

Висновки. В роботі розглянута задача визначення залежності (незалежності) між параметрами при проведенні непрямих вимірювань, що необхідно для коректного визначення вибіркової дисперсії фізичної величини при непрямому вимірюванні на основі вибірових дисперсій фізичних величин при прямих вимірюваннях. Висновок про вказану залежність робиться за визначенням коефіцієнту кореляції між похибками параметрів, що входять до математичної формули отримання значень функції за непрямого вимірювання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Міщенко І. В. Особливості експериментального визначення коефіцієнту опору повітря руху струменя води з ручного пожежного ствола / І. В. Міщенко, О. М. Кондратенко // Проблеми пожежної безпеки: Зб. наук. пр. НУЦЗ України. – 2016. – Вип. 39. – С. 183–189.
2. Вамболь С. О. Дослідження гідравлічних струменів при створенні системи управління екологічною безпекою об'єктів підвищеного ризику : монографія / С. О. Вамболь, О. М. Кондратенко, І. В. Міщенко, В. Ю. Колосков. – Х.: ФОП Бровін О.В., 2018. – 204 с.
3. Вамболь С. О. Технічна механіка рідини і газу: підручник / С. О. Вамболь, І. В. Міщенко, О. М. Кондратенко. – Х. : НУЦЗУ, 2016. – 300 с.
4. Міщенко І. В. Метрологія та стандартизація: конспект лекцій / І. В. Міщенко, С. О. Вамболь, Т. М. Курська. – Харків : АЦЗУ, 2006. – 136 с.

Науковий консультант: Міщенко І.В., доц. каф. деталей машин та теорії механізмів і машин.

Шарапата Андрій Сергійович, к.т.н., доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Горлов Ярослав Віталійович, студент групи ТП-43, Харківський національний університет імені Василя Назаровича Каразіна, yaroslav.gorlov@gmail.com

РОЗВИТОК БУРИЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ. ЕВОЛЮЦІЯ. СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ.

Історія буріння - це одночасно і хроніка технічних досягнень та літопис боротьби людства за видобуток різноманітних ресурсів.

Історичні праці Конфуція, як зазначається в статті [1-4], вказують на те, що приблизно 600 років до нашої ери з'явилися перші згадування про видобуток соляних розсолів у Китаї (провінція Сичуань). Ще в ті часи була реалізована класика “ударно-канатного” методу буріння, де глибина

свердловин досягала сотень метрів. При цьому використовувалися такі матеріали: бамбук і шкіряні ремені.

У п'ятому віці до нашої ери Геродот [5] описував способи видобутку нафти з колодязів на острові Закінф, що надає нам уявлення про самі ранні форми видобутку рідких копалин.

У першому віці до нашої ери Марк Вітрувій Полліон у книзі “Десять книг про архітектуру” [6] детально описував античні застосунки для пошуку води і пристрої, які можна вважати прототипами найпростішого бурового обладнання.

Абу Райхан аль-Біруні - великий вчений Сходу описував у XI віці методи проходження колодязів і фізичні явища матеріалів, що заклало основи інженерного підходу до надр [7].

Георгій Агрикола у своїй праці “Про горну справу і металургію” у 12 книжках систематизував все, що було відомо про горну справу у Європі: від конструкції воріт до перших бурильних інструментів для розвідки копалин.

Якщо казати про створення розвитку сучасного безперервного буріння, ключовим моментом став патент Роберта Білса [9] (1844 р.) і праці Ебенезера Лайнера [10], які заклали принципи використання “промивочної рідини”. Саме винахід “промивочної рідини” дозволив перейти від переривчастого буріння (з зупинками на чистку желонкою) до безперервного процесу, що підвищило швидкість проходки в рази.

Буріння - це “технологічний ключ” до ресурсів, які б інакше залишилися б недосяжними для людства [11].

Буріння свердловин - це єдиний спосіб дістатися до корисних копалин, що залягають на великих глибинах (кілька кілометрів). На відміну від кар'єрів чи шахт свердловина дозволяє розкривати пласти без переміщення величезних масивів пустої породи. Це набагато дешевше та швидше [12].

Нафта та газ - це паливо для двигуна сучасної економіки. Буріння свердловин забезпечує паливом транспорт промисловість та генерацію електроенергії. Розвиток технологій (наприклад, горизонтальне буріння та гідророзрив пласта) дозволив видобувати газ із раніше “мертвих” сланцевих порід.

Артезіанські свердловини є критично важливими для регіонів з дефіцитом поверхневих вод. Це основа сільського господарства та санітарної безпеки цілих країн.

Порівняно з відкритими розробками (кар'єрами), буріння свердловин має мінімальний “екологічний Слід” на поверхні. Можна видобувати ресурси під заповідниками, містами або з морського дна, використовуючи лише невеликий майданчик для бурової установки.

Зі свердловин видобувають літєві розсоли для акумуляторів, геотермальної енергії землі та рідкісних елементів. без свердловин неможлива сучасна мікроелектроніка та перехід до “зеленої” енергетики.

Надглибокі свердловини - це наша можливість зазирнути всередину планети для вивчення земної кори, прогнозування землетрусів та вивчення історії Землі.

На рис. 1 ми побудували діаграму, в яку звели корисні копалини, які видобуваються, та показали кольорами основні напрямки видобутку надр.



Рисунок 1 – Використання свердловин

Зокрема бішофіт - це мінеральна сіль, яка видобувається методом розмиву.

Металеві корисні копалини видобуваються методом підземного вилуговування.

Також видобувається прісна питна вода, мінеральні та лікувальні води (термальні джерела, бальнеологічні ресурси). Промислові води можуть містити йод, бром, літій, магній - їх видобувають для подальшої хімічної переробки.

Високотемпературна пара та гаряча вода - це геотермальна енергія, яка використовується для роботи геотермальних електростанцій та опалення міст.

Сучасні технології буріння свердловин зараз дозволяють використовувати їх для захоронення вуглекислого газу (CCS) - це не видобуток, а “зворотне” використання свердловин для захисту клімату, що є одним із найперспективніших напрямків галузі.

Буровé долотó (англ. drilling bit, bore bit) [13] – основний елемент бурового інструмента для механічного руйнування гірських порід у процесі буріння свердловини.

Термін “долото” зберігся з раннього періоду розвитку техніки буріння, коли єдиним способом проходження свердловини було ударне буріння, при якому бурове долото мало подібність із однойменним теслярським інструментом.

Бурові долота класифікуються за: призначенням; характером дії на гірські породи; видом робочої частини, яка руйнує гірську породу.

На рис. 2 ми пропонуємо наше бачення діаграми еволюції бурильних доліт.



Рисунок 2 – Еволюція бурильних доліт

За призначенням розрізняють три класи бурильних доліт:

- для суцільного буріння (руйнування гірських порід по всьому вибою свердловини);
- колонкового буріння (руйнування гірських порід по кільцю вибою свердловини із залишенням її центральній частині керна);
- спеціальне буріння (врізні долота, розширювачі, фрези та ін.).

За характером дії на гірські породи бурильні долота діляться на чотири класи:

- подрібнювальні,
- подрібнювально-сколювальні,
- стирально-сколювальні,
- стирально-різальні
- різально-сколювальні.

За видом робочої частини виділяються: шарошкові долота і лопатеві бурильні долота.

Вражають своєю простотою і винахідливістю стародавні способи свердління твердих кам'яних порід.

Деякі способи схематично зображені на рис. 3.

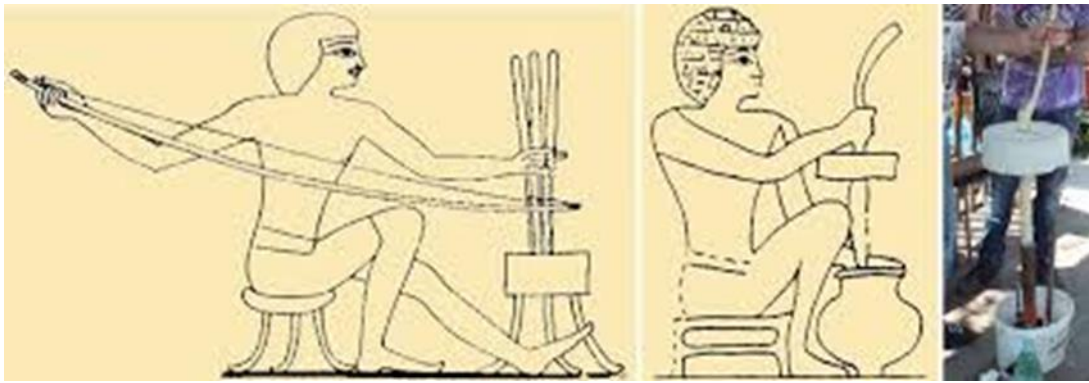


Рисунок 3 – Стародавні способи свердління порід

Окремо і схематично один з інструментів показаний на рис. 4.

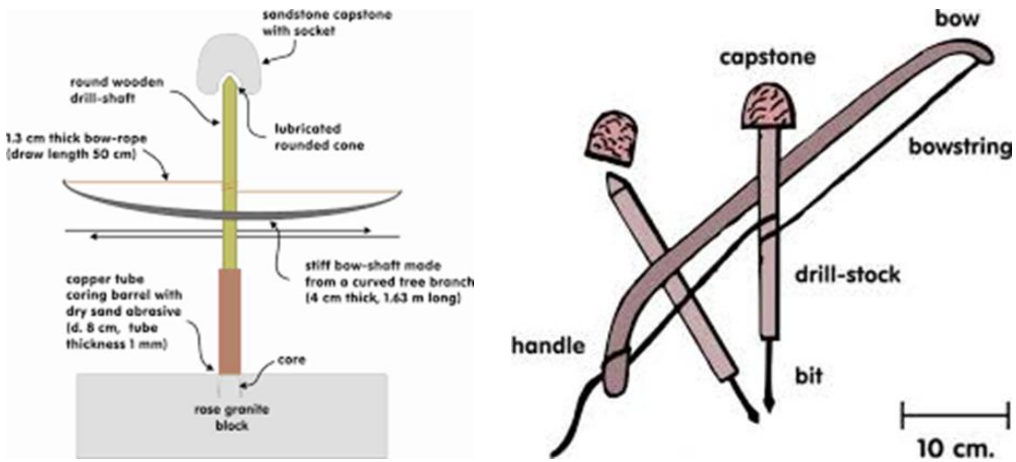


Рисунок 4 – Схематичні зображення одного з інструментів

Наше бачення сучасної класифікації бурильних доліт показано на рис 5.



Рисунок 5 – Класифікація бурильних доліт

Сучасний світ стоїть на порозі глобальної трансформації енергетичного сектору. Декарбонізація економіки та пошук екологічно безпечних джерел

живлення зробили термін “зелена” енергетика не просто трендом, а вимогою часу [14-18]. Серед широкого спектра відновлюваних ресурсів особливе місце посідає енергія тепла Землі. На відміну від сонячної чи вітрової генерації, вона не залежить від погодних умов чи часу доби, забезпечуючи стабільне базове навантаження в енергомережі.

Центральною ланкою в опануванні цього ресурсу є геотермальна свердловина. Створення такої свердловини – це високотехнологічний процес, що потребує використання спеціальних корозійно-стійких матеріалів та доліт, здатних працювати в умовах екстремальних температур і агресивних хімічних середовищ. Саме через ці “технологічні ворота” ми отримуємо доступ до теплоносія – пари або гарячої води, що циркулює в глибинах земної кори.

Вивчення енергетичного потенціалу відновлюваних джерел на землі сьогодні є пріоритетом для провідних інженерних центрів. Науковці аналізують геологічні структури, щоб визначити зони з найвищим тепловим потоком. Найбільш ефективним способом реалізації цього потенціалу у великих масштабах є геотеплоелектростанції (ГеоТЕС). Це складний інженерний комплекс, де енергія пари високого тиску перетворюється на механічну енергію турбіни, а згодом – на електрику. Виробництво геотермальної електроенергії характеризується низьким рівнем викидів CO_2 та мінімальним використанням земельних ресурсів на одиницю потужності, що робить його еталоном екологічності.

Проте енергія надр – це не лише велика електрика. Сучасна наука пропонує різноманітні прямі способи використання геотермальної енергії, які можуть кардинально змінити економіку окремих регіонів.

По-перше, це аграрний сектор. Опалення теплиць за допомогою термальних вод дозволяє отримувати врожаї овочів та квітів цілий рік навіть у північних широтах, суттєво знижуючи собівартість продукції. Паралельно з цим активно розвивається вирощування аквакультур (водних організмів): підтримка стабільної температури у басейнах створює ідеальні умови для розведення теплолюбних видів риб та креветок.

По-друге, низькопотенційне тепло знаходить застосування в інфраструктурних рішеннях. Система танення снігу на дорогах, тротуарах та злітних смугах аеропортів за допомогою прокладених під поверхнею контурів з теплоносієм дозволяє відмовитися від хімічних реагентів і спецтехніки.

По-третє, геотермальне тепло інтегрується у складні промислові процеси, де потрібна стабільна температура, наприклад, у паперовій чи текстильній галузях. Окремої уваги заслуговують сушилки в сільському господарстві. Використання дармового тепла землі для сушіння зерна, фруктів чи деревини дозволяє фермерам значно економити на природному газі та електроенергії.

Підсумовуючи, можна впевнено сказати, що розвиток геотермальних технологій є фундаментом енергетичної безпеки майбутнього. Кожна нова успішно пробурена свердловина наближає нас до моменту, коли людство зможе повністю задовольнити свої потреби, живучи в гармонії з планетою.

Сьогодні бурова установка – це вже не просто механізм, а складний кіберфізичний об'єкт, де нейронні сітки і штучний інтелект в буринних

технологіях відіграють роль центральної нервової системи. Ми переходимо від епохи “заліза” до епохи “цифри”.

Впровадження ШІ починається ще на етапі геологічної розвідки. Нейронні мережі здатні аналізувати гігабайти сейсмічних даних, розпізнаючи пастки вуглеводнів з точністю, що перевищує можливості людського ока. Алгоритми глибинного навчання допомагають будувати 3D-моделі родовищ, що дозволяє ще до початку робіт визначити оптимальну траєкторію стовбура.

Безпосередньо під час буріння штучний інтелект керує процесом у режимі реального часу. Системи автоматичного керування (“Autodrill”) за допомогою нейромереж миттєво підбирають оптимальні параметри: навантаження на долото, частоту обертання та витрату промивальної рідини. Це дозволяє досягти максимальної механічної швидкості проходки, мінімізуючи при цьому знос дорогого інструменту.

Найбільш критичною зоною відповідальності ШІ є попередження і прогнозування аварій [19-25]. Буріння – це завжди робота в умовах невизначеності. Нейронні сітки аналізують найменші відхилення у тиску, крутному моменті або вібраціях. Алгоритми здатні за лічені секунди ідентифікувати ознаки поглинання промивальної рідини або ранні симптоми газонафтоводопроявів (ГНВП).

Там, де людина може пропустити ледь помітну зміну тренду на моніторі, навчена модель бачить аномалію та видає попередження за 15–20 хвилин до того, як ситуація стане критичною. Це не просто економія коштів – це безпека персоналу та екологічна стабільність.

На етапі експлуатації інтелектуальні системи керують дебітом свердловин. ШІ аналізує дані з вибійних датчиків, оптимізуючи роботу насосного обладнання. Це дозволяє продовжити “життя” свердловини та підвищити коефіцієнт вилучення нафти чи газу. Прогностичне обслуговування (Predictive Maintenance) дозволяє передбачати вихід обладнання з ладу, замінюючи вузли не за графіком, а за їх реальним станом.

Отже, інтеграція ШІ в бурову справу перетворює буріння на “хірургічну” операцію, де кожен рух вивірений математично. Це шлях до створення повністю автономних бурових комплексів майбутнього.

Література

1. Jiao, Jiu. (2014). Wells in China. 10.1007/978-94-007-3934-5_10077-1.
2. Cullen C. East Asia - Hans Ulrich Vogel (tr.): Salt production techniques in ancient China: the Aobo Tu. Translated and revised by Hans Ulrich Vogel. (Sinica Leidensia, Vol. xxvii.) xxv, 309 pp. Leiden, New York and Köln: E. J. Brill, 1993. Guilders 135, \$77.14. Bulletin of the School of Oriental and African Studies. 1997;60(1):179-180. DOI:10.1017/S0041977X00030135
3. Needham, J. (1974). Science and civilisation in China (Vol. 4). Cambridge University Press.
4. Yanping, Zhu. (2013). The Early Neolithic in the Central Yellow River Valley, c. 7000-4000 BC. DOI:10.1002/9781118325698.ch9.

5. Herodotus. The Histories. Book IV, 195.
6. Vitruvius. The Ten Books on Architecture. Book VIII, Chapter 1 & 6.
7. Al-Biruni. Kitab al-Jamahir fi Ma'rifat al-Jawahir (The Book of Most Comprehensive Quotations on Knowing Precious Stones).
8. Agricola, G. De Re Metallica. Translated by Herbert Clark Hoover and Lou Henry Hoover. — New York: Dover Publications, 1950. — 638 p.
9. Beals, R. (1844). U.S. Patent No. 3,745. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
10. Leyner, J. G. (1903). U.S. Patent No. 722,369. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
11. Білецький В. С., Гайко Г. І., Орловський В. М. Історія та перспективи нафтогазовидобутку: навчальний посібник. — Харків : НТУ “ХПІ”, 2019. — 235 с.
12. Brantly, J. E. (1971). History of Oil Well Drilling. Houston: Gulf Publishing Company.
13. Вікіпедія | Бурове долото : веб-сайт. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Бурове_долото (дата звернення: 11.03.2026)
14. Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2004). Geothermal Energy: Utilization and Technology. UNESCO.
15. IRENA (2023). Geothermal Power: Technology Brief. International Renewable Energy Agency.
16. Морозов Ю. П. Геотермальна енергія: ресурси та технології використання. — Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2014. — 160 с.
17. Відновлювані джерела енергії : підручник / С. О. Кудря. — Київ : НТУУ “КПІ”, 2012. — 492 с.
18. Кудря, С.О. (2024). Відновлювані джерела енергії. DOI:10.36296/monograph-2024.
19. Othman E. B., Gomes D., Tengku Bidin T. E. B., Meor Hashim M. M. H., Yusoff M. H., Arriffin M. F., Ghazali R. Application of machine learning to augment wellbore geometry-related stuck pipe risk identification in real time. 2022. C. D41S002R004. URL: <https://doi.org/10.4043/31695-MS>.
20. Zhu N., Huang W., Gao D. Numerical analysis of the stuck pipe mechanism related to the cutting bed under various drilling operations // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022. C. 109783. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410521014042>.
21. Liu M., Song X., Zhu Z., Li G., Xiao H., Fu L., Pan T., Li X., Yang Y. Inertial effect of drill pipe friction trend and early warning of stuck pipe. 2024. C. D21S015R004. URL: <https://doi.org/10.2118/220991-MS>.
22. Katzmann L., Arvalo P., Starostin A. Ensuring wellbore and equipment integrity via data-driven adaptive limit modeling for pressure management and stuck pipe prevention. 2025. C. D31S121R009. URL: <https://doi.org/10.2118/228981-MS>.
23. Nautiyal A., Mishra A. K. Machine learning approach for intelligent prediction of petroleum upstream stuck pipe challenge in oil and gas industry //

- Environment, Development and Sustainability. 2025. С. 24167–24193. URL: <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02387-3>.
24. D'Amicis S., Pagani M., Matteucci M., Piroddi L., Spelta A., Zausa F. Stuck pipe prediction from rare events in oil drilling operations // Upstream Oil and Gas Technology. 2023. С. 100096. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666260423000117>.
25. George J. G., Okonkwo O., Akinfolarin A. Successful management of wellbore stability to mitigate stuck pipe incidents in a brownfield development drilling campaign: a case study of a land well in the niger delta. 2025. С. D21S002R005. URL: <https://doi.org/10.2118/228660-MS>.

Алієв Баба Мехман огли, ст. гр. АЕ-41-22
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
alievbaba@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ АКсіАЛЬНОГО СИНХРОННОГО ДВИГУНА ДЛЯ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Одним з основних компонентів гібридних та електричних транспортних засобів є електричний двигун, при цьому, виробники використовують різноманітні типи двигунів для своїх транспортних засобів [1-3]. Кожен тип двигуна має різні характеристики, тому, наприклад, під час проектування нового транспортного засобу їх необхідно враховувати, щоб обрати оптимальний тип двигуна. Процес вибору зазвичай починається з моделювання динаміки транспортного засобу [4,5], результати якого можуть забезпечити гарну основу для прийняття рішення. Вищезазначені факти підкреслюють важливість досліджень різних типів електродвигунів.

Змодельовані двигуни BLDC та PMSM мають схожу конструкцію, а отже, їх моделювання є подібним. Вхідні дані двигунів були однаковими в обох випадках. Блок-схема моделювання у середовищі MATLAB/SIMULINK, засновані на математичній моделі BLDC та PMSM, показано на рисунку 1.

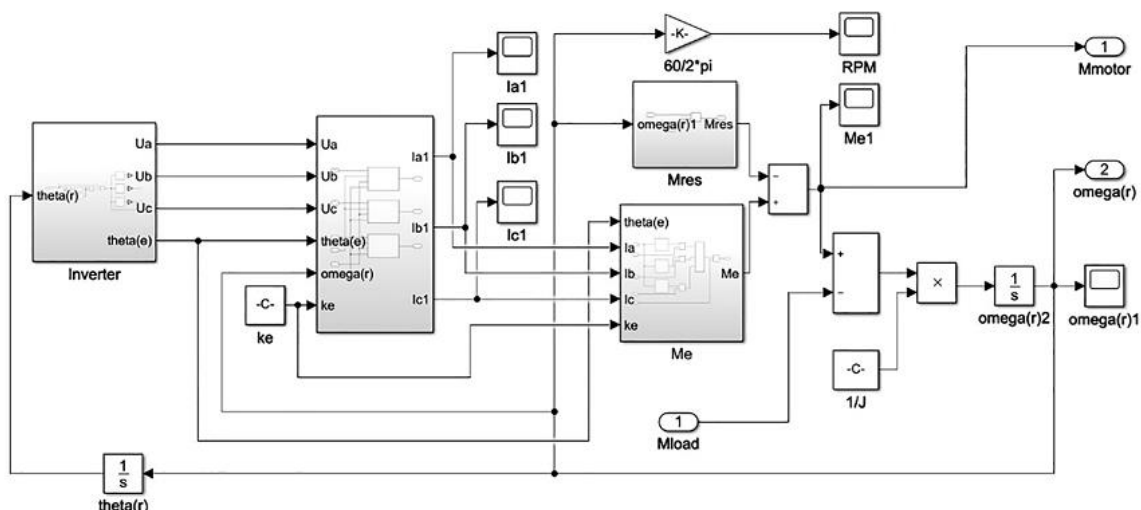


Рисунок 1 – Блок-схема моделі BLDC