'язкого тертя; втрати кінетичної енергії потоку, обумовлені моментом сил опору при обтіканні роторів, що обертаються.

Наведені складові залежать безпосередньо від геометричних особливостей ЧЕ, які зокрема, обумовлюють витоки в зазорі між рухомим елементом та внутрішньою поверхнею вимірювальної камери.

При цьому витоки змінюються фізико-хімічними властивостями вимірюваного середовища та його температурою, а також періодичністю та режимом роботи приладу.

Аналіз досліджень та публікацій

Інформація про особливості роботи тахометричних лічильників газу з вісімкоподібними роторами містить відомості про принцип дії таких приладів, їх метрологічні характеристики, особливості конструкції [6, 8 – 14] математичний опис кривої, що описує поверхню ротора [7], кінематичні та силові залежності перетворювача витрати.

Питанням, пов'язаним з визначенням моменту інерції ротора, у джерелах уваги не приділено.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є дослідження особливостей функціонування тахометричних лічильників газу з вісімкоподібними роторами, а саме побудова алгоритму визначення моменту інерції чутливого елемента.

Алгоритм визначення моменту інерції ротора

Вісімкоподібний ротор має профіль складної форми, тому для визначення загального моменту інерції умовно поділимо ротор на окремі складові та знайдемо момент інерції кожної з них відносно вісі обертання ротора [15, 16]:

$$I = I_B + 2I_\Gamma + I_C, \quad (1)$$

де I_B – момент інерції вала ротора, I_Γ – момент інерції голівки зубця ротора, I_C – момент інерції центральної частини ротора.

Момент інерції валу ротора відносно осі його обертання можна знайти за виразом [17]

$$I_B = \frac{1}{2} m_B r_B^2, \quad (2)$$

де r_B – радіус валу; m_B – маса валу.

З урахуванням маси, що визначається добутком об'єму та густини матеріалу, вираз (2) набуває виду

$$I_B = \frac{1}{2} \rho_B \pi s_B r_B^4, \quad (3)$$

де ρ_B – густина матеріалу валу; s_B – осьова довжина валу.

Голівку зубця ротора можна уявити у вигляді пустотілого сегменту циліндра із товщиною стінки h .

Визначення моменту інерції цієї частини ротора здійснюється в два етапи:

1) момент інерції відносно вісі, паралельної вісі обертання, яка проходить через цент мас циліндру (I_0), що описує профіль зубця ротора;

2) момент інерції відносно вісі обертання ротора за теоремою Штейнера [17]:

$$I_\Gamma = I_0 + m_\Gamma a^2, \quad (4)$$

де m_Γ – маса голівки зубця ротора; a – відстань від центра обертання ротора до центра голівки його зубця.

Момент інерції сегмента циліндра (I_C) пропорційний відношенню площ основ повного циліндру та сегменту. Тобто момент інерції сегменту суцільного циліндра буде мати вигляд

$$I_C = I_\Pi \frac{\gamma - \sin \gamma}{2\pi} = \frac{1}{4} \rho_P (\gamma - \sin \gamma) s_P r^4, \quad (5)$$

де I_Π – момент інерції суцільного циліндру; s_P – осьова довжина ротора; ρ_P – густина матеріалу ротора; γ –

кутова величина сегменту основи циліндра у радіанах; r – радіус голівки зубця.

З урахуванням товщини стінки (h) цієї частини ротора отримуємо:

$$I_0 = \frac{1}{4} \rho_P S_P (\gamma - \sin \gamma) (r^4 - (r - h)^4), \quad (6)$$

Для визначення моменту інерції відносно вісі обертання необхідно розрахувати загальну масу голівки зубця ротора. Маса суцільного сегменту:

$$m_C = \rho_P \pi r^2 S_P \frac{\gamma - \sin \gamma}{2\pi} = \frac{1}{2} \rho_P (\gamma - \sin \gamma) S_P r^2. \quad (7)$$

Тобто маса голівки зубця ротора визначається як різниця мас суцільних циліндрів радіусами r та $(r - h)$ відповідно

$$m_\Gamma = \frac{1}{2} \rho_P (\gamma - \sin \gamma) S_P (r^2 - (r - h)^2). \quad (8)$$

З урахуванням (6) та (8) вираз (4) набуває виду

$$I_\Gamma = \frac{1}{2} \rho_P S_P (\gamma - \sin \gamma) (r^2 - (r - h)^2) \left(\frac{1}{2} (r^2 + (r - h)^2) + a^2 \right). \quad (9)$$

Крім того, на голівці зубця ротора присутні “гребені”, які можна уявити у вигляді відсутності двох фрагментів-паралелепіпедів. Для моменту інерції фрагменту ($I_{\Phi P_0}$) відносно вісі, яка паралельна вісі обертання та проходить його центр мас, отримуємо

$$I_{\Phi P_0} = \frac{1}{12} m_{\Phi P} (h_{\Gamma P}^2 + c^2), \quad (10)$$

де $h_{\Gamma P}$ – висота гребеню, $m_{\Phi P}$ – маса фрагменту, c – ширина канавки перед гребенем.

Для маси фрагменту можна записати

$$m_{\Phi P} = \rho_P h_{\Gamma P} S_P c. \quad (11)$$

У такому випадку вираз (10) матиме вигляд

$$I_{\Phi P_0} = \frac{1}{12} \rho_P h_{\Gamma P} S_P c (h_{\Gamma P}^2 + c^2), \quad (12)$$

За теоремою Штейнера спочатку знайдемо момент інерції фрагменту відносно вісі, яка проходить через центр голівки зубця ротора, а потім – відносно вісі обертання ротора

$$I_{\Phi P_0} = \rho_P h_{\Gamma P} S_P c \left(\frac{1}{12} (h_{\Gamma P}^2 + c^2) + a^2 + r^2 \right). \quad (13)$$

З урахуванням (13) вираз (9) набуває виду

$$I_\Gamma = \rho_P S_P \left(\frac{1}{2} (\gamma - \sin \gamma) (r^2 - (r - h)^2) \left(\frac{1}{2} (r^2 + (r - h)^2) + a^2 \right) - h_{\Gamma P} c \left(\frac{1}{6} (h_{\Gamma P}^2 + c^2) + 2a^2 + 2r^2 \right) \right). \quad (14)$$

Визначимо момент інерції центральної частини ротора. Її можна уявити у вигляді паралелепіпеда з подальшим відкиданням деяких частин. Довжини сторін основи паралелепіпеда будуть:

$$l_1 = 2r \sin \left(\frac{\gamma}{2} \right),$$

$$l_2 = 2a + 2r \cos \left(\frac{\gamma}{2} \right),$$

де l_1 – хорда, яка обмежує сегмент основи циліндра; l_2 – подвоєна відстань від центру обертання ротора до хорди, яка обрізає сегмент циліндра.

У такому разі для моменту інерції паралелепіпеда відносно вісі обертання ротора можна записати

$$I_{II} = \frac{1}{3} \rho_P S_P r \sin \left(\frac{\gamma}{2} \right) \left(a + r \cos \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right) \times \left(\left(2r \sin \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right)^2 + \left(2a + 2r \cos \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right)^2 \right). \quad (15)$$

На поверхні центральної частини ротора є вигин радіусом голівки зубця ротора, що можна представити у вигляді відсутності сегменту циліндра, який обмежує хорда l_2 . Площу цього сегменту можна описати виразом $\frac{(\pi r^2 - l_2^2)}{4}$, а момент інерції відносно вісі, що проходить через центр основи циліндра:

$$I_{C_0} = \frac{1}{8} \pi r^4 \rho_P S_P \left(1 - \frac{(2a + 2r \cos(\frac{\gamma}{2}))^2}{\pi r^2} \right). \quad (16)$$

Визначимо момент інерції цього сегменту відносно вісі обертання ротора I_C за теоремою Штейнера (відстань між осями при цьому буде дорівнювати радіусу центроїди ротора R , що має зв'язок з геометричними параметрами ротора)

$$I_C = \frac{1}{4} \pi r^2 \rho_P S_P \left(1 - \frac{(2a + 2r \cos(\frac{\gamma}{2}))^2}{\pi r^2} \right) \times \left(\frac{1}{2} r^2 + R^2 \right), \quad (17)$$

де $R^2 + a^2 - 2aR \cos 45^\circ = r^2$ [7].

З урахуванням отвору в центральній частині ротора для встановлення вала отримуємо

$$I_{II} = \rho_P S_P \left(\frac{1}{3} r \sin \left(\frac{\gamma}{2} \right) \left(a + r \cos \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right) \left(\left(2r \sin \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right)^2 + \left(2a + 2r \cos \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right)^2 \right) - \frac{1}{2} \pi r_B^4 - \frac{1}{2} \pi r^2 \left(1 - \frac{(2a + 2r \cos(\frac{\gamma}{2}))^2}{\pi r^2} \right) \times \left(\frac{1}{2} r^2 + R^2 \right) \right). \quad (18)$$

За отриманими виразами для складових моменту інерції вісімкоподібного ротора (3), (14) та (18) остаточно отримуємо

$$I = \frac{1}{2} \rho_B \pi s_B r_B^4 + \rho_P s_P ((\gamma - \sin \gamma)(r^2 - (r-h)^2) \left(\frac{1}{2}(r^2 + (r-h)^2) + a^2 \right) - h_{ГР} c \left(\frac{1}{3}(h_{ГР}^2 + c^2) + 4a^2 + 4r^2 \right) + \frac{1}{3} r \sin \left(\frac{\gamma}{2} \right) \left(a + r \cos \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right) \times \left(\left(2r \sin \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right)^2 + \left(2a + 2r \cos \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right)^2 \right) - \frac{1}{2} \pi r_B^4 - \frac{1}{2} \pi r^2 \left(1 - \frac{(2a+2r \cos(\frac{\gamma}{2}))^2}{\pi r^2} \right) \times \left(\frac{1}{2} r^2 + R^2 \right).$$

Розрахунок моменту інерції ЧЕ є надзвичайно важливим етапом проектування роторних лічильників газу, оскільки саме ця величина окреслює динамічні характеристики приладу та впливає на чутливість й пусковий момент.

Таким чином, при проектуванні роторного лічильника газу важливо знайти оптимальні співвідношення між геометричними параметрами ЧЕ та іншими геометричними характеристиками вимірювальної камери.

Висновки та перспективи подальшої роботи

Роторні лічильники газу є важливим інструментом для точного обліку споживання природного газу, що характеризується високою точністю вимірювань, широким діапазоном вимірюваних витрат, відносно невисокою вартістю, а також надійністю та простотою експлуатації.

При проектуванні таких приладів необхідно враховувати низку факторів, зокрема наявність зазорів між роторами, чутливість до механічних домішок у газі та можливість виникнення резонансних явищ.

Метрологічні характеристики досліджуваних приладів визначаються витокami в зазорі між роторами та внутрішньою поверхнею вимірювальної камери, що залежать від форми чутливого елемента.

Момент інерції є важливою характеристикою ротора, що дозволяє оцінити вплив його форми на динамічні характеристики приладу. У роботі наведена методика розрахунку моменту інерції чутливого елемента, що враховує складну геометрію його поверхні.

За створеною методикою оцінено момент інерції вісімкоподібного ротора та досліджено вплив на нього зміни товщини стінки ротора за незмінних значень інших геометричних характеристик чутливого елемента.

Перспективою подальшої роботи є дослідження впливу геометричних параметрів чутливого елемента на метрологічні характеристики роторного лічильника газу, зокрема перепад тиску.

Література

1. Писарець, А.В. Автоматизований комплекс вимірювання об'єму природного газу / Писарець А. В., Горжий І. В. // Вісник КПІ. Серія Приладобудування. – 2023. – Вип. 65(1). – С. 117-122. DOI: 10.20535/1970.65(1).2023.283466
2. РМУ 037-2015 Рекомендація. Метрологія. Вузли обліку природного газу з лічильниками та 84орректорами. Метод та основні принципи вимірювань, характеристики та загальні вимоги.
3. Лічильники газу мембранні RS. Настанова щодо експлуатації. Режим доступу: https://www.samgas.com.ua/sites/default/files/_samgaz_re_red_0_6_3_10-12-2018_14.pdf
4. Лічильники газу турбінні TZ/fluxi. Паспорт. Режим доступу: https://tgp.net.ua/download/passport_tz-fluxi_ukr.pdf
5. Delta Commercial & Industrial Rotary Meter. [Online]. Available: <https://dresserutility.com/wp-content/uploads/ActarisGasMeasurementDeltaBrochure.pdf>
6. Лічильники газу роторні РГК-Ех. Режим доступу: <https://prylad.com.ua/ru/products/gas-meters/rotary/rgk-eh/>
7. Писарець А. В., Контроль за викидами в атмосферу газових сумішей вимірювальними системами з роторними лічильниками, V Міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених "Екологія. Людина. Суспільство." (13–15 травня 2002 р. Київ, Україна). Збірка тез доповідей. с. 525 – 527.
8. Rotary piston gas meter handbook. [Online]. Available: <https://docuthek.kromschroeder.com/download.php?lang=fr&doc=17875>
9. Industrial Gas Meters For fiscal and non-fiscal measures. Rotary gas meter. [Online]. Available: <https://zennergas.eu/wp-content/uploads/sites/6/2022/01/Rotary-gas-meter.pdf>
10. Rotary gas meters. Режим доступу: <https://www.flowmetergroup.com/product-categorie/rotary-gas-meters/>
11. Fundamental Principles of Rotary Displacement Meters. [Online]. Available: https://afms.org/wp-content/uploads/Principles_of_Rotary.pdf
12. Everything You Need to Know About Rotary Gas Meters. [Online]. Available: <https://norgascontrols.com/gas-meters/everything-you-need-to-know-about-rotary-gas-meters/>

13. Pellegrini, M., Gentilini, M., Manieri, R., Saccani, C., Modrego Neila, J., Rayana, F. B., Polak, D., Dudek, A., Coraggio, F., Morgagni, A., Robino, M., Gaiardo, A., Valt, M., & Testi, M. (2024). D1.1. SoA of measuring devices installed in NG transmission and distribution networks. Zenodo. DOI: 10.5281/zenodo.10814350
14. Яновицький О. К. Метод підвищення точності та надійності роботи ротаційних лічильників газу, Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, № 2, 2019. DOI: 10.31891/2219-9365-2019-64-5
15. Коробко І. В., Писарець А. В. Дослідження рівняння руху первинного перетворювача швидкісних засобів вимірювання витрат енергоносіїв // Вестник НТУУ "КПІ". Серія машиностроение. – 2002. – Вып. 42, Т. 2. – С. 42 – 45.
16. Турбінні перетворювачі витрати енергоносіїв з гідродинамічним врівноважуванням чутливого елементу. Монографія / А. В. Писарець, І. В. Коробко. – К.: "Корнійчук", 2013. – 159 с.
17. Павловський М. А. Теоретична механіка: [підручник] / М. А. Павловський. – К.: Техніка, 2002. – 206 с.

References

1. Pysarets A., Horzhyi I., Automated natural gas volume measurement system // *Bull. Kyiv Polytech. Inst. Ser. Instrum. Mak.*, is. 65(1), pp. 117–122. DOI: 10.20535/1970.65(1).2023.283466
2. RMU 037-2015 Rekomendatsiia. Metrolohiia. Vuzly obliku pryrodnoho hazu z lichylnykamy ta korektoramy. Metod ta osnovni pryntsyry vymiriuvan, kharakterystyky ta zahalni vymohy.
3. Lichylnyky hazu membranni RS. Nastanova shchodo ekspluatatsii. [Online]. Available: https://www.samgas.com.ua/sites/default/files/_samgaz_re_red_0_6_3_10-12-2018_14.pdf
4. Lichylnyky hazu turbinni TZ/fluxi. Pasport. [Online]. Available: https://tgp.net.ua/download/passport_tz-fluxi_ukr.pdf
5. Delta Commercial & Industrial Rotary Meter. [Online]. Available: <https://dresserutility.com/wp-content/uploads/ActarisGasMeasurementDeltaBrochure.pdf>
6. Lichylnyky hazu rotorni PFK-Ex. [Online]. Available: <https://prylad.com.ua/ru/products/gas-meters/rotary/rgk-eh/>
7. Pysarets A. V., Kontrol za vykydamy v atmosferu hazovykh sumishei vymiriuvalnymy systemamy z rotornymy lichylnykamy, V Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh "Ekolohiia. Liudyna. Suspilstvo." (13–15 travnia 2002 r. Kyiv, Ukraine). Zbirka tez dopovidei. pp. 525 – 527.
8. Rotary piston gas meter handbook. [Online]. Available: <https://docuthek.kromschroeder.com/download.php?lang=fr&doc=17875>
9. Industrial Gas Meters For fiscal and non-fiscal measures. Rotary gas meter. [Online]. Available: <https://zennergas.eu/wp-content/uploads/sites/6/2022/01/Rotary-gas-meter.pdf>
10. Rotary gas meters. [Online]. Available: <https://www.flowmetergroup.com/product-categorie/rotary-gas-meters/>
11. Fundamental Principles of Rotary Displacement Meters. [Online]. Available: https://afms.org/wp-content/uploads/Principles_of_Rotary.pdf
12. Everything You Need to Know About Rotary Gas Meters. [Online]. Available: <https://norgascontrols.com/gas-meters/everything-you-need-to-know-about-rotary-gas-meters/>
13. Pellegrini, M., Gentilini, M., Manieri, R., Saccani, C., Modrego Neila, J., Rayana, F. B., Polak, D., Dudek, A., Coraggio, F., Morgagni, A., Robino, M., Gaiardo, A., Valt, M., & Testi, M. (2024). D1.1. SoA of measuring devices installed in NG transmission and distribution networks. Zenodo. DOI: 10.5281/zenodo.10814350
14. Ianovytskyi O. K. Metod pidvyshchennia tochnosti ta nadiynosti roboty rotatsiinykh lichylnykyv hazu // Measuring and computing devices in technological processes, № 2, 2019. DOI: 10.31891/2219-9365-2019-64-5
15. Korobko I. V., Pysarets A. V. Doslidzhennia rivniannia rukhu pervynnoho peretvoriuvacha shvydkisnykh zasobiv vymiriuvannia vytrat enerhonosiiv // Vestnyk NTUU "KPY". Seryia mashynostroenye. – 2002. – No. 42, vol. 2. – pp. 42 – 45.
16. Turbinni peretvoriuvachi vytraty enerhonosiiv z hidrodynamichnym vrvinovazhuvanniam chutlyvoho elementu. Monohrafiia / A. V. Pysarets, I. V. Korobko. – K.: «Korniichuk», 2013.
17. Pavlovskyi M. A. Teoretychna mekhanika: [pidruchnyk] / M. A. Pavlovskyi. – K.: Tekhnika, 2002.