

ЗАСТОСУВАННЯ ПРИНЦИПУ НАЙМЕНШОЇ ДІЇ ПРИ СТВОРЕННІ ВИКОНАВЧИХ МЕХАНІЗМІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН

¹М. Я. Бучинський*, ¹А. М. Чернявський, ²А. М. Бучинський

¹ТОВ «Експертнафтогаз»; 36008, м. Полтава, вул. Європейська, 225, оф.207,
e-mail: mbuchynskiy@ukr.net

²Національний університет «Полтавська Політехніка імені Юрія Кондратюка»;
36000, м. Полтава, пр. Першотравневий, 24, e-mail: abuchynskiy@ukr.net

Будь-яку діяльність людини оцінюють за основними законами природи, зокрема універсальним законом природи, в основі якого лежить принцип найменшої дії. Деякі дослідники вбачають цей загальний закон в економіці як принцип економії енергії та часу. Відповідно до цього принципу будь-яке економічне рішення оцінюють, використовуючи енергетичні показники. Цей принцип стосується і виробничої діяльності людини, яка створює нові технологічні машини, регулює процеси створення нової техніки і може значно підвищити її ефективність. Адже принцип найменшої дії зумовлює оптимальне функціонування будь-якої системи, зокрема технічної, якою є технологічна машина. Характеризуючи виконавчі механізми технологічних машин, де є просторове переміщення матеріальних об'єктів, застосовують рівняння з фізики, за допомогою яких пояснюють закономірності зміни швидкості руху матеріальних потоків, умови їх неперервності, створення напору тощо, тобто кількісно визначають «дію». І чим менше дії виконано технологічною машиною в результаті технологічного процесу, тим досконалішою вона є. В цій статті запропоновано методичку, в основі якої покладено визначення дії Мопертюї-Лагранжа. За Мопертюї-Лагранжем дія – це накопичена подвійна кінетична енергія за проміжок часу або зміни положення. І чим менший показник дії, тим добротніше виконана конструкція машини, її структура ефективніша. Така машина є конкурентною за цим критерієм. Апробуючи запропоновану методичку на бурових технологічних машинах декількох типів, ми підтвердили її достовірність та доцільність застосування щодо оцінки досконалості механізмів машин. Порівнюючи моделі бурового трипоршневого насоса (старого зразка і нового, який створено на високотехнологічному виробництві) та технічної системи обертання бурильної колони (системи роторного буріння та буріння з використанням сучасної системи верхнього привода), зазначимо, що новітнє технологічне обладнання має вищу міру досконалості. Запропонована методика визначення одиничного показника досконалості виконавчих механізмів машин за принципом найменшої дії доповнює, робить більш різносторонньою та достовірною оцінку технічного рівня механізму, дає можливість прогнозувати тенденції розвитку технологічних машин.

Ключові слова: досконалість виконавчих механізмів; технічний рівень машин; величина «дії»; кінетична енергія системи; універсальність законів природи.

Любая деятельность человека определяется действием фундаментальных законов природы и ее принципов, в том числе универсального закона природы, в основе которого лежит принцип наименьшего действия. Ряд исследователей трактует проявление этого всеобщего закона природы в экономике как принцип экономии энергии и времени, согласно которому любое экономическое решение оценивают, используя энергетические показатели. Этот принцип касается и результатов творчества человека по созданию новых технологических машин, который регулирует процесс создания новой техники и может существенно повысить ее эффективность. Ведь принцип наименьшего действия обуславливает оптимальность функционирования любой системы, в том числе технической, которой является технологическая машина. В анализе исполнительных механизмов технологических машин, где есть пространственное перемещение материальных объектов, используют уравнение физики, описывающие закономерности изменения скорости движения материальных потоков, условия их непрерывности, создаваемого напора и тому подобное. То есть количественно определяют «действие». И чем меньше действия выполнено технологической машиной для получения заданного результата технологического процесса, тем более совершенной она является. Руководствуясь определением действия по Мопертюи-Лагранжу, как накопленной удвоенной кинетической энергией за промежуток времени или изменения положения, предложена методика сравнительной оценки совершенства исполнительных механизмов машин. И чем меньше показатель действия, тем более добротнее выполнена и эффективнее структура и конструкция машины, тем она конкурентнее при других сопоставимых условиях. Апробация предложенной методики на нескольких типах буровых технологических машин подтвердила ее достоверность и целесообразность применения. Сравнение моделей бурового трипоршневого насоса

(старого образця и нового, изготовленного на высокотехнологическом производстве) и технических систем вращения буровой колонны (системы роторного бурения и бурения с использованием современной системы верхнего привода) показало и подтвердило более высокую степень совершенства нового технологического оборудования. Предложенная методика определения единичного показателя совершенства исполнительных механизмов машин дополняет и делает более разносторонней и достоверной оценку технического уровня механизма, содействует научному прогнозированию перспектив и тенденций развития рассматриваемого класса и вида технологических машин.

Ключевые слова: совершенство исполнительных механизмов; технический уровень машин; величина «действия»; кинетическая энергия системы; универсальность законов природы.

Any human activity is determined by the action of the fundamental laws of nature and its principles, including the universal law of nature, which is based on the principle of the least action. A number of researchers interpret the manifestation of this universal law of nature in economics as the principle of saving energy and time, according to which, any economic decision is evaluated using energy indicators. This principle concerns the results of human creativity in development of new technological machines, regulates the process of creating new technologies and can significantly increase their effectiveness. After all, the principle of the least action determines the optimal functioning of any system, including the technical one, which is a technological machine. In the analysis of the actuators of technological machines, where there is a spatial movement of material objects, they use the equation of physics that describes the laws of change in the speed of movement of material flows, the conditions for their continuous operation, the pressure is formed, and so on. It means that the "action" is quantified. And the less actions performed by a technological machine to obtain a given result of a technological process there are, the more perfect it is. Guided by the definition of an action in the form of Maupertuis-Lagrange as the accumulated doubled kinetic energy for a period of time or a change in position, a technique is proposed for a comparative assessment of the perfection of executive mechanisms of machines. And the smaller the action indicator is, the more solidly executed and more efficient the structure and design of the machine are, the more competitive it is, of other comparable conditions. The testing of the proposed methodology using several types of drilling technological machines as an example confirmed the reliability and appropriateness of application in assessing the perfection of machinery mechanisms. In particular, comparisons of models of a three-piston mud pump (older and newer high-tech production) and a technical drill string rotation system (rotary drilling system and drilling using a modern top drive system) showed a high degree of improvement of new technological equipment. This proposed methodology to determine a single indicator of improvement of the actuating mechanisms of machines by the principle of the least action, complements and makes more multi-dimensional and reliable multi-criteria assessment of the mechanism, prospects and development trends of the class and type of technological machines under consideration.

Key words: actuating mechanism improvement; technical level of machines; "action" value, kinetic system energy, the universality of laws of nature.

Вступ

Вчені дійшли висновку, що виробнича діяльність людини, якої стосується і створення нових технологічних машин, визначається дією фундаментальних законів природи та її принципів [1]. Тому, безумовно, цікаво дослідити, як впливає універсальний закон природи, в основі якого лежить принцип найменшої дії, на процес створення технологічних машин. Смісл принципу найменшої дії доступно відображено у вислові, що «світло при проходженні через різні середовища, йде ні найкоротшим шляхом, ні шляхом найменшого часу; світло вибирає шлях, який має більш реальну перевагу: шлях якого притримується світло є шляхом, де кількість дії буде найменша».

Розвиток цивілізації пов'язаний з бажанням людини отримати якомога більше благ з природних ресурсів. Ці бажання можна реалізувати через освоєння нових технологічних процесів, які здійснюються за допомогою нових технологічних машин. Об'єктивні закони природи задають вектор науково-технічному прогресові, то-

му що люди самі не можуть змінити основи цього світу. Тому знання наукового підґрунтя, принципів та характеру дії рушійних сил природи дають можливість використовувати їх повсюди: як у виробництві (синтез речовин, проектування машин, інженерно-технологічні рішення тощо), так і в побуті (кулінарія, санітарія та ін.); як при розробленні нових машин, так і при оцінці їх досконалості.

Водночас для потенційного користувача результатами освоєння нових технологічних процесів важливе значення має вартість продукції, яку виробляють нові машини. Сюди входить вартість сировини і витратних матеріалів, енергії, оплати праці, експлуатаційних витрат, амортизаційних відрахувань, адміністративних витрат тощо. Все це залежить від техніко-економічних показників і вартості технологічних машин. Тому питання вартості технологічних машин зводиться до принципів і методів вибору та оцінки кращих варіантів конструктивного виконання, в основу якого закладено відношення корисної віддачі машини протягом

нормативного терміну служби до величини витрат на забезпечення дії машини.

Аналіз проблематики

Дія. Поняття «дія» є одним із важливих понять живої та неживої природи, зокрема і в різних сферах життєдіяльності людини. Вперше воно було сформульоване Готфрідом Лейбніцом у 1669 році. Він називає дію «formalis» і визначає її як величину, показником якої є «певна кількість матерії, що переміщається на певну відстань за певний час». Формально «дія» для тіла пропорційна добутку маси матерії m , швидкості переміщення v і відстані l , на яку переміщається тіло. Тобто

$$S = mvl. \tag{1}$$

Також Лейбніц по-іншому формулює значення «дії»: це - добуток маси рухомого тіла m , квадрата його швидкості v^2 і проміжку часу t , за який відбулося переміщення. Тобто

$$S = mv^2t. \tag{2}$$

Тут Лейбніц, на відміну від декартівської кількості руху mv , використав введену ним міру руху « mv^2 », назвав «живою силою» та сформулював закон «збереження живих сил», який наблизив виникнення закону збереження енергії.

Згідно з твердженням Лагранжа, стан будь-якого матеріального об'єкта характеризується функцією Лагранжа, яка зберігає всю інформацію про динаміку системи у вигляді простого виразу – різниці кінетичної та потенціальної енергії. Тобто

$$L = K - V, \tag{3}$$

де K – повна кінетична енергія об'єкта;
 V – повна потенціальна енергія об'єкта.

У формулюванні Гамільтона, відомому під назвою «принцип Гамільтона-Остроградського», дія дорівнює

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L(q, \dot{q}, t) dt, \tag{4}$$

де L – функція Лагранжа;
 q – узагальнена координата;
 t – час.

Після Гамільтона в тридцять роки XIX ст. Карл Густав Якобі надав принципу нової форми. Якобі перемножує подвоєну кінетичну енергію K на квадрат елемента часу dt .

Визначення дії у формі Мопертюї-Лагранжа записуємо так:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} 2K dt, \tag{5}$$

або

$$S = \int_A^B \sum_i p_i dq_i. \tag{6}$$

Тут у рівняннях позначено дію S за проміжок часу $t_1 \dots t_2$, протягом якого система пере-

міщується з положення А в положення В за узагальненими координатами положень q_i ; K – кінетична енергія системи; p_i – узагальнені імпульси.

Для різних форм руху «дію» виконують різними способами, але її розмірність завжди одна і та ж – «енергія×час».

Принцип. У повсякденному житті «принципами» називають внутрішні переконання людини, ті практичні, моральні та теоретичні засади, якими вона керується в житті в різних сферах діяльності, зокрема і в конструюванні машин. Принцип – це твердження, яке сприймається як головне, важливе, суттєве. Є принципи класичної механіки, принципи термодинаміки, принцип дії парової машини і тому подібне. Будь-який принцип є узагальненим знанням, яке в інтегрованому вигляді містить певні факти, поняття, закони. Тому принцип – це особлива форма пізнання, що забезпечує синтез і впорядкованість знань.

За останні 250...300 років наука дійшла висновку, що в природі існують природно-наукові принципи. Їх умовно поділяють на два види: предметні та наукові.

До предметних належать принципи, які є загальними тільки для певної галузі знань. Це, наприклад, принцип відносності Галілея, принцип можливих переміщень, принцип квантування і т.п. Науковим принципом є «принцип найменшої дії», який можна застосувати для всіх галузей знань.

Принцип найменшої дії. Уперше принцип найменшої дії був запропонований у 1740 р. французьким математиком і механіком П'єром Луї Моро де Мопертюї. У роботі «Узгодження різних законів природи, які донині здавалися несумісними» цей принцип був сформульований нечітко, без доведення. Він стверджував, що із усіх можливих шляхів системи у конфігураційному просторі реалізується той, який відповідає найменшому значенню дії.

Мопертюї проголосив принцип найменшої дії найзагальнішим законом природи. Закони руху і спокою, виведені з цього принципу, на думку Мопертюї, і є саме тими, які існують у природі. І ми спостерігаємо за результатами цього принципу – рухом тварин, ростом рослин, обертанням світил і таке інше.

Спираючись на метафізичні принципи природи, де все логічно і розумно функціонує, Мопертюї обґрунтував універсальність принципу найменшої дії.

Ученими математиками і механіками Ейлером, Лагранжем, Гамільтоном, Остроградським, Мопертюї, Якобі були встановлені

математично чіткі вирази принципу найменшої дії.

Перше математичне формулювання принципу найменшої дії було дано Ейлером. У 1834...1835 роках Вільям Ровен Гамільтон опублікував новий варіаційний принцип, відомий як принцип стаціонарної дії Гамільтона, який пояснює зміст принципу найменшої дії.

Принципом найменшої дії захоплювались такі учені, як Ейлер, Лагранж, Даламбер, Гамільтон, Остроградський, Гаус, Герц, Ейнштейн, Шредингер, Фейнман і писали наукові роботи про нього. На думку Ейнштейна, усю загальну теорію відносності можна розробити, якщо за основу взяти цей «єдиний варіаційний принцип». Із принципу найменшої дії легко вивести всі закони геометричної оптики. Рівняння руху в механіці Ньютона є наслідками цього принципу. Річард Філіпс Фейнман, наприклад, запропонував спосіб, за яким можна пояснити зв'язок класичного і квантового опису фізичного світу, за що йому в 1965 році присудили Нобелівську премію.

Хоча принцип найменшої дії і є універсальним, все ж загадкою залишається те, що немає підстав, за якими ми можемо так широко його використовувати та довіряти отриманим результатам. Також дивно, що жодна галузь науки не вважає принцип найменшої дії предметом свого дослідження, приймає його як аксіому або як перевірений часом формальний метод. Нині не існує теоретичних пояснень його успіху і плідному застосуванню. Його просто використовують.

Деякі автори, незважаючи на відсутність теоретичних обґрунтувань феномену принципу найменшої дії, вважають цілком доцільним його використання при дослідженні господарських та економічних процесів і явищ [2].

Однією з форм прояву всезагального закону природи в економіці є закон економії часу, в основі якого лежить принцип найменшої дії. Чимало дослідників трактує цей закон як принцип економії енергії, згідно з яким будь-яке економічне рішення оцінюють, використовуючи енергетичні показники.

Зв'язок між енергією E та часом виразно бачимо в фундаментальному рівнянні теорії відносності, що встановлює динамічний в часі зв'язок й еквівалентність маси та енергії

$$E = mc^2, \quad (7)$$

де m – маса тіла;

c – швидкість світла у вакуумі.

Тому можна дійти такого висновку: економія часу повинна проявлятися і в економії енергії. Значить, при інших рівнозначних умо-

вах, ефективніше те рішення, яке потребує найменших витрат енергії. Практично сутність закону економії часу полягає в мінімізації витрат ресурсів, які використовують для досягнення мети [3].

Отже, творча робота людини щодо створення нових технологічних машин із залученням наукових, конструкторських організацій та виробничих підприємств по-суті є економічним завданням, розв'язання якого сприяє підвищенню рівня життя. По-іншому можна сказати, що процес створення нової техніки передусім є господарським, економічним процесом, який підпорядкований принципу найменшої дії.

Перспективи застосування принципу найменшої дії в діяльності людини

Враховуючи висвітлене, вважаємо, що виробнича діяльність людини визначається основними законами природи, де діють як економічні закони, так і закони, які, наприклад, регулюють процес створення нової техніки й управляють продуктивною працею людини.

Постає питання, наскільки допустиме запозичення природних закономірностей до практичної діяльності людини. На думку багатьох авторів [1, 3-11], таке запозичення цілком доречне та правомірне, хоча б тому, що в природі не може бути інших закономірностей, крім тих, що їй притаманні. Тому не важливо, хто чи що ініціює цей процес, при якому відбувається зміна стану матеріального об'єкта в просторі та часі [1, 2].

На думку багатьох авторів [2, 7, 9, 10], застосування принципу найменшої дії щодо вирішення практичних завдань економіки, може суттєво підвищити її ефективність, та ефективність процесів створення нових технологічних машин. Всі явища і процеси навколишнього середовища не можуть не належати йому і не підпорядковуватись його функціональним законам. Цим законам повинні належати та підпорядковуватись економічні процеси та явища. Тож як принцип найменшої дії відіграє важливу роль у природних процесах, так само принцип найменшої дії відіграє провідну роль в економічних процесах створення нових технологічних машин [2].

Принцип найменшої дії обумовлює оптимальність функціонування будь-якої системи, також обумовлює її розвиток, спрямований на підвищення її досконалості. Для природних систем це очевидно і необмежено. Для штучних систем, якими є технічні системи (зокрема технологічні машини), вплив цього принципу є опосередкованим, оскільки їх розвиток здійс-

нює людина. А вона може лише прискорювати або гальмувати розвиток системи, проте його напрям завжди скерований до найбільш вигідного енергетичного стану та режиму функціонування, тобто оптимальності.

Гальмування розвитку штучної системи, підтримання її у статичному стані за рахунок зниження ступеня ідеальності з часом викликає її розпад, пов'язаний із неможливістю виконання покладених функцій. З іншого боку, сприяння розвитку системи у природному напрямку забезпечує підвищення ступеня ідеальності.

Ідея оцінки досконалості механізмів машин за принципом найменшої дії

В аналізі господарських процесів, де є просторове переміщення матеріальних об'єктів, використовують рівняння з фізики, за допомогою яких визначають закономірності зміни силових дій, швидкості руху матеріальних потоків, умови їх неперервності, створюваного напору тощо. Тобто кількісно визначають «дію». І чим менше дії виконано технологічною машиною для отримання заданого результату технологічного процесу, тим досконалішою вона є.

З досвіду попередників, які вивчали можливість застосування принципу найменшої дії в економічних процесах, можна запропонувати методику оцінки досконалості (технічного рівня) структури та конструктивного рішення механізмів технологічних машин, застосовуючи принцип найменшої дії. У цій методиці ми керуємось правилом: механізм, який виконує меншу дію при тому ж результаті, є більш досконалим і має вищий технічний рівень».

Метою роботи є створити методику визначення одиничного показника досконалості виконавчих механізмів технологічних машин за принципом найменшої дії та спробувати її, виконавши порівняльну оцінку досконалості деяких видів діючого бурового обладнання за критерієм найменшої дії.

Методика оцінки досконалості виконавчих механізмів технологічних машин за принципом найменшої дії

Розглянемо, як практично можна застосувати принцип найменшої дії для порівняльної оцінки технічного рівня виконавчих механізмів технологічних машин – механізмів, що здійснюють дію. Більшість із них є голономними, плоскопаралельного руху, циклічної дії, ланки яких виконують як рівномірний, так і нерівномірний рух.

Повна кінетична енергія плоскопаралельного механізму K_M , що складається з декількох ланок, має адитивну властивість і дорівнює сумі кінетичних енергій складових ланок K_i , тобто

$$K_M = \sum_i^n K_i = \frac{1}{2} \sum_i^n (m_i v_{Si}^2 + I_{Si} \omega_i^2), \quad (8)$$

де m_i – маса i -ї ланки;

v_{Si} – лінійна швидкість центра тяжіння i -ї ланки;

I_{Si} – момент інерції i -ї ланки відносно її центра тяжіння;

ω_i – кутова швидкість i -ї ланки.

Оскільки більшість механізмів має циклічну дію, а їх швидкість (лінійна чи кутова) за кінематичний цикл змінюється за певним законом руху, то у формулі (8) застосовуємо середньоарифметичну зважену швидкість, яку визначаємо за формулами

$$v_{Si} = \frac{\int_0^{T_K} f_{vi}(t) dt}{T_K} \quad (9)$$

та

$$\omega_i = \frac{\int_0^{T_K} f_{wi}(t) dt}{T_K},$$

де $f_v(t)$, $f_w(t)$ – функція залежності миттєвої лінійної та кутової швидкості ланки від часу;

T_K – тривалість кінематичного циклу.

Для визначення дії виконавчого механізму застосовуємо формулу (5). Оскільки ми використовуємо середньоарифметично зважені швидкості, то в межах кінематичного циклу їх значення не залежать від часу, і тоді формулу (5) записуємо так:

$$S = T \cdot \sum_i^n (m_i v_{Si}^2 + I_{Si} \omega_i^2). \quad (10)$$

T – це тривалість робочого циклу (період часу, за який машина видає готовий виріб), технологічного циклу (період часу, за який машина здійснює всі операції обробки) або кінематичного циклу (період переміщення механізмів, за який всі ланки і робочий орган приймають положення і напрям руху, що і в початковий момент часу) роботи машини, тобто коли порівнювані механізми досягають однакового результату з виробництва машиною продукції. У такому разі тривалість кінематичного циклу доцільно використовувати за умови ідентичних технологічних параметрів робочого органа технологічної машини. За інших умов використовують робочий або технологічний цикл.

Коли дають оцінку за період робочого або технологічного циклу, за який технологічна машина, зазвичай, працює при різних технологічних режимах (швидкостях ланок механізмів, що регулюються швидкістю двигуна чи зміною

передавальних відношень механізмів), тоді дію машини визначають за формулою

$$S = \sum_{j=1}^m (T_j \cdot \sum_{i=1}^n (m_i v_{sij}^2 + I_{si} \omega_{ij}^2)), \quad (11)$$

де T_j – тривалість роботи механізму при певному технологічному режимі j ; тут $\sum T_j = T$.

У ході розрахунку ми нехтуємо періодами перехідних процесів під час пуску-зупинки механізму та його роботою в нештатних режимах. Короткочасність цих процесів не вносить значної чи недопустимої похибки в запропоновані нами оціночні розрахунки досконалості системи.

Маючи структуру виконавчого механізму, закони руху його ланок та маси рухомих частин, тривалість циклу функціонування машини за формулою (11), визначаємо значення дії, виконаної механізмом за цей час при різних технологічних режимах.

Чим менший показник дії « S », тим добротніше виконана, досконаліша і ефективніша структура та конструкція машини, тим вона конкурентніша за інших зіставних умов (технологічність виготовлення, експлуатаційні властивості, ремонтпридатність тощо).

Зіставляючи отримані показники дії декількох систем механізмів, що призначені для виконання певного заданого технологічного процесу з тими ж робочими характеристиками робочого органа, визначаємо коефіцієнт зіставлення

$$k_3 = S_{\text{п}} / S_{\text{б}}, \quad (12)$$

де $S_{\text{б}}$, $S_{\text{п}}$ – величина дії базової машини та машини порівняння (наприклад, новостворюваної).

Якщо $k_3 > 1$ – то виконавчий механізм базової машини за цим критерієм більш досконалий; якщо $k_3 < 1$ – то досконаліша конструкція і структура механізму нової машини. При рівності – досконалість механізмів за цим критерієм ідентична.

Маючи чисельні значення цього коефіцієнта та ранжуючи їх, ми отримуємо не тільки якісну, а й кількісну порівняльну оцінку досконалості варіантів механізмів за критерієм найменшої дії. Вони є додатковим одиничним показником і науково обґрунтовані для вибору більш досконалого структурного та конструктивного рішення механізму серед тих варіантів, які розглядають на початковому етапі проектування технологічної машини.

Досконалість виконавчих механізмів двох чи більше аналогічних машин різних моделей доцільно проводити не тільки на етапі проектування, а й для оцінки споживачами тих моделей, що уже випускаються виробництвом. Проте таке оцінювання зазвичай ускладнене відсу-

тністю точних масових та швидкісних параметрів механізмів, які розраховуються на етапах проектування машин. Тому вони будуть укрупнено-оціночними.

Отримані значення дії виконавчих механізмів машин (абсолютні чи зіставні) доповнюють ті показники технічного рівня, які розраховують за відомими методиками. У такому разі ми отримуємо більш різносторонню та достовірну оцінку перспектив і тенденцій розвитку розглядуваного класу й виду технологічних машин (металообробних, ковальсько-пресових, нафтогазопромислових, вантажопідйомних, гірничих тощо).

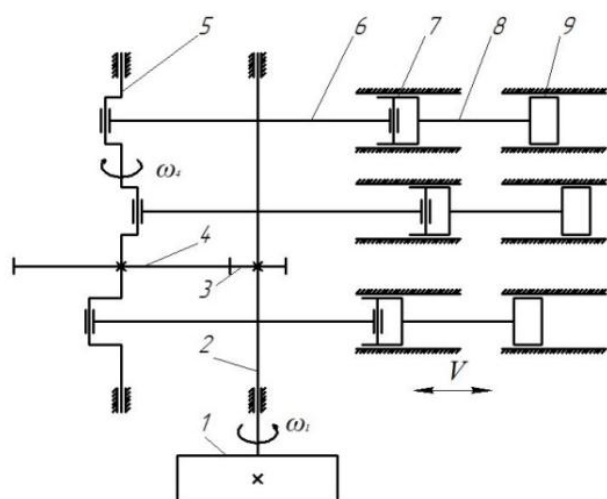
Приклади оцінки досконалості виконавчих механізмів

Для апробації запропонованої методики проведемо оцінку виконавчих механізмів декількох типів бурових машин, які знаходяться у межах першого циклу удосконалень – параметричного (покращення окремих параметрів технічної системи при незмінному фізичному принципі дії та технічному рішенні, тобто структури), та другого циклу – структурного (перехід на більш раціональне технічне рішення (структуру механізму) за умови незмінного фізичного принципу дії) [4]. Виконана оцінка механізмів таких технічних систем:

- параметричного циклу удосконалень: насоси бурові трипоршневі односторонньої дії;
- структурного циклу удосконалень: насос буровий трипоршневий односторонньої дії (триплекс) та насос двопоршневий двосторонньої дії (дуплекс);
- структурного циклу удосконалень: обладнання для обертання бурильної колони під час буріння ротором та системою верхнього привода.

Порівняльна оцінка досконалості механізмів трипоршневих бурових насосів односторонньої дії

Порівняємо технічний рівень виконавчих механізмів трипоршневих бурових насосів односторонньої дії, кінематичну схему яких показано на рисунку 1. Моделі триплекса, які розробляли в різний час різні виробники (у 80-х роках минулого століття та на початку нинішнього), експлуатуються й нині. Новіший насос (модель порівняння) розроблений сучасною міжнародною високотехнологічною нафтогазовою машинобудівною компанією. Вона його і виготовляє. Насос старого зразка (базова модель) створений менш технологічно розвинутим підприємством.



1 – шків пасової передачі; 2 – вал ведучий;
3 – шестірня приводна; 4 – колесо зубчасте;
5 – кривошип; 6 – шатун; 7 – повзун; 8 – шток;
9 – поршень

Рисунок 1 – Кінематична схема трипоршневого бурового насоса

Обидві моделі насоса знаходяться в межах одного циклу удосконалень – параметричного – і призначені для виконання тієї ж технологічної операції. А також мають схожі енергетичні та кінематичні характеристики: встановлена потужність ≈ 1150 кВт; максимальний робочий тиск 35МПа, максимальна подача промивальної рідини 45...50дм³/с, максимальна частота подвійних ходів поршня – 120...125хв⁻¹. Структурна побудова механізму моделей однотипна. Тому порівняння моделей проведемо за величиною дії виконаної за кінематичний цикл.

Керуючись кінематичною схемою (рис. 1) та формулою (10), складемо рівняння для визначення дії S базової моделі та моделі порівняння, S_6 і S_{II} відповідно, за кінематичний цикл:

$$S = T_K \cdot \left(\omega_1^2 \sum_{i=1}^3 I_{Si} + \omega_4^2 \sum_{i=4}^5 I_{Si} + 3(m_6 v_{S6}^2 + I_{S6} \omega_6^2) + 3v_{S7}^2 \sum_{i=7}^9 m_i \right), \quad (13)$$

де T_K – тривалість кінематичного циклу;

$\omega_1^2 \sum_{i=1}^3 I_{Si}$ – подвоєна кінетична енергія вхідних обертових ланок 1, 2, 3 з моментом інерції i -ї ланки відносно її центра тяжіння I_{Si} , що обертаються з однаковою кутовою швидкістю ω_1 ;

$\omega_4^2 \sum_{i=4}^5 I_{Si}$ – подвоєна кінетична енергія ведених обертових ланок 4, 5 з моментом інерції i -ї ланки відносно її центра тяжіння I_{Si} , що обертаються з однаковою кутовою швидкістю ω_4 ;

$3(m_6 v_{S6}^2 + I_{S6} \omega_6^2)$ – подвоєна сумарна кінетична енергія трьох шатунів, які виконують

складний плоскопаралельний рух ланки відносно її центра тяжіння; тут m_6 – маса шатуна, I_{S6} – його момент інерції відносно центра тяжіння, v_6 – середньоарифметичне зважена лінійна швидкість центра тяжіння шатуна; ω_6 – кутова швидкість.

$3v_{S7}^2 \sum_{i=7}^9 m_i$ – подвоєна сумарна кінетична енергія трьох вузлів, складених з ланок 7, 8, 9 масою m_i , що здійснюють поступальний рух зі середньоарифметично зваженою швидкістю v_{S7} .

Результати розрахунків показують, що $S_{II} < S_6$, тобто виконавчий механізм новішої моделі бурового насоса від високотехнологічного виробника добротніший та ефективніший, тобто досконаліший.

Порівняльна оцінка досконалості механізмів трипоршневого бурового насоса односторонньої дії та двопоршневого двосторонньої дії

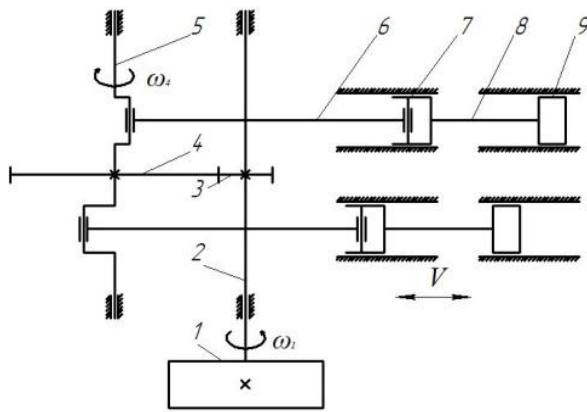
Порівняємо технічний рівень виконавчих механізмів бурових насосів типу «триплекс» та «дуплекс» (двопоршневий насос двосторонньої дії), кінематичні схеми яких показано на рисунках 1 та 2. Обидві моделі насоса призначені для виконання тієї ж технологічної операції, мають схожі енергетичні характеристики: встановлена потужність - 600кВт; максимальний робочий тиск - 25МПа, максимальна подача промивальної рідини приблизно - 50дм³/с, проте максимальна частота подвійних ходів відрізняється удвічі, 135 та 64 об/хв. у триплекса та дуплекса. Водночас вони знаходяться на різних структурних циклах удосконалення, тобто мають різну структуру – дво- і трипоршневу кінематичну схему. Дуплекси є більш старими моделями, тому в експлуатації нині більшість бурових насосів – триплекси.

Враховуючи це, порівнюємо моделі за величиною дії, виконаної за технологічний цикл – тривалість перекачування однакового об'єму рідини при ідентичному робочому тиску.

За кінематичною схемою (рис. 2) та формулою (10) складемо рівняння для визначення дії S_D двопоршневого насоса за технологічний цикл:

$$S_D = T_T \cdot \left(\omega_1^2 \sum_{i=1}^3 I_{Si} + \omega_4^2 \sum_{i=4}^5 I_{Si} + 2(m_6 v_{S6}^2 + I_{S6} \omega_6^2) + 2v_{S7}^2 \sum_{i=7}^9 m_i \right), \quad (14)$$

де T_T – тривалість технологічного циклу; інші складові – аналогічні до наведених у рівнянні (13), за винятком подвоєної кінетичної енергії двох, а не трьох шатунів та вузлів зі зворотно-поступальним рухом (у двох останніх доданках виразу множник «3» замінений на «2»).



1 – шків пасової передачі; 2 – вал ведучий;
3 – шестірня приводна; 4 – колесо зубчасте;
5 – кривошип; 6 – шатун; 7 – повзун; 8 – шток;
9 – поршень

Рисунок 2 – Кінематична схема двопоршневого бурового насоса

Рівняння для визначення дії трипоршневого насоса S_T аналогічне виразу (13) за умови заміни тривалості кінематичного циклу T_K на технологічний T_T .

Результати розрахунків показують, що $S_D < S_T$, тобто виконавчий механізм двопоршневого бурового насоса виконує меншу дію за той же технологічний цикл, а тому є досконалішим за цим критерієм оцінки.

Це, на перший погляд, суперечить сучасній практиці використання триплексів при бурінні свердловин та практично повній відмові від використання дуплексів. Але логічне пояснення цьому є:

- показник, визначений нами за принципом найменшої дії, є одиничним, і тільки доповнює комплексну оцінку досконалості варіантів виконання машин. Такі значні переваги триплексу, як менша матеріаломісткість, менша кількість швидкозношуваних вузлів та їх вищий ресурс тощо більш вагомо впливають на його ефективність, ніж величина дії, яку виконують його механізми;

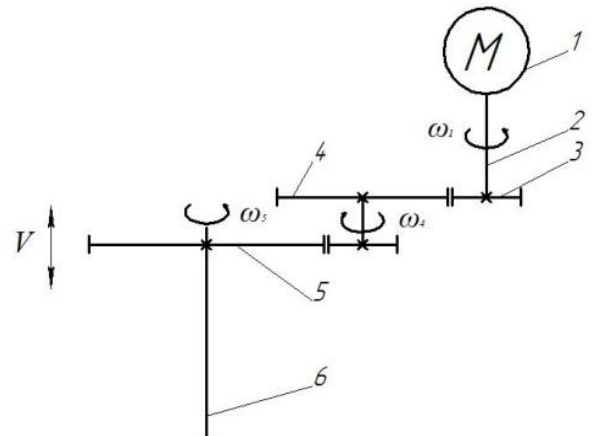
- автори дали оцінку тільки технологічній машині – механізму бурового насоса. Моделі насосів типу триплекс та дуплекс знаходяться на різних етапах структурного удосконалення (мають різну структуру), тому доцільно давати оцінку механізмам всієї технічної системи привода бурового насоса – від двигуна до робочого органа. Але через відсутність точних даних маси та швидкісних характеристик ланок всіх механізмів привода насосів, автори не змогли розрахувати величину дії для всієї технічної системи. Хоча тільки оціночний експертний погляд на механізми привода зазначених типів на-

сосів показує, що різниця величин дії технічних систем цих типів насосів значно нівелюється, а, можливо, і вказує на вищу досконалість триплексів.

Порівняльна оцінка досконалості механізмів технічної системи обертання бурильної колони – роторного буріння та буріння з використанням системи верхнього привода

Розглянемо дві технічні системи, які знаходяться на різних етапах структурного удосконалення. Вони призначені для обертання бурильної колони. При визначенні їх дії враховуємо всі елементи системи – від двигуна до виконавчого органа.

Обидві системи, технічний рівень яких порівнюємо, призначені для буріння свердловин, глибиною близько 6500 м. Вони оснащені електродвигунами потужністю близько 650кВт, можуть сприймати осьове навантаження 500 тонн, а їх виконавчі органи мають максимальну частоту обертів – 200...250об/хв. та можуть передавати крутний момент 65...70кНм. Тобто за призначенням та технологічними параметрами робочого органа системи дуже близькі.



1 – електродвигун; 2 – вал ведучий;
3 – шестірня ведуча; 4 – вал проміжний зі спареними зубчастими колесами;
5 – шестірня основного вала;
6 – вал основний (вал привода бурильної колони)

Рисунок 3 – Кінематична схема механізму основного руху системи верхнього привода

Зазначимо, що технічна система роторного буріння використовується промисловістю уже понад 100 років. А системи верхнього привода (СВП) розроблені та впроваджені близько 35 років тому, і застосовують їх останніми трьома десятиліттями. Структурна побудова цих технічних систем кардинально різна.

Щоб порівняти технічні системи, умовно візьмемо технологічний цикл з рівнозначними технологічними параметрами: відпрацювання

долота протягом 90 годин та проходкою 540 м з наступним спуск-підійманням бурового інструменту тритрубками довжиною 30 м з глибини 3600м. Експлуатація СВП та ротора здійснюється буровою установкою тієї ж моделі.

Дія, виконана системою верхнього привода $S_{СВП}$, складається з дій обертання бурильної колони $S_{СВП\ об}$ та поступального руху в процесі бурінні, нарощуванні колони і виконанні спуско-підіймальних операцій $S_{СВП\ п}$:

$$S_{СВП} = S_{СВП\ об} + S_{СВП\ п} \quad (15)$$

Дія обертального руху СВП визначається за формулою:

$$S_{СВП\ об} = t_6(\omega_1^2 \sum_{i=1}^3 I_{Si} + I_{S4} \omega_4^2 + \omega_5^2 \sum_{i=5}^6 I_{Si}), \quad (16)$$

де t_6 – тривалість механічного буріння;
 ω_i – частота обертання відповідної ланки, водночас ланки 1, 2, 3 та ланки 5, 6 обертаються з однаковою частотою ω_1 і ω_5 ;

I_{Si} – момент інерції i -ї ланки відносно її центра тяжіння. При розгляді системи верхнього привода та системи ротора дією при кріпленні/розкріпленні замкових різьбових з'єднань труб нехтуємо.

Дію поступального переміщення СВП на різних етапах буріння визначаємо за формулою

$$S_{СВП\ п} = m_{СВП}(t_6 \cdot v_{S6}^2 + t_{нар} \cdot v_{Sнар}^2 + t_{СПО\uparrow} \cdot v_{СПО\uparrow}^2 + t_{СПО\downarrow} \cdot v_{СПО\downarrow}^2), \quad (17)$$

де $m_{СВП}$ – маса системи верхнього привода, що поступально переміщується по вертикалі;

t_6 – тривалість механічного буріння;
 $t_{нар}$ – тривалість переміщення вверх системи верхнього привода при нарощуванні бурильної колони;

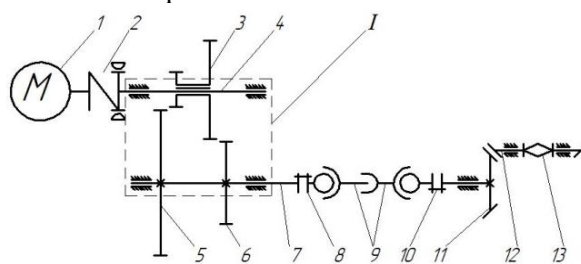
$t_{СПО\uparrow}$, $t_{СПО\downarrow}$ – тривалість підйому та спуску СВП при виконанні спуско-підіймальних операцій;

v_{S6} – швидкість механічного буріння;
 $v_{Sнар}$ – середньоарифметична зважена швидкість підіймання СВП без бурильної колони;

$v_{СПО\uparrow}$, $v_{СПО\downarrow}$ – середньоарифметичні зважені швидкості переміщення при спуско-підіймальних операціях СВП угору та вниз відповідно (тут при обчисленнях за принципом формули (11) враховувались різні швидкості підіймання колони, що залежали від її ваги).

Далі визначаємо дію, виконану технічною системою привода ротора за той же технологічний цикл. Кінематичну схему цієї системи зображено на рисунку 4. У цьому випадку ротор має індивідуальний привод від електродвигуна з тиристорним регулюванням. Обертаний рух передається ланками системи механізмів, пока-

заних на рисунку, до вкладиша ротора, який є виконавчим органом.



I – коробка змінних передач; I – електродвигун;
 2 – шинопневматична муфта; 3 – спарене зубчасте колесо; 4 – ведучий вал;
 5, 6 – ведені зубчасті колеса; 7 – ведений вал;
 8, 10 – муфта; 9 – кардан; 11 – ведуче конічне зубчасте колесо ротора; 12 – зубчасте колесо стола ротора; 13 – укладка ротора

Рисунок 4 – Кінематична схема технічної системи привода ротора

Дію технічної системи привода ротора визначають за формулою:

$$S_p = t_6(\omega_1^2 \sum_{i=1}^4 I_{Si} + \omega_5^2 \sum_{i=5}^{11} I_{Si} + \omega_{12}^2 I_{S12}), \quad (18)$$

де t_6 – тривалість механічного буріння;
 ω_i – частота обертання відповідної ланки, ланки 1 – 4 та ланки 5 – 11 обертаються з однаковою частотою ω_1 і ω_5 ;

I_{Si} – момент інерції i -ї ланки відносно її центра тяжіння.

Оскільки СВП включає в себе інтегрований вертлюг, то для успішного порівняння дій, виконаних технічними системами СВП і ротора, потрібно також врахувати дію вертлюга S_B у виконанні технологічного циклу робіт. Вона спричинена обертанням вузла ствола вертлюга і поступальним переміщенням вертлюга. Визначають за формулою

$$S_B = t_6 \omega_B^2 I_{SB} + m_B(t_6 \cdot v_{S6}^2 + t_{нар} \cdot v_{Sнар}^2 + t_{СПО\uparrow} \cdot v_{СПО\uparrow}^2 + t_{СПО\downarrow} \cdot v_{СПО\downarrow}^2), \quad (19)$$

де t_6 – тривалість механічного буріння;
 ω_B – частота обертання вузла ствола вертлюга;

I_{SB} – момент інерції ствола вертлюга;
 m_B – маса вертлюга; у дужках виразу (19) складові ті-ж, що і у формулі (17).

Зіставлення дій технічних систем виконуємо за формулою

$$k_3 = S_{СВП} / (S_p + S_B) \quad (20)$$

Порівнюючи величини дій, які отримали для обох технічних систем, бачимо, що $S_{СВП} < (S_p + S_B)$ ($k_3 < 1$). А якщо знехтувати поступальним рухом системи верхнього привода при спуско-підіймальних операціях та наро-

щуванні колони, то $S_{\text{СВП об}} \ll S_p$ ($k_3 \ll 1$). Отже, можна стверджувати, що дія, виконувана системою верхнього привода за будь-який цикл (кінематичний, технологічний або робочий), буде меншою від дії, що виконується технічною системою привода ротора.

Виконуючи розрахунки, не враховували дію різних допоміжних операцій, наприклад, подачу труб зі стелажів чи свічників, розкріплення та згвинчування колон тощо; масу стропів, ведучої бурильної труби, елеваторів тощо. Проте енергетична частка цих операцій незначна, тож не вносить суттєвих похибок у результати розрахунків.

Отже, виконавчі механізми системи верхнього привода є досконалішими за критерієм найменшої дії, а при бурінні свердловин система верхнього привода ефективніша порівняно з роторним бурінням. Це підтверджено широким використанням цих систем, які мають багато інших, більш значущих переваг при спорудженні свердловин на нафту і газ.

Висновки

Технічному рішенню майбутньої машини важко дати оцінку за одним критерієм оптимізації, тобто таким одним технічним показником, який однозначно та вичерпно характеризує виріб, що розробляється. Запропоноване визначення одиничного показника досконалості виконавчих механізмів машин за принципом найменшої дії доповнює оцінку механізму, робить її більш різносторонньою та достовірною. Дає можливість визначити перспективи і тенденції розвитку розглядуваного класу і виду технологічних машин.

Порівнювані види бурових машин довели достовірність та доцільність використання запропонованої методики для оцінки досконалості (технічного рівня) виконавчих механізмів технологічних машин. Її результати дають не тільки якісну, а й кількісну оцінку виконавчим механізмам технологічних машин, можливість їх ранжування та міру порівняльної досконалості.

Аналізуючи рівняння (1,2,...,7), бачимо й інші важливі загальні положення економічної діяльності створення нових машин, які можуть бути предметом наступних досліджень за використання принципу найменшої дії. Наприклад, для порівняльної оцінки ефективності традиційних (таких, що вилучають, тобто металорізальних) та адитивних (таких, що додають, так званий 3D-друк) технологій при виготовленні технічного об'єкта: чим більшу кількість внутрішньої енергії матеріалу буде викори-

стано до створення об'єкта, тим меншу кількість енергії зовнішніх джерел буде використано для виробництва продукції та чим більше дії виконуються над матеріалом заготовки в процесі створення технічного об'єкта, тим більшу кількість енергії потрібно для цього процесу.

Література

1. Терехович В.Э. Обобщение экстремальных принципов физики. *Альманах современной науки и образования*. 2012. №11. С.184-192.
2. Бабанов В.Н., Хомяков В.Н. Принцип наименьшего действия в экономических процессах. *Известия Тульского государственного университета. Экономические и юридические науки*. 2017. Выпуск 4, ч.1. С.153-59. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. – 345 с.
3. Демин В.Н. Принципы материалистической диалектики в научном познании. М.: Изд-во МГУ, 1979. 184 с.
4. Бучинський М.Я., Горик О.В., Чернявський А.М., Яхін С.В. Основи творення машин. Харків: Вид-во «НТМТ». 2017. 448 с.: 52 іл.
5. Філософія сучасної науки і техніки: підручник / Едуард Семенюк, Володимир Мельник. Вид. 3-є, випр. та допов. Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2017.
6. Belnap N. Probabilities and propensities. *Studies in history and philosophy of modern physics*. 2007. Vol. 38. P. 593–625.
7. Is the principle of least action a must? (2015) URL: <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2015.01.015>
8. Katzav J. Dispositions and the principle of least action. *Analysis*. 2004. Vol. 64.3. P. 206–214.
9. Metaphysics of the principle of least action (2018) URL: <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2017.09.004>
10. Toms D. J. The Schwinger Action Principle and Effective Action. Cambridge : Cambridge U.P., 2007.
11. Yemima Ben-Menahem Causation in Science. New Jersey, United States: Princeton University Press, 2018.

References

1. Terehovich V.E. Obobshchenie ekstremalnykh printsipov fiziki. *Almanah sovremennoy nauki i obrazovaniya*. 2012. №11. P.184-192. [in Russian]
2. Babanov V.N., Homiyakov V.N. Printsip naimenshego deystviya v ekonomicheskikh protsessah. *Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo*

- universiteta. *Ekonomicheskie i yuridicheskie nauki*. 2017. Vol. 4, Vol. 1, P.153-159. Tula: Izd-vo TulGU, 2017. 345 p. [in Russian]
3. Demin V.N. Printsipy materialisticheskoy dialektiki v nauchnom poznanii. M.: Izd-vo MGU, 1979. 184 p. [in Russian]
4. Buchynskiy M.Y., Horyk O.V., Cherniavskiy A.M., Yakhin S.V. Osnovy tvorennia mashyn. Kharkiv.: NTMT. 2017. 448 p. [in Ukrainian].
5. Filosofiia suchasnoi nauky i tekhniky: pidruchnyk. Eduard Semeniuk, Volodymyr Melnyk. Lviv: LNU im.Ivana Franka, 2017. [in Ukrainian].
6. Belnap N. Probabilities and propensities. *Studies in history and philosophy of modern physics*. 2007. Vol. 38. P. 593–625.
7. Is the principle of least action a must? (2015) URL: <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2015.01.015>
8. Katzav J. Dispositions and the principle of least action. *Analysis*. 2004. Vol. 64.3. P. 206–214.
9. Metaphysics of the principle of least action (2018) URL: <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2017.09.004>
10. Toms D. J. The Schwinger Action Principle and Effective Action. Cambridge : Cambridge U.P., 2007.
11. Yemima Ben-Menahem Causation in Science. New Jersey, United States: Princeton University Press, 2018.