

ІНЖЕНЕРНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗВИТКУ ПОРТАТИВНИХ СИСТЕМ ВЕРХНЬОГО ПРИВОДА

А. М. Бучинський

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;
36011, Першотравневий проспект, 24, м. Полтава, Україна,
e-mail: abuchynskiy@ukr.net

Перед тим, як придбати чи розробити нову ефективну модель системи верхнього привода, необхідно ґрунтовно проаналізувати ринок та спрогнозувати його розвиток. Тому важливу роль інженерного, науково-технічного прогнозування відіграють передбачення і «пророцтва». Це не перебирання відомих варіантів, це оцінка сучасного стану машин, передбачення змін новітніх технологічних потреб, прогнозування тенденцій розвитку техніки. Тому тут показано весь модельний ряд лідерів ринку систем верхнього привода 2004 та 2021 років – п'яти основних європейських та північноамериканських виробників. Використовуючи принципи розвитку технічних систем та методи оцінки технічного рівня, ми пропонуємо процедури обґрунтованого вибору ефективного технічного забезпечення капітального ремонту свердловин портативними системами верхнього привода, які полягають в: аналізі ринку; визначенні комплексу показників сучасного технічного рівня; виявленні тенденцій та напрямку розвитку систем верхнього привода; прогнозі розвитку технологічних показників та структури технічної системи в перспективі. Показуємо шляхи покращення технологічної ефективності за рахунок технічних рішень з підвищення надійності, ремонтпридатності, безпеки, монтажпридатності, покращення та розширення технологічних можливостей, автоматизації процесів. Встановлено функціональні залежності для визначення показників сучасного технічного рівня моделей. Прогнозуємо, що інтенсивний розвиток систем верхнього привода в межах параметричного циклу буде сповільнюватись. Водночас настав час для розробки нового зразка техніки через зміну структурної побудови, тобто переходом на наступний структурний цикл розвитку. Відбудеться це інтегруванням функцій талевої системи та лебідки в систему верхнього привода шляхом застосування лінійних електродвигунів для вертикальних переміщень системи. Така система буде ефективнішою не тільки технологічно, а й за «принципом найменшої дії». Робота призначена для фахівців нафтогазової інженерії, які експлуатують системи верхнього привода, для інженерів нафтогазового машинобудування та творців нових технічних систем. Результати забезпечують інженерів необхідними даними для вибору ефективної моделі задля її подальшої експлуатації чи для формування конкурентного технічного завдання на розробку машин.

Ключові слова: технічний рівень; ефективність; капітальний ремонт свердловин; ефективне технічне забезпечення.

Thorough information analysis of the market and forecasting of its development is necessary for choosing the system of the top drive before acquisition or development of new effective model. There is an important role of engineering, scientific and technical forecasting - prediction and "prophecy". This is not a search of known options, it is an assessment of the current state of machinery, anticipation of changes in new technological needs, forecasting trends in technology. Therefore, the full range of top-of-the-range market leaders in 2004 and 2021 is considered – five major European and North American manufacturers. By using the principles of development of technical systems and methods of technical level assessment, the procedures of reasonable choice of effective technical support for well workovers with portable top-drive systems are proposed: market analysis; determining a set of indicators of modern technical level; identification of trends and directions of development of top drive systems; forecast of development of technological indicators and structure of technical system in the future. Ways to improve technological efficiency through technical solutions to increase reliability, maintainability, safety, installation suitability, improvement and expansion of technological capabilities, process automation are shown. Functional dependences for definition of indicators of a modern technical level of models are established. It is predicted that the intensive development of upper drive systems within the parametric cycle will slow down. At the same time, the time has come to develop a new model of technology by changing the structural structure, i.e. the transition to the next structural cycle of development. This will be done by integrating the functions of the hoisting equipment and drawworks into the upper drive system by using linear electric motors for vertical movements of the system. Such a system will be more efficient not only technologically, but also on the principle of "least action". The work is intended for oil and gas engineering specialists who operate top drive systems, for oil and gas engineering engineers and creators of new technical systems. The results provide engineers with the necessary data to select an efficient model for its further operation or to form a competitive technical task for the development of machines.

Key words: technical level; efficiency; well workover operation; effective technical support.

Вступ

Буріння та капітальний ремонт з використанням мобільних установок користуються значним та стабільним попитом в Україні, багатьох країнах Близького Сходу, Північної Африки й інших [1, 2, 3]. В Україні, крім буріння нових свердловин, особливо актуальним є відновлення сотень свердловин [4]. Це свердловини старого фонду, які мають залишений в свердловині інструмент, негерметичність експлуатаційної колони, інші причини, в тому числі геологічні.

Портативні системи верхнього привода зазвичай використовують в мобільних бурових установках вантажопідйомністю 125...250 тон. Ці мобільні установки призначені не тільки для буріння свердловин, глибиною орієнтовно до 4000 м, а й виконання складних операцій капітального ремонту свердловин, що виконується з обертанням бурильної колони:

- очищення вибою і стовбура свердловини від залишених предметів;
- буріння нових (бокових) стовбурів свердловин;
- фрезерування підшви обсадної колони з поглибленням свердловини.

Всі ці технології, особливо буріння бокових похило-спрямованих стовбурів з існуючих свердловин, вимагають високотехнологічного обладнання, яка забезпечує ефективність робіт за рахунок забезпечення високої надійності та керованості процесів в діапазоні необхідних технологічних параметрів. В більшості випадків беззаперечно перевагу має буріння з використанням систем верхнього привода [5, 6].

Нині на ринку України використовують декілька десятків мобільних бурових установок вантажопідйомністю 125–225 тонн (за інформацією автора), але жодна з них не оснащена системою верхнього привода. А у власності українських компаній є тільки одна портативна система верхнього привода, яка не була задіяна у виробництві. Тобто портативні системи верхнього привода в Україні до нині, на жаль, не експлуатуються. Це ставить перед сервісними українськими компаніями завдання забезпечення своїх виробничих можливостей ефективними технологічними машинами, чому передує ґрунтовне вивчення ринку.

Метою роботи є оцінювання сучасного технічного рівня моделей, виявлення тенденцій та шляхів розвитку систем верхнього привода задля обґрунтування вибору ефективної моделі та/чи формування конкурентного технічного завдання на розробку нової.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

У багатьох роботах висвітлено завдання інновації промисловості загалом. Зокрема в роботі [7] розглянуто інноваційну діяльність підприємств, де окремим класифікаційним складником є нова техніка та нові технологічні процеси. У роботі [8] показано, що одним з елементів виробничого потенціалу є результат застосування нового обладнання та технологій; дано оцінку техніко-технологічних показників підприємства. У роботі [9] йдеться про поліпшення структури основних виробничих засобів за рахунок оновлення та модернізації.

Широко в літературі розглядають питання оцінки якості й технічного рівня складних технічних систем загалом [10].

У галузевих роботах нафтогазової промисловості [11-14] розглядають питання вибору ефективного технологічного оснащення для проведення робіт з буріння та капітального ремонту свердловин, оцінюють недоліки та переваги тих чи інших технологій та моделей технічних систем. Також багато робіт цього спрямування стосовно нафтогазового обладнання опубліковано професором Івано-Франківського національного університету нафти і газу Міроновим Ю.В. в кінці 90-х – початку 2000-х років.

Це дослідження розвиває напрямком комплексного інженерного аналізу технічного рівня систем верхнього привода та прогнозує його розвиток.

Постановка завдання та зміст дослідження

Для формування парку технологічних машин підприємства необхідно вибрати відповідні моделі, які здатні не тільки найповніше задовольнити технологічні вимоги, але й забезпечити ефективне технічне функціонування. Вибирають модель машин за результатами зіставлення та порівняльного аналізу альтернативних аналогів.

Вибору моделі системи верхнього привода, як і будь-якої іншої технологічної машини, передує інформаційний пошук щодо вивчення ринку, виявлення тенденцій та напрямку розвитку машин. Тут дуже важлива роль інженерного (науково-технічного) прогнозування – передбачення і «пророцтва». Інженер повинен бути не тільки фахівцем, який перебирає відомі варіанти. Він повинен передбачити як зміну зовнішніх факторів, новітніх технологічних потреб, так і якість та критерії ефективності технічних об'єктів, тенденції їх розвитку. Прогнозувати можна не тільки технічну систему зага-

лом, а й окремі характеристики та властивості машини, що визначають її технічний рівень, тобто відносну характеристику якості продукції.

Детально обґрунтований системний аналіз сучасного стану ринку, оцінка технічного рівня та інженерне прогнозування розвитку – це запорука успішного вибору й освоєння конкурентної та ефективної технологічної машини для:

- оснащення нею виробництва сервісного нафтогазового підприємства;
- ліцензованого випуску наявної на ринку моделі машинобудівним підприємством;
- розробки нового зразка технічної системи.

Особливо актуально це в нафтогазовій галузі, де технологічне обладнання є енергоємним та матеріалоємним, дорогим та з тривалим періодом експлуатації. Тому наукове обґрунтування вибору ефективного технічного забезпечення капітального ремонту свердловин портативними системами верхнього привода є технічним завданням, що має велике практичне значення. А саме:

1. аналіз ринку, виявлення тенденцій та напрямку розвитку систем верхнього привода;
2. встановлення комплексу їх одиничних показників сучасного технічного рівня;
3. інженерне прогнозування розвитку систем у перспективі.

Тому в роботі висвітлено весь модельний ряд лідерів ринку систем верхнього привода 2004 та 2021 років загалом, проаналізовано їх конструктивне виконання. Досліджено технічний рівень за критеріями технологічної ефективності, енергооснащеності, матеріаломісткості портативних систем верхнього привода. За результатами аналізу показано тенденції розвитку, спрогнозовано розвиток системи верхнього привода на основі сучасних досягнень науки та техніки суміжних галузей промисловості.

Модельний ряд систем верхнього привода та динаміка його зміни

Представлено номенклатуру моделей систем верхнього привода (СВП) всіх торгових марок п'яти основних європейських та північноамериканських виробників. Загалом це 56 сучасних моделей та 46 періоду 2004 року. Їх виробники є лідерами на ринку створення систем верхнього привода. Масив статистичної інформації для сучасних моделей отримано з офіційних сайтів компаній виробників; для моделей, що були на ринку 2004 року [15].

Сукупну вибірку моделей систем верхнього привода згруповано за вантажопідйомністю,

видом привода та періодом їх пропозицій на ринку. Для візуалізації обсяги цих однорідних вибірок показано на гістограмах (рис. 1).

Номенклатура моделей складається як з базових, так і похідних, які створені на основі базової моделі з метою отримання різних експлуатаційних показників (табл. 1). Майже всі виробники пропонують декілька модифікацій кожної базової моделі для повнішого задоволення потреб споживачів та збільшення конкурентності своєї продукції.

Модельний ряд 2021 року, порівняно з 2004, зріс на 20–25% переважно за рахунок збільшення кількості гідроприводних моделей малої вантажопідйомності та появи електроприводних моделей найвищої вантажопідйомності – понад 1000 тонн.

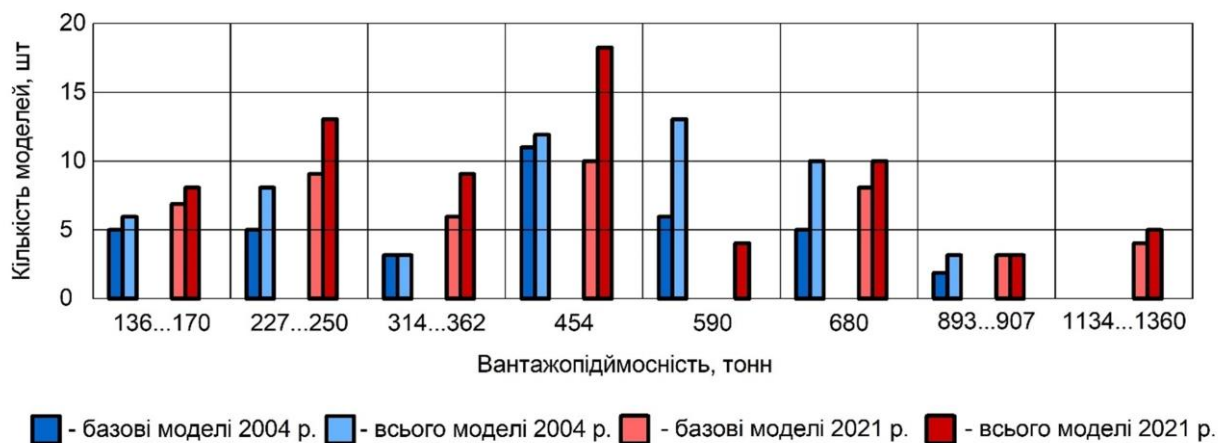
Одним з шляхів удосконалення є створення похідних машин, які більше забезпечують споживчі потреби ринку. З метою отримання широкої гами моделей системи верхнього привода з різними експлуатаційними показниками використано метод агрегування – поєднання уніфікованих агрегатів, що встановлюють у різній кількості та в різних комбінаціях на загальній базі. Це є основою блоково-модульної побудови технічної системи. Систему верхнього привода створюють з ряду окремих самостійних блоків та модулів (двигун, коробка передач, трубний маніпулятор, система автоматизації, системи вертикального переміщення з напрямних кареток та рейок, інтегрований вертлюг тощо). А також використано метод компонування – паралельного з'єднання силових агрегатів задля збільшення загальної потужності системи.

Визначимо коефіцієнт перекриття моделей як відношення кількості базових моделей до загальної $k_M = j_m/j_b$.

Для модельного ряду 2004 року він становив 1,45, у тому числі для електроприводних – 1,53, а для гідроприводних – 1,13. Для моделей 2021р. – 1,54, зокрема 1,56 – для електроприводних та 1,5 для гідроприводних. Водночас кількість похідних за рахунок зміни технологічних параметрів більша, ніж за структурною побудовою.

Загалом тенденція блочно-модульної побудови похідних залишається стабільною. Проте діапазон технологічних показників похідних систем зріс.

Зокрема зміна технологічних параметрів похідних порівняно з базовими моделями: потужності N , частоти обертання n та вантажопідйомності P для електричних систем зросла.



а)



б)

а) базові та всього моделей (в т.ч. похідні); б) моделі з електро- та гідроприводом

Рисунок 1 – Статистична вибірка моделей систем верхнього привода 2004 та 2021 років

В 2021 р: $\Delta N = 33\%$, $\Delta n = 11\%$, $\Delta P = 25\%$.
В 2004 р: $\Delta N = 20\%$, $\Delta n = 5\%$, $\Delta P = 20\%$.

Загалом завдяки блочно-модульній побудові систем верхнього привода з меншими витратами створюють більший діапазон моделей з ширшими технологічними показниками для задоволення потреб споживача. Така побудова дозволяє розробникам цілеспрямовано працювати над удосконаленням окремих блоків, покращувати їх технічні показники до досягнутих загалом для решти блоків технічної системи.

Оцінка технічного рівня портативних систем верхнього привода

Технічний рівень технологічних машин – це сукупність властивостей, що, зазвичай, характеризують:

- експлуатаційною технологічністю;
- енергооснащеністю;
- матеріало- та габаритомісткістю.

Розглянемо кожен з цих пунктів окремо.

Експлуатаційна технологічність

Експлуатаційну технологічність трактуємо як здатність виробу ефективно здійснювати технологічний процес з найменшими витратами експлуатаційного періоду його життєвого циклу. Вона має багато показників. Зокрема це надійність, ремонтпридатність, монтажнопридатність, безпечність, технологічні можливості, автоматизація виробничих процесів.

Кількісно оцінити експлуатаційну технологічність складно. Тому нижче наведено ті шляхи, якими виробники систем верхнього привода покращують кожен з цих показників.

Надійність:

– використання сучасних конструкційних рішень, матеріалів з високими властивостями, методів формоутворення деталей та формування властивостей їх поверхневого шару, що забезпечують тривалий термін служби виробів;

Таблиця 1 – Розподіл моделей систем верхнього привода

№	Класифікаційна ознака	Позначення*	Кількість моделей	
			2004 р.	2021 р.
Електропривод				
1	Базові моделі**	j_b^e	30	36
1.1	портативні моделі	j_{bp}^e	7	12
1.2	моделі для буріння на суші	j_{bl}^e	23	21
1.3	моделі для буріння на шельфі	j_{bs}^e	7	15
2	Базові моделі для похідних за технологічними параметрами	j_{bmt}^e	8	10
3	Базові моделі для похідних за структурою	j_{bms}^e	5	2
4	Всього моделей, в т.ч. похідних***	j_m^e	46	56
Гідропривод				
1	Базові моделі**	j_b^h	8	10
1.1	портативні моделі	j_{bp}^h	6	9
1.2	моделі для буріння на суші	j_{bl}^h	2	2
2	Базові моделі для похідних за технологічними параметрами	j_{bmt}^h	1	2
3	Всього моделей, в т.ч. похідних***	j_m^h	9	15
Примітки:				
* Прийняті позначення індексів: e, h – електро- та гідропривод відповідно; b, m – базові моделі та моделі в т.ч. їх модифікації; p, l, s – портативне виконання та для буріння на суші й шельфі.				
** $j_b \leq j_{bp} + j_{bl} + j_{bs}$, так як певні моделі входять у дві групи, як показано на рис.1.				
*** $j_m \geq j_b + j_{bmt} + j_{bms}$, так як одна базова модель може мати більше одної модифікації.				

- покращення герметизації сальникових вузлів, особливо високого тиску;
- підвищення досконалості системи мащення.

Ремонтпридатність

- захищеність та легкодоступність місць обслуговування всіх необхідних елементів технічного обслуговування, зручність та простота його виконання;
- модульність виконання, що забезпечує швидку та просту заміну вузлів;
- захищеність елементів від механічних пошкоджень;
- спрощена заміна швидкозношуваних вузлів з мінімальною кількістю інструменту в стислі терміни;
- вбудовані системи неперервного діагностування технічного стану машини з широким переліком високоточного фіксування параметрів (температура двигуна, підшипників, мастила; стан мастила; тиск в гідросистемах; вібрація тощо). Вони передбачають роботу в режимі реального часу, формування підказок та звітності, аварійне вимкнення систем тощо.

Безпека

- аварійна зупинка під час переміщення системи для запобігання зіткненню (контроль датчиками стану навколишнього простору з усіх сторін);
- дублювання відповідальних кріплень та механізмів закриття-відкриття;
- дублювання аварійного противикидово-го крану з дистанційним та ручним керуванням;
- зменшення шуму під час переміщення системи та обертання колони.

Монтажопридатність

- використання конструктивних рішень та модульність виконання забезпечують швидке від'єднання елементів привода;
- легкий та простий монтаж електрокабелів та гідроприводів;
- мінімізація встановлених шлангів і фітингів гідравлічної системи;
- легкість під'єднання системи до талевого блока без гака;
- зменшення розмірів і ваги.
- забезпечення конструктивного взаємозв'язку з будь-якими буровими вежами.

Покращення та розширення технологічних можливостей

- збільшення енергооснащення;
- широке й точне регулювання режимів роботи,
- стабільність параметрів роботи привода на граничних моментно-частотних режимах роботи;
- розширення кількості функціональних положень та просторових переміщень трубного маніпулятора;
- пришвидшення роботи трубних маніпуляторів за рахунок плавності та точності руху;
- збільшення кута відхилення стропів;
- розширення діапазону діаметрів буринних труб, з якими ключ працює без зміни вкладок.

Автоматизовані системи керування

Розвиток систем спрямований на оптимізацію технологічного процесу, покращення відпрацювання доліт та зменшення аварійності:

- оптимізація сумісної роботи двигунів синхронізацією їх робочих характеристик;
- можливість інтегрування електричних та гідравлічних схем керування в головну систему керування буровою;
- постійний високоточний та повний контроль за параметрами технологічних процесів (навантаження на долото, крутний момент тощо);
- контроль послідовності виконання операцій;
- максимальне погодження характеристики взаємодії «людина-машина» в просторовому, часовому, інформаційному та енергетичному спрямуванні (інтуїтивне розуміння, ергономічна досконалість, інформаційні потоки організовані й достатні);
- плавне й точне регулювання швидкостей привода;
- адаптивне керування обертанням колони за різних умов буріння (горизонтальні, похило спрямовані свердловини, небезпека прихоплень тощо).

Ці вдосконалення забезпечують нижчу вартість експлуатації системи протягом її експлуатаційного періоду життєвого циклу, підвищення надійності, оптимізацію сервісного обслуговування та зростання продуктивності. А завдяки блочно-модульній побудові виріб легко складається, монтується, ремонтпридатний (усунення несправностей відбувається через заміну блоків) та полегшує цілеспрямовану роботу над удосконаленням кожного блоку. Все це знижує експлуатаційні витрати, простоті обслуговування, підвищує ефективність обладнання загалом.

Енергооснащеність

Концентрація потужності – тенденція, яка диктується вимогами щодо збільшення продуктивності й економічності машин. Вона обумовлена зростанням навантажень на виконуючі органи машин та значними робочими швидкостями для задоволення потреб технологічного процесу.

Для оцінки енергооснащеності проаналізовано технічні характеристики портативних електричних та гідравлічних систем верхнього привода модельного ряду 2004 та 2021 років. Вибірка складається з:

- електроприводні (АС) 10 сучасних моделей та 6 моделей 2004 року;
- гідроприводні 8 сучасних моделей та 6 моделей 2004 року.

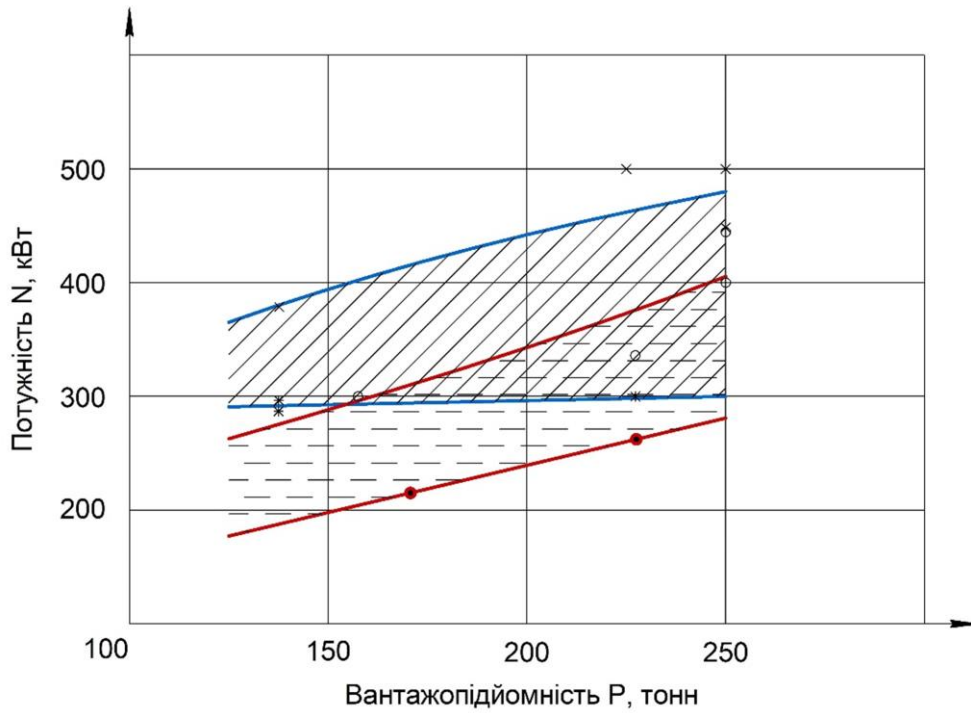
Кожну з них ми поділили на групи вищої та нижчої енергооснащеності та отримали апроксимувальні криві для електроприводних (рис. 2) та гідроприводних (рис. 3) систем вищої та нижчої енергооснащеності (верхня та нижня однотипна крива) сучасних моделей та моделей 2004 року (суцільна та штрихова крива).

У таблиці 2 представлено рівняння регресії для визначення одиничного показника енергооснащеності системи верхнього привода. Вони визначені методом найменших квадратів. Адекватність отриманих рівнянь статистичним даним оцінено критерієм достовірності апроксимації R^2 .

Порівнюємо показники цих портативних систем. Кількісну порівняльну оцінку енергооснащеності E дають співвідношення площ під залежностями (рис. 2, 3), $E = \int_{P_{min}}^{P_{max}} (N = f(P))$. Для ідентифікації значень E моделей різних вибірок призначимо такі індекси: електроприводні – «АС», гідроприводні – «Гуд»; сучасні – «21», 2004 року – «04»; вища енергооснащеність – «↑», нижча – «↓». У таблиці 3 подано характеристики та значення для моделей вибірок.

Результати обчислень дають підстави зробити такі висновки:

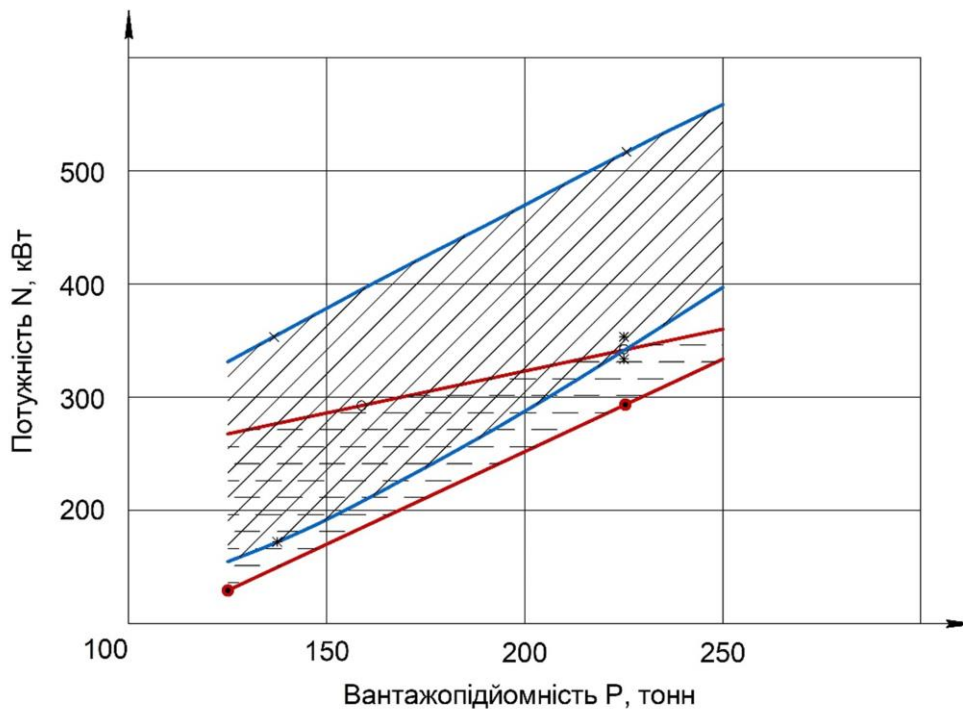
Діапазон енергооснащення – це співвідношення між потужностями моделей вищої та нижчої енергооснащеності. На рис. 2, 3 його показано заштрихованою площею. Діапазон енергооснащеності забезпечує можливість вибору моделей для кращого задоволення індивідуальних технологічних потреб користувача техніки. Для електроприводних моделей цей діапазон з роками не змінився (становить $\approx 40\%$), для сучасних гідроприводних зріс майже в 2 рази (до $\approx 70\%$).



— - моделі 2021 р. — - моделі 2004 р.

суцільні криві – сучасні моделі; штрихові криві – моделі на ринку 2004 року; верхні та нижні однотипні криві відповідають вищій та нижчій енергооснащеності моделей сучасних та 2004 року

Рисунок 2 – Залежність потужності від вантажопідйомності електричних портативних СВП



— - моделі 2021 р. — - моделі 2004 р.

суцільні криві – сучасні моделі; штрихові криві – моделі на ринку 2004 року; верхні та нижні однотипні криві відповідають вищій та нижчій енергооснащеності сучасних моделей та 2004 року

Рисунок 3 – Залежність потужності від вантажопідйомності гідравлічних портативних СВП

Таблиця 2 – Показники енергооснащеності портативних систем верхнього привода

Тип приводу	Період	Енергооснащення	Рівняння регресії	Достовірність R^2
АС	Сучасність	Вищий	$N = 58,643P^{0,3793}$	0,703
АС	Сучасність	Нижчий	$N = 248,73P^{0,0333}$	0,775
АС	2004	Вищий	$N = 7,4899P^{0,7227}$	0,7447
АС	2004	Нижчий	$N = 10,573P^{0,591}$	1
Hydro	Сучасність	Вищий	$N = 8,3632P^{0,7595}$	1
Hydro	Сучасність	Нижчий	$N = 0,1614P^{1,4106}$	0,996
Hydro	2004	Вищий	$N = 41,771P^{0,3881}$	1
Hydro	2004	Нижчий	$N = 0,2145P^{1,334}$	1

Таблиця 3 – Зіставлення кількісної оцінки енергооснащеності систем

Електропривод		Гідропривод	
Діапазон енергооснащення моделей			
$E_{AC\ 21}^{\uparrow} / E_{AC\ 21}^{\downarrow} = 1,44$	$E_{AC\ 04}^{\uparrow} / E_{AC\ 04}^{\downarrow} = 1,41$	$E_{Hyd\ 21}^{\uparrow} / E_{Hyd\ 21}^{\downarrow} = 1,71$	$E_{Hyd\ 04}^{\uparrow} / E_{Hyd\ 04}^{\downarrow} = 1,36$
Зміна енергооснащеності моделей 2021/2004 років			
$\frac{E_{AC\ 21}^{\uparrow}}{E_{AC\ 04}^{\uparrow}} = 1,30$	$\frac{E_{AC\ 21}^{\downarrow}}{E_{AC\ 04}^{\downarrow}} = 1,28$	$\frac{E_{Hyd\ 21}^{\uparrow}}{E_{Hyd\ 04}^{\uparrow}} = 1,40$	$\frac{E_{Hyd\ 21}^{\downarrow}}{E_{Hyd\ 04}^{\downarrow}} = 1,13$
Зіставлення діапазонів енергооснащеності сучасних та 2004 року моделей			
$\frac{E_{AC\ 21}^{\uparrow} - E_{AC\ 21}^{\downarrow}}{E_{AC\ 04}^{\uparrow} - E_{AC\ 04}^{\downarrow}} = 1,35$		$\frac{E_{Hyd\ 21}^{\uparrow} - E_{Hyd\ 21}^{\downarrow}}{E_{Hyd\ 04}^{\uparrow} - E_{Hyd\ 04}^{\downarrow}} = 2,21$	
Зіставлення енергооснащеності електро- та гідроприводних систем			
$\frac{E_{AC\ 21}^{\uparrow}}{E_{Hyd\ 21}^{\uparrow}} = 0,95$	$\frac{E_{AC\ 04}^{\uparrow}}{E_{Hyd\ 04}^{\uparrow}} = 1,03$	$\frac{E_{AC\ 21}^{\downarrow}}{E_{Hyd\ 21}^{\downarrow}} = 1,13$	$\frac{E_{AC\ 04}^{\downarrow}}{E_{Hyd\ 04}^{\downarrow}} = 0,99$

Зміна енергооснащеності моделей 2021/2004 років. Порівнюючи ці моделі, бачимо, що енергооснащеність усіх електричних моделей зросла на $\approx 30\%$, гідравлічних на $\approx 40\%$ для вищої і $\approx 13\%$ для нижчої енергооснащеності.

Зіставляючи діапазони енергооснащеності сучасних моделей та 2004 року, бачимо зростання для сучасних моделей на $\approx 35\%$ та $\approx 120\%$ для електричних та гідравлічних систем відповідно.

Водночас енергооснащеність електричних та гідравлічних систем 2004 року і сучасних є подібною.

Окремо оцінено зміну співвідношення максимальної частоти обертання двигуна до частоти його обертання при максимальному тривалому крутному моменті. Усереднено вони зросли з 1,4–1,5 до 2 ($\approx 30\text{--}35\%$), а для окремих моделей максимально сягають 2,63 (при значенні 2,3 для моделей 2004 року).

Таким чином, кількісно показано, що відбулося інтенсивне зростання технічного рівня моделей за показником енергооснащеності (потужність та робочі швидкості) на 30...40%. Це

інтенсифікує технологічні процеси та підвищує ефективність буріння.

Матеріало- та габаритомісткість

Питомі показники маси m на одиницю продуктивності або на одиницю встановленої потужності є вирішальним фактором, що визначає ефективність машини. Домагаючись зниження питомих показників, досягаємо економії матеріалів, зменшення трудомісткості виробів, витрат та енергетичних витрат, знижуються витрати при транспортуванні, полегшується експлуатація машин.

Питомі показники габаритів особливо важливі для портативних систем верхнього привода, адже вони мають обмеження за габаритами вишки та площі робочого бурового майданчика. Вагомими параметрами габаритів є довжина h та площа описаного прямокутника навколо системи верхнього привода S . Чим менша довжина системи, яка задовольняє технологічні операції, тим з довшим бурильним інструментом можна працювати. Чим менша площа описаного прямокутника, тим більше вільного про-

сторю для інших операцій та безпеки персоналу під час роботи з рухомими об'єктами.

Нижче кількісно визначимо сучасні питомі показники матеріаломісткості m/NP та габаритомісткості h/NP , та S/NP на одиницю умовної енергооснащеності, інтегральний показник якої визначаємо як NP . За одиницю умовної енергооснащеності прийнято кВт×тонн, тобто добуток потужності (енергії, яку створює привод та передає на виконавчий механізм – бурильну колону) і вантажопідйомності (величина, що має здатність чинити опір руйнуванню конструкції від дії зовнішніх енергій). Цей добуток комплексно характеризує технічну систему та впливає на її вагу.

Далі визначаємо і порівнюємо кількісні показники електричних та гідравлічних систем верхнього привода тільки для моделей ринку 2021 року. Оскільки дані з багатьох систем 2004 року відсутні або неповні (наприклад, непорівнювані, бо конструкції не мають інтегрованого вертлюга чи не враховують довжину трубного маніпулятора).

За результатами побудовано графічні залежності (рис. 4, 5) та встановлено регресійні залежності для їх визначення.

Електрична система:

$$\begin{aligned} m/NP &= -63,83 \ln(NP) + 828,39; \\ m &= 3762,1 \ln(NP) - 33918. \end{aligned}$$

Гідравлічна система:

$$\begin{aligned} m/NP &= -21,74 \ln(NP) + 315,09; \\ m &= 3027,2 \ln(NP) - 28479. \end{aligned}$$

На графічних залежностях бачимо, що матеріаломісткість рухомої системи електричних моделей на 25–30% вища, ніж у гідравлічних.

Водночас порівняли декілька електричних моделей вантажопідйомністю 400–700 тонн 2004 та 2021 років, які мають між собою незначну різницю у величині інтегрального показника енергооснащення ($\pm 5\%$). Таке зіставлення (воно не є повною мірою репрезентативним) показує, що матеріаломісткість окремих сучасних моделей на 5–10% менша, ніж старих.

Порівняння габаритомісткості гідравлічних та електричних моделей 2021 року показали, що усереднено висота гідравлічних систем на 12% менша, а площа описаного навколо них на прямокутника менша на 35–40%.

Отже, ще раз зазначимо, що менша матеріаломісткість та габаритомісткість є основними перевагами гідравлічних систем верхнього привода. І саме тому гідравлічний привод складає приблизно 40% в портативному ряді моделей і тільки 20% в загальній номенклатурі моделей.

Також для повноти картини автором розглянуто технічні характеристики декількох сучасних моделей менш високотехнологічних виробників які займають невелику нішу на ринку такого устаткування. Порівнюючи їх з характеристиками моделей, які розглянули в статті, зробимо висновок: за енергооснащеністю, матеріало- та габаритомісткістю і рівнем автоматизації такі моделі відстають за технічним рівнем від світових лідерів виробництва на 10...20 років.

Інженерний прогноз

Розвиток технічних систем відбувається циклічно:

- перший параметричний цикл – поступове нарощування технічних параметрів;
- другий структурний цикл – завдяки покращенню структури технічної системи;
- третій фізичний цикл – застосування нових, більш ефективних, фізичних принципів дії – і залежить від науково-технічного рівня розвитку галузі та соціально-економічної доцільності вдосконалення.

Розглянемо розвиток технічної системи верхнього привода, що використовується під час буріння свердловин на нафту і газ. Після багаторічного розвитку попередньої технічної системи «роторного буріння» в межах першого, параметричного циклу розвитку, відбувся її перехід на другий – структурний цикл. У результаті кардинальної зміни структури в 1982 році було розроблено першу систему верхнього привода. Це високотехнологічна технічна система інтегрує механічну, електричну, гідравлічну та комунікаційну складові і призначена для заміни традиційного роторного буріння свердловин. У ній моноблоком об'єднано такі основні обладнання й інструменти роторного буріння: ротор з приводом, вертлюг, ключ буровий автоматичний, стропа, елеватори. І знову розпочався розвиток системи за параметричним циклом.

Значущі конструктивні зміни такі: 1989 рік – вперше розроблена модель верхнього привода з інтегрованим вертлюгом; 1994-1997 рр. розроблено портативні моделі; 1997 рік – вперше встановлено спарені двигуни, а в 2012 р. спарені двигуни почали використовувати і портативному СВП. Водночас відбувся і розвиток привода: у 1991 році розпочали використання двигунів змінного струму, які нині повністю витіснили двигуни постійного струму, а в 1993 р. – застосовано гідропривод. Головний технологічний параметр – вантажопідйомність – також зазнавав значущих змін: у 2002-2003

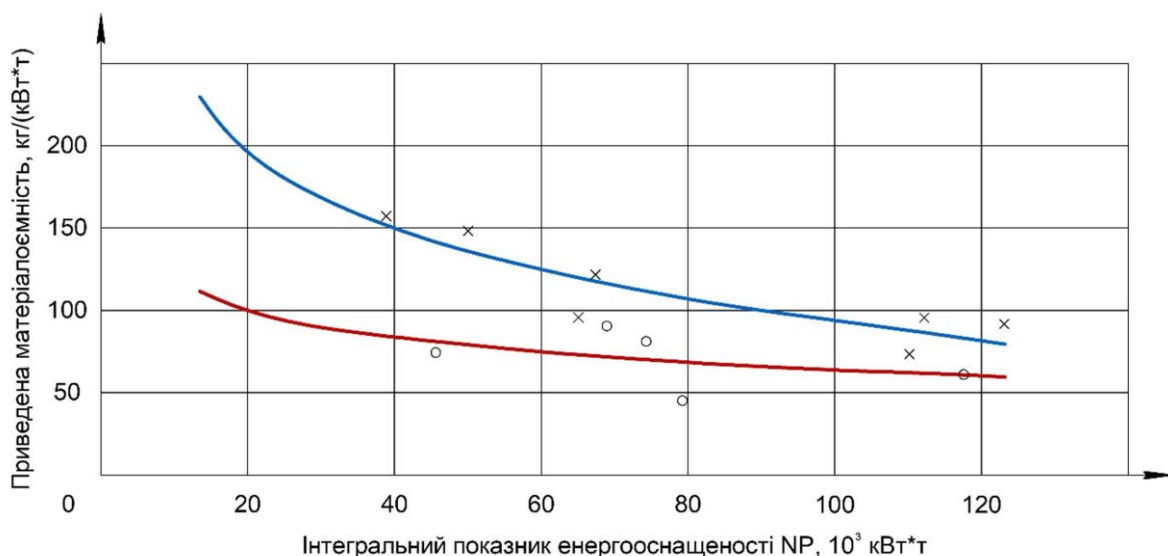


Рисунок 4 – Залежність приведеної матеріаломісткості електричних (верхня крива) та гідравлічних (нижня крива) систем верхнього привода від інтегрального показника енергооснащеності

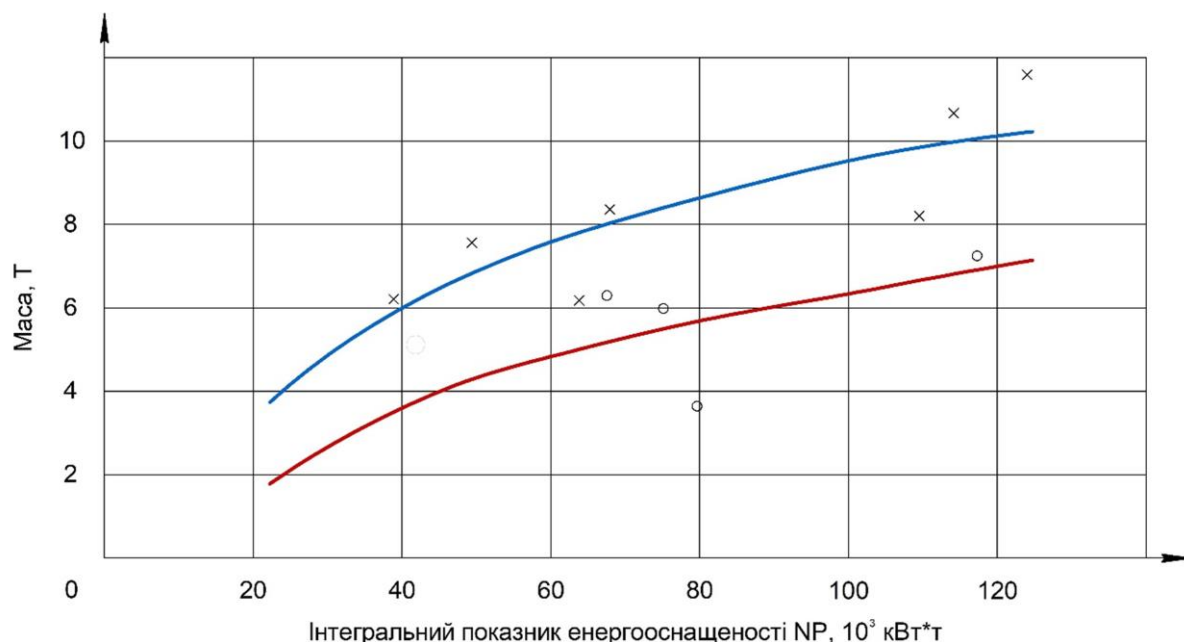


Рисунок 5 – Залежність матеріаломісткості електричних (верхня крива) та гідравлічних (нижня крива) систем верхнього привода від інтегрального показника енергооснащеності

роках розроблено моделі з найвищою на той час вантажопідйомністю 1000 тонн, у 2008 р. – 1250 тонн, у 2014 р. – 1500 тонн. Водночас зростала й енергооснащеність системи, так у 2017 р. досягли найвищого крутного моменту. Удосконалення систем верхнього привода продовжується, адже, згідно з принципами розвитку технічних систем, воно відбувається постійно.

Розвиток систем верхнього привода відбувається згідно з принципами розвитку техніки – стадійно. Розширення його функціональних можливостей відбувалось хронологічно за такими стадіями:

1 стадія – технологічна. Для виконання певної технологічної операції систему доповнювали механізмами: інтегрованим вертлюгом, трубним маніпулятором тощо.

2 стадія – енергетична. Відбувалось нарощення потужності, дводвигуновий привод, перехід від двигунів постійного струму до змінного.

3 стадія – автоматична. Нарощувалась система технічного діагностування обладнання та контролю технологічних процесів.

4 стадія – адаптивна. Систему верхнього привода оснащують елементами, що дозволя-

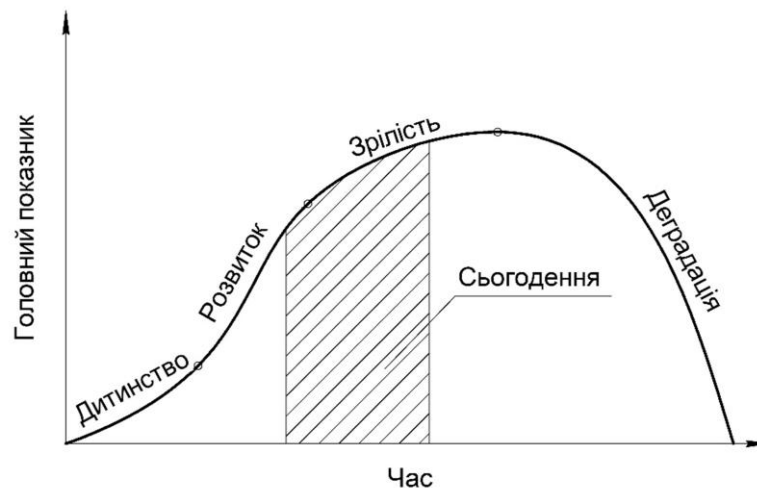


Рисунок 6 – Еволюційна крива розвитку технічної системи верхнього приво­ду

ють їй пристосовуватися до зміни умов середовища (різка зміна технологічних режимів, поява перешкод на шляху переміщення тощо). Тобто формується адаптивна технічна система, що зменшує вплив людини на технологічний процес.

Аналізуючи розвиток систем верхнього привода за 30 попередніх років, зазначимо, що в 90-х та на початку 2000-х і 2010-х років основний розвиток систем верхнього привода відбувався на двох перших стадіях, нині і за попередні 5 років основний розвиток завдячує третій та найбільше четвертій стадії розвитку.

Отже, настає момент зміни наявної технічної системи сучаснішою і досконалішою (рис. 6). Життя технічної системи в межах параметричного циклу її розвитку, якою є система верхнього привода, можна уявити у вигляді еволюційної кривої, що запозичена з біології, оскільки її життя можна порівняти з життям організму. На першому етапі розвитку системи, яку називають «дитинство», технічна система розвивається повільно. Потім настає другий етап – і система швидко вдосконалюється, відбувається інтенсивний розвиток. Далі, на третьому етапі, темпи розвитку сповільнюються, технічна система вичерпує свої можливості вдосконалення, настає зрілість. Четвертий етап – «старість», система деградує. Цю систему починають замінювати принципово іншою системою зазвичай уже на третьому етапі. А зародження нової ідеї, в основному, відбувається наприкінці другого – початку третього етапу.

Провівши аналіз модельного ряду систем верхнього привода, тенденцій та темпів його розвитку, зазначимо, що:

- системи верхнього привода почали замінювати попередні технічні системи роторно-го буріння через 80 років;

- системи верхнього привода працюють на ринку вже близько 40 років;

- за останні 20 років відбулося інтенсивне зростання показників технічного рівня систем через розширення модельного ряду та діапазону робочих параметрів, підвищення технологічності, збільшення енергооснащення та зменшення матеріаломісткості та габаритомісткості;

- оцінка зміни показників для окремих моделей за останні 30 років хронологічно показує уповільнення темпу зростання робочих параметрів та акцентуванні розвитку інтелектуальних системи керування (заклучна адаптивна стадія розвитку технічної системи).

Це свідчить, що система верхнього привода розвивається наприкінці другого або на початку третього етапу, і що настав час розробки нових технічних систем з іншою структурною побудовою. Враховуючи світову тенденцію інтенсифікації темпів освоєння нової техніки, вважаємо, що протягом десятиліття вони можуть з'явитись на ринку.

Подамо технічну ідею подальшого розвитку системи верхнього привода структурного рівня.

Як було зазначено, система верхнього привода інтегрувала в себе низку бурового обладнання за кінематичним зв'язком системи (від ротора до талевої системи), суттєво прискорила виконання технологічних процесів та зробила їх більш керованими та безаварійними, тобто ефективнішими.

Наступним етапом структурної перебудови повинна бути інтеграція в єдину систему більшої кількості елементів бурової. Така система повинна мати вищу технологічність, автоматизацію та роботизацію, технологічну адаптивність.



Рисунок 7 – Зміна структури побудови технічної системи верхнього приводу

Для успішного розвитку необхідно постійно слідкувати за напрямком та тенденцією розвитку суміжних провідних галузей, запозичувати їх досвід.

Наприклад, нині відомі зразки гідрофікованих бурових, де вертикальне переміщення бурової колони відбувається гідроприводом. Водночас ми знаємо, що конкурентом гідропривода є електропривод. І нині електричний сервопривод має точну керованість, і в багатьох випадках витіснив гідропривод. Для лінійного переміщення в транспортному машинобудуванні широко використовують лінійні електродвигуни, які забезпечують не тільки високі тягові зусилля, а й високу точність переміщень.

Вважаємо, що в структуру наступної системи буде додатково включено лінійний електродвигун, який здійснюватиме вертикальне переміщення бурильної колони. Отже, відпаде потреба в талевій системі з буровою лебідкою (рис. 7). Така технічна система може стати ще ефективнішою, краще адаптованою до роботизації та автоматизації процесів, мати вищі контрольовані технологічні процеси.

Окрім того, оцінимо ефективність технічних систем за критерієм «принципу найменшої дії» [16], що характеризує їх виробничу ефективність. Для виконавчих механізмів техноло-

гічних 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. Порівнюючи величини дії, які отримали для системи верхнього приводу та системи роторного буріння, у роботі [16] показано, що дія системи верхнього приводу за будь-який цикл (кінематичний, технологічний або робочий), менша від дії, що виконується технічною системою приводу ротора. Отже, виконавчі механізми системи верхнього приводу є досконалішими за критерієм найменшої дії, а під час буріння свердловин система верхнього приводу ефективнішою порівняно з роторним бурінням.

Узагальнено розглянувши принцип дії талевої системи, лебідки з приводом та лінійного електродвигуна, стверджуємо, що за критерієм «принципу найменшої дії» технічна система, побудована за новою структурою, матиме величезну перевагу.

Висновки

У роботі розглянуто сучасний модельний ряд систем верхнього привода. Показано та кількісно оцінено розширення номенклатури та технологічних параметрів систем верхнього привода. Виявлено тенденції та шляхи їх розвитку. Запропоновано до використання під час оцінювання технічного рівня систем верхнього привода одиничні показники. Встановлено їх функціональні залежності та визначено сучасний технічний рівень моделей. Показано, що сучасні моделі, окрім вищої технологічної ефективності, мають орієнтовно на 30% вище енергооснащення й на 5–10% меншу матеріаломісткість та габаритомісткість. Спрогнозовано етап розвитку, на якому нині знаходяться системи верхнього привода. Виконано інженерний прогноз розвитку та запропоновано принцип структурної побудови нової технічної системи.

Результати роботи призначені для фахівців нафтогазової інженерії, які експлуатують системи верхнього привода, для інженерів нафтогазового машинобудування та творців нових технічних систем верхнього привода. Вони забезпечують інженерів необхідними даними з метою вибору ефективної моделі для її подальшої експлуатації, для формування конкурентного технічного завдання на розробку машин.

Література

1. Miguel A. Fernández Pérez, Fabricio Oliveira, Silvio Hamacher. Optimizing Workover Rig Fleet Sizing and Scheduling Using Deterministic and Stochastic Programming Models. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2018. Vol.57. No.22. P. 7544–7554 <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b04500>.
2. Mansour H., Munir Ahmad M., Dhafir N. Ahmed H. Evaluation of operational performance of workover rigs activities in oilfields. *International Journal of Productivity and Performance Management.* 2013. Vol. 62, No.2, P. 204-218. <http://doi.org/10.1108/17410401311295740>
3. Mansour Haitham, Ahmad Mohammad, Munir Ahtita Fadala. Practical Evaluation Workover Framework (PEWF) for evaluation and process improvement of Workover Rigs in the Oilfields. *Proceedings of the 24th International Conference on Flexible Automation & Intelligent Manufacturing FAIM 2014.* <http://dx.doi.org/10.14809/faim.2014.1153>.
4. Воловецький В. Б., Щирба О. М., Витязь О. Ю. Розроблення комплексних заходів, спрямованих на підвищення ефективності видобування вуглеводнів при розробці родовищ на виснаження. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, 2014. No.3(52), P. 154–165.
5. Walid Mohamed Mahmud, Saber Kh. Elmabrouk. Rig Selection and Cost Analysis; a Comparison of Top Drive and Rotary Table Drive Rig Systems. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Detroit, Michigan, USA, September 23-25, 2016.
6. Atwa V., Kahutu J. Comparison of drilling technologies between top drive and rotary table in geothermal fields: a case study of Olkaria geothermal fields. *Proceedings 5th African Rift geothermal Conference*, Arusha, Tanzania, October 29-31, 2014.
7. Ревенко Н.Г., Надточій І.І., Пулянович О.В. Удосконалення концептуального підходу до теоретико-методологічних і практичних засад розвитку інноваційного управління промисловими комплексами в Україні. *Державне управління та місцеве самоврядування*. 2021. № 1 (48). С. 80-91. doi:10.32782/palg/2021.1.10
8. Мацко Н.Г. Управління розвитком виробничого потенціалу промислового підприємства. *Науковий вісник Херсонського державного університету*. 2017. № 23. Част. 2. С. 69-72.
9. Яшан Ю.В. Напрямки підвищення ефективності відтворення і використання основних засобів. *Наукові праці Кіровоградського національного технічного університету. Економічні науки*. 2012. №22, ч.ІІ.
10. Семенов С.С. Оценка качества и технического уровня сложных систем: Практика применения метода экспертных оценок. М.: ЛЕНАНД, 2015. 352с.
11. Opeyemi Bello, Catalin Teodoriu, Ogunlana Oluwafemi, Olatunji Olayiwola. Successful Geothermal Operation Management: Technology Adoption of Oil and Gas Drilling Rig Systems. *GRC Transactions*. 2019. Vol. 43.
12. Andriyanov A.M., Andriyanov P.A., Bur M. Drilling automation based on rigs equipped with the top drive system. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 181 (2018) 012002. doi:10.1088/1755-1315/181/1/012002.
13. Victor Atwa, James Kahutu. Comparison of drilling technologies Between top drive and rotary table in Geothermal fields: a case study of Olkaria geothermal fields. *Proceedings 5th African Rift geothermal Conference*, Arusha, Tanzania, 29-31 October 2014
14. Youhong Sun, Yuanling Shi, Qingyan Wang, Zongwei Yao. Study on speed characteristics of hydraulic top drive under fluctuating load. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018. Vol. 167. P. 277-286.

15. Бучинський М.Я., Світлицький В.М. Системи верхнього приводу для буріння та підземного ремонту свердловин. Київ: «Інтерпрес ЛТД», 2004. 78 с.

16. Бучинський М.Я., Чернявський А.М., Бучинський А.М. Застосування принципу найменшої дії при створенні виконавчих механізмів технологічних машин. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2020. №1(48). С.66-76.

References

1. Miguel A. Fernández Pérez, Fabricio Oliveira, Silvio Hamacher. Optimizing Workover Rig Fleet Sizing and Scheduling Using Deterministic and Stochastic Programming Models. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2018. Vol.57. No.22. P. 7544–7554 <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b04500>.

2. Mansour H., Munir Ahmad M., Dhafr N. Ahmed H. Evaluation of operational performance of workover rigs activities in oilfields. *International Journal of Productivity and Performance Management*. 2013. Vol. 62, No.2, P. 204-218. <http://doi.org/10.1108/17410401311295740>

3. Mansour Haitham, Ahmad Mohammad, Munir Ahtita Fadala. Practical Evaluation Workover Framework (PEWF) for evaluation and process improvement of Workover Rigs in the Oilfields. *Proceedings of the 24th International Conference on Flexible Automation & Intelligent Manufacturing FAIM 2014*. <http://dx.doi.org/10.14809/faim.2014.1153> .

4. Volovetskyi V. B., Shchyrba O. M., & Vytiaz O. Yu. Rozroblennia kompleksnykh zakhodiv, spriamovanykh na pidvyshchennia efektyvnosti vydobuvannia vuhlevodniv pry rozrobttsi rodovyshch na vysnazhennia. *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*. 2014. No 3(52). P. 154–165. [in Ukrainian]

5. Walid Mohamed Mahmud, Saber Kh. Elmabrouk. Rig Selection and Cost Analysis; a Comparison of Top Drive and Rotary Table Drive Rig Systems. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Detroit, Michigan, USA, September 23-25, 2016.

6. Atwa V., Kahutu J. Comparison of drilling technologies between top drive and rotary table in geothermal fields: a case study of Olkaria geothermal fields. *Proceedings 5th African Rift geothermal Conference*, Arusha, Tanzania, October 29-31, 2014.

7. Revenko N.H., Nadtochii I.I., Pulianovych O.V. Udoshkonalennia kontseptualnoho pidkhodu do teoretyko-metodolohichnykh i praktychnykh

zasad rozvytku innovatsiinoho upravlinnia promyslovymy kompleksamy v Ukraini. *Derzhavne upravlinnia ta mistseve samovriaduvannia*. 2021. No. 1 (48). P. 80-91. doi: 10.32782/palg/2021.1.10 [in Ukrainian]

8. Matsko N.H. Upravlinnia rozvytkom vyrobnychoho potentsialu promysloвого pidpriemstva. *Naukovyi visnyk Khersonskoho derzhavnoho universytetu*. 2017. Vol. 23. Iss. 2. P. 69-72. [in Ukrainian]

9. Iashan Yu.V. Napriamky pidvyshchennia efektyvnosti vidtvorennia i vykorystannia osnovnykh zasobiv. *Naukovi pratsi Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Ekonomichni nauky*. 2012.Vol. 22, Iss. II. [in Ukrainian]

10. Semenov S.S. Otsenka kachestva i tehničeskogo urovnya slozhnykh sistem: Praktika primeneniya metoda ekspertnykh otsenok. M.: LENAND, 2015. 352p. [in Russian]

11. Opeyemi Bello, Catalin Teodoru, Ogunlana Oluwafemi, Olatunji Olayiwola. Successful Geothermal Operation Management: *Technology Adoption of Oil and Gas Drilling Rig Systems. GRC Transactions*. 2019. Vol. 43.

12. Andriyanov A.M., Andriyanov P.A., Bur M. Drilling automation based on rigs equipped with the top drive system. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 181 (2018) 012002. doi:10.1088/1755-1315/181/1/012002.

13. Victor Atwa, James Kahutu. Comparison of drilling technologies Between top drive and rotary table in Geothermal fields: a case study of Olkaria geothermal fields. *Proceedings 5th African Rift geothermal Conference*, Arusha, Tanzania, 29-31 October 2014

14. Youhong Sun, Yuanling Shi, Qingyan Wang, Zongwei Yao. Study on speed characteristics of hydraulic top drive under fluctuating load. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018. Vol. 167. P. 277-286.

15. Buchynskyi M.Ia., Svitlytskyi V.M. Systemy verkhnoho pryvodu dlia burinnia ta pidzemnoho remontu sverdlovin. Kyiv: «Interpres LTD», 2004. 78 p.

16. Buchynskyi M.Ia., Cherniavskyi A.M., Buchynskyi A.M. Zastosuvannia pryntsyphu naimenshoi dii pry stvorenni vykonavchykh mekhanizmiv tekhnolohichnykh mashyn. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*. 2020. No. 1(48). P. 66-76.