УДК 681.518.52: 622.24.054.33

ОСОБЛИВОСТІ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОБУРІВ

А.О.Семенцова

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727167,
e-mail: k a f a t p @ u k r . n e t

Стаття присвячена дослідженню статичних характеристик сучасних електробурів за результатами їх експлуатації в умовах Прикарпаття. Показано, що механічні характеристики двигунів електробурів однієї марки відрізняються одна від одної та здебільшого не збігаються із паспортними характеристиками. Це визначає можливість відхилення моменту, cosφ та ККД окремих двигунів однієї марки на декілька відсотків.

Розглянуто характеристики неробочого ходу двигуна електробура Е250-8, а саме, залежності струму неробочого ходу, суми втрат у магнітопроводі і механічних втрат, cosφ від напруги на затискачах двигуна. Подано математичні моделі цих характеристик. Наведено моделі залежностей механічних втрат двигуна від температури нагрівання, перегрівання обмотки двигуна від кількості охолоджувальної рідини, усталеного перегріву обмотки двигуна від сили струму, зміни температури обмотки в часі при номінальному навантаженні.

Подано робочі характеристики двигуна електробура в залежності від потужності, що забирається з мережі.

Ключові слова: електробур, робочі характеристики, неробочий хід, перегрів обмоток, механічні втрати, інформаційні моделі.

Статья посвящена исследованию статических характеристик современных электробуров по результатам их эксплуатации в условиях Прикарпатья. Показано, что механические характеристики двигателей электробуров одной марки отличаются друг от друга и по большей части не совпадают с паспортными характеристиками. Это определяет возможность отклонения момента , cosφ и КПД отдельных двигателей одной марки на несколько процентов.

Рассмотрены характеристики холостого хода двигателя электробура Е250-8, а именно зависимости тока холостого хода , суммы потерь в магнитопроводе и механических потерь , cosφ от напряжения на зажимах двигателя. Подано математические модели этих характеристик . Приведены модели зависимостей механических потерь двигателя от температуры нагрева , перегрева обмотки двигателя от количества охлаждающей жидкости , установившегося перегрева обмотки двигателя от силы тока , изменения температуры обмотки во времени при номинальной нагрузке.

Подано рабочие характеристики двигателя электробура в зависимости от мощности , забираемой из сети.

Ключевые слова: электробур, рабочие характеристики, холостой ход, перегрев обмоток, механические потери, информационные модели.

The article deals with the static characteristics of modern electrodrills based on the results of their operation in the Carpathian Region conditions. It is shown that the mechanical characteristics of the electrodrill engines of the same brand differ from each other and mostly do not coincide with the specifications. This determines the possibility of the torque rejection, cosφ, and efficiency factor of individual engines of the same brand for several percents.

Idle run characteristics of the E250-8 electrodrill engine, and namely the dependences of idle current, total magnetic core and mechanical losses, and cosφ on the engine terminals voltage have been studied. Mathematical models of these characteristics have been specified. The models of dependences of engine mechanical losses on heating temperatures, engine winding overheat on coolant volume, steady engine winding overheat on current strength, and temporal winding temperature change at nominal load have been developed. Electrodrill engine operating characteristics depending on the power taken from power system have been shown.

Keywords: electrodrill, operating characteristics, idle run, winding overheat, mechanical losses, informational models.

Вступ. Техніка і технологія буріння нафтових і газових свердловин розвивається, головним чином, на основі застосування вибійних двигунів. Вони забезпечують високу продуктивність процесу буріння і певний рівень автоматизації проходки вертикальних і розгалуженогоризонтальних свердловин.

Застосування як вибійного агрегату електродвигуна, з'єднаного з долотом, пропонувалося багатьма винахідниками у різних країнах світу, починаючи з 1877 р.[1]. Це обумовлено тим, що порівняно з бурінням свердловин гідравлічними двигунами електробур має суттєві переваги [2]. Найбільшою перевагою електробуру є можливість, завдяки наявності струмопідведення, мати надійний канал для передачі інформації від зануреної телеметричної апаратури з вибою свердловини на поверхню і чітко орієнтувати необхідну траєкторію стовбура свердловини. Окрім цього:

• при бурінні електробурами найбільш повно використовується гідравлічна потужність бурових насосів, яка передається на вибій тільки для промивання, при цьому покращуються

умови очищення свердловини від вибуреної породи, збільшується механічна швидкість буріння та проходка на долото;

• буріння електробуром відбувається за менших тисків у гідравлічній циркуляційній системі, внаслідок чого зменшується зношування бурового обладнання і бурильних труб, а також рівень шуму на буровій;

• при бурінні за допомогою електробура зміна моменту опору на долоті майже миттєво впливає на зміну струму й активної потужності, які контролюються з поверхні, тому є можливість без підіймання колони бурильних труб визначати ступінь зношення опор і озброєння долота і запобігати аварійні ситуації. Відкриваються широкі можливості автоматизації усього технологічного процесу буріння свердловин;

• статичні і динамічні характеристики двигуна електробуру не залежать від його положення у просторі та глибини, на якій він знаходиться. Це дає змогу передавати більшу потужність на великі глибини і в дуже викривлені свердловини.

• електробур – це геометична оливонаповнена електрична машина, робочі органи якої не піддаються дії абразивних часточок бурового розчину;

• ремонт електробурів в основному відбувається здебільшого шляхом заміни торцевих ущільнень та підшипників і триває у два-три рази швидше, ніж ремонт гідравлічних двигунів.

Все це робить електробуріння особливо ефективним при спорудженні горизонтальних, розгалужено-горизонтальних глибоких свердловин, а також при проходці додаткових горизонтальних стовбурів у раніше пробурених свердловинах.

Як зазначено в [2], у наш час, коли ведеться буріння на важкодоступних покладах вуглеводнів, де на порядок збільшується необхідність у бурінні горизонтальних стовбурів свердловин, кращого за електробур вибійного двигуна не існує.

Багато зарубіжних нафтових компаній ФРН, США, Франції працюють над створенням різноманітних систем електробурів, що обумовлено прогресивністю застосування занурного електродвигуна для буріння нафтових і газових свердловин. Так, наприклад, у ФРН видано ряд патентів на електробури і струмовідвід. У США розроблена і пройшла випробовування бурова установка з гнучким кабелем-шлангом, на кінці якого закріплений електробур. Для швидкого і неперервного підйому гнучкого шлангу зі швидкістю 45 м/хв. застосовується спеціальний ретрактор, який складається із нескінченного ланцюга гідравлічних затискачів. Над електробуром на шланго-кабелі працюють у Франції. Установку запатентовано на платформі, яка призначена для буріння на морі [1]. В Україні з 1965 р. створення електробурів для буріння нафтових і газових свердловин почалося на Харківському електромеханічному заводі, а з 1972 р. передано Харківському заводу «Потенціал», котрий є єдиним виробником даного виробу у світі [2]. За роки застосування електробурів найбільший об'єм прийшовся на Башкортостан, де було пробурено близько семи мільйонів метрів гірських порід у 2500 свердловинах. Крім цього, регіону електробуріння застосовувалося у Куйбишевській області Росії, Туркменістані, Азербайджані та в Україні. Всього було пробурено 12,5 мільйонів метрів свердловин. З 2008 р. виробництво електробурів з ряду об'єктивних та суб'єктивних причин було припинено, але у 2013 р. у Харкові почалося створення холдингу «Харківмаш», у який входить завод «Потенціал». Цей завод за своїми можливостями може провести модернізацію і відновити виробництво електробурів.

У процесі впровадження електробуріння вирішувалися складні технічні проблеми. Зокрема, були створені [1]:

• незвична конструкція довгих електродвигунів великої потужності діаметрами 164-290 мм;

• конструкція надійної обмотки вибійного електродвигуна, яка здатна працювати в оливі за умов значних вібрацій і температур;

• п'ята на підшипниках кочення, яка здатна сприймати великі динамічні осьові навантаження;

• ущільнення валів, що обертаються в специфічних умовах функціонування на вибої свердловини;

• струмовідвід підвищеної надійності та ін.

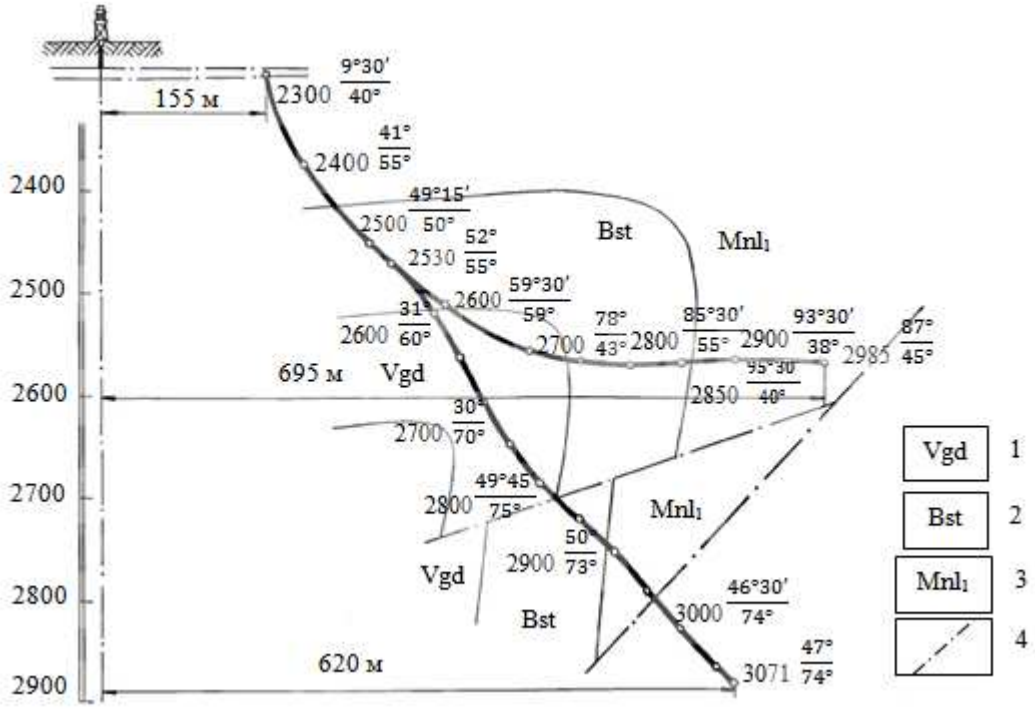
Конструкція сучасного електробура складається із оливонаповненого електродвигуна та з'єднаних з ним редуктора та шпинделя. Для буріння розгалужено-горизонтальних свердловин застосовують механізми викривлення, за допомогою яких у місці приєднання шпинделя до двигуна електробур викривлюється на 1^0; $1{,}5^0$; 2^0. Механізм викривлення монтують між двигуном та шпинделем.

Для контролю за траєкторією свердловин застосовується телеметрична система, яка дає інформацію в режимі on-line про кут нахилу свердловин, азимут і положення відхилювача з врахуванням кута скручування колони від реактивного моменту електробура. Як приклад, на рис. 1 наведено профіль свердловини РГ-350-Д, яка була пробурена на Прикарпатті з використанням системи СТЕ.

Для зменшення швидкості обертання долота і підвищення крутного моменту застосовують редуктори-вставки, які також, як і механізми викривлення, монтують між двигуном і шпинделем.

Технологічний процес буріння свердловин електробурами здійснюється з використанням автоматичного регулятора подачі долота, що з'єднаний з проміжним валом лебідки ланцюговою передачею. Цей регулятор, на відміну від бурильника, плавно подає долото на вибій свердловини, зменшує або збільшує подачу в залежності від завантаження двигуна електробура і буримості породи.

За результатами аналізу сучасного стану проблеми дослідження особливостей статичних



1 – вигідська світа; 2 – бистрицька світа; 3 – нижньоменілітова під світа; 4 – лінії насуву

Рисунок 1 – Профіль свердловини РГ-350-Д, яка була пробурена з використанням системи СТЕ

характеристик сучасних електробурів є актуальною науково-практичною проблемою у зв'язку з необхідністю спорудження горизонтальних та розгалужено-горизонтальних глибоких свердловин, а також буріння додаткових горизонтальних свердловин у раніше пробурених свердловинах за допомогою електробурів.

Виділення невирішених частин. Аналіз літературних джерел [1÷8 та ін.] свідчить про недостатній обсяг проведених досліджень у напрямку вивчення особливостей статичних і динамічних характеристик сучасних електробурів у процесі буріння нафтових і газових свердловин.

Формування цілі. Метою даної роботи є дослідження статичних характеристик сучасних електробурів за результатами їх експлуатації в умовах Прикарпаття й отримання інформаційних моделей.

Результати. На основі вивчення фахової літератури [1÷8 та ін.] та практики експлуатації електробурів в Україні встановлено, що основними характеристиками сучасних електробурів є:

• обертальний момент, що розвивається електробуром на вихідному кінці валу;

• швидкість обертання вихідного кінця валу при тих чи інших значеннях обертального моменту;

• осьове навантаження, яке допускається передавати на долото через корпус електробура й осьові підшипники шпинделя;

• перенавантажувальна здатність, тобто відношення максимального моменту до номінального;

• температура навколишнього середовища, в якій допускається робота електробура при тому чи іншому його завантаженні;

• кількість бурового розчину або повітря, яку необхідно прокачувати через електробур для його охолодження;

• гідравлічні витрати у проточному каналі електробура;

• кут викривлення механізму викривлення та співвідношення довжини електробура і відстані від торця долота до місця згину корпусів.

Окрім цього, напруга живлення, струм навантаження, cosφ, вага і довжина електробура, а також опір ізоляції обмотки статора та ряд інших даних також є характеристиками електробурів.

Розглянемо детальніше характеристики неробочого ходу двигунів електробурів, а також їх робочі і теплові характеристики.

Врахуємо, що електробур має редуктор і тоді швидкість обертання валу електробура дорівнює

$$n = n_{\text{дв}} \frac{1}{i}, \qquad (1)$$

де $n_{\text{дв}}$ – швидкість обертання валу двигуна електробура;

i – передавальне число редуктора-вставки.

Обертальний момент, що розвивається на валу електробура визначається за формулою:

$$M = M_{\text{дв}} i \eta_{\text{ш}} \eta_{\text{р}}, \qquad (2)$$

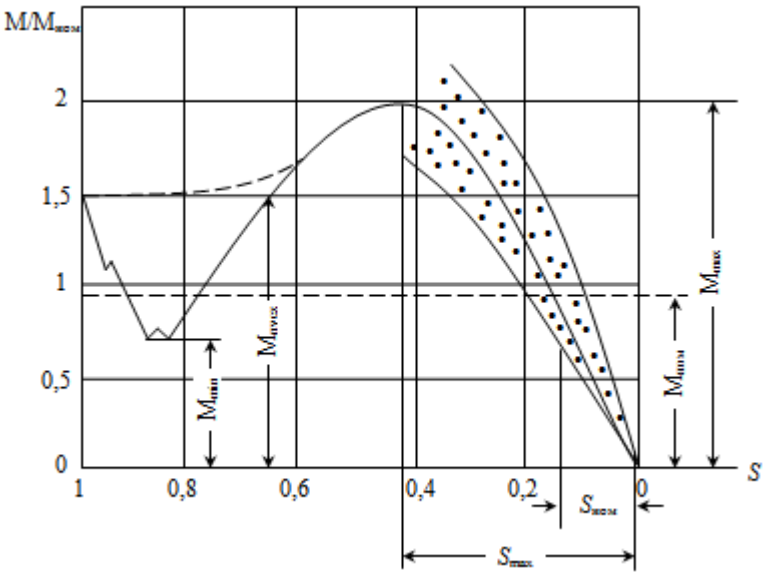


Рисунок 2 – Залежність кратності обертального моменту двигуна електробура від ковзання ротора відносно поля статора

де $M_{дв}$ – обертальний момент, що розвивається на валу двигуна;

$\eta_ш$ – коефіцієнт корисної дії шпинделя;

$\eta_р$ – коефіцієнт корисної дії редуктора.

Відзначимо, що швидкість обертання валу двигуна обумовлюється швидкістю обертання магнітного поля його статора, яке обертається зі швидкістю

$$n_1 = \frac{60 f}{p}, \qquad (3)$$

де f – частота струму;

p – число пар полюсів обмотки статора.

Тоді швидкість обертання ротора двигуна електробура дорівнює

$$n = n_1 (1 - S), \qquad (4)$$

де S – ковзання ротора відносно поля статора.

У двигунах електробурів величина S при номінальному навантаженні складає 8-12%. За зміною навантаження на валу двигуна ковзання S також змінюється. Зміна ковзання для різних двигунів трохи відрізняється за амплітудою, але закономірність зберігається для всіх двигунів електробурів.

Типова крива зміни обертального моменту двигуна електробура в залежності від ковзання при незмінній напрузі на затискачах двигуна відображена на рис. 2.

Після пуску двигун розвиває обертальний момент $M_{пуск}$ (при S=1), що змінюється при розгоні по кривій до деякого значення M_{min}. З набором швидкості обертальний момент досягає максимального значення M_{max} і потім знижується доти, поки не стане рівним моменту опору на валу. Двигун розраховується звичайно для роботи при $M_{ном}$, що відповідає номінальній потужності двигуна, зазначеній у його паспортних даних.

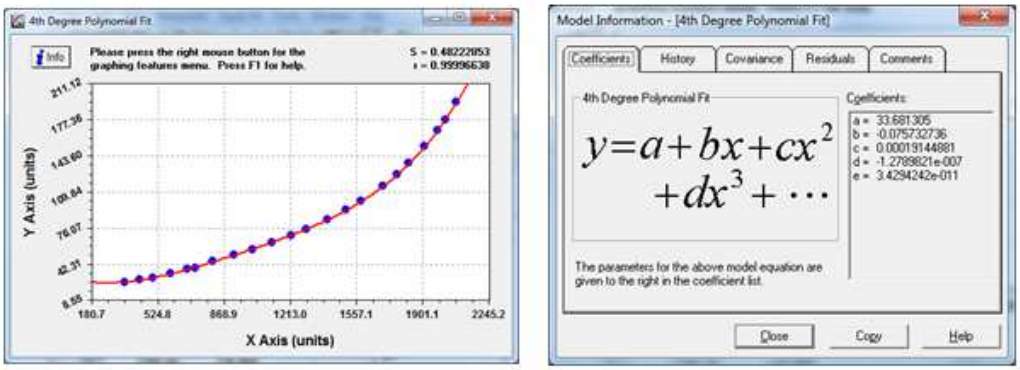
Ці характеристики двигунів електробурів отримують експериментальним шляхом на заводських випробувальних стендах і вони вважаються однаковими для усіх двигунів електробурів однієї марки. Таке уявлення про сталість та однаковість паспортних характеристик є зручним для проектувальників технологічного процесу буріння з використанням електробурів. Проте на практиці такий підхід не оптимальний, оскільки, реальні механічні характеристики двигунів електробурів однієї марки відрізняються одна від одної та здебільшого не збігаються із паспортними характеристиками.

Коливання у межах конструкторських допусків діаметра ротора, зазорів між статором і ротором та інших параметрів впливають на обертальний момент двигуна електробура. Оскільки сукупність усіх цих чинників є суто індивідуальною для двигуна електробура, кожний з них має виключно свою індивідуальну механічну характеристику, а для механічних характеристик окремих двигунів однієї марки маємо широке поле обертальних моментів (див. рис. 2).

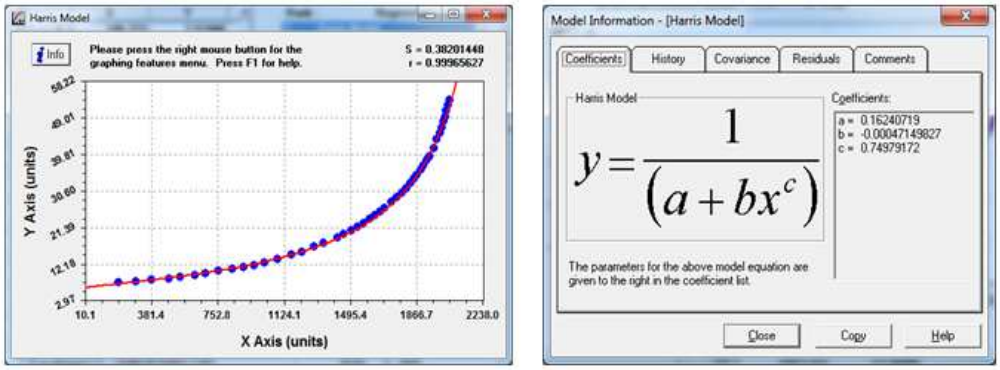
Отже, паспортні механічні характеристики двигунів електробурів є усередненням параметрів великої кількості індивідуальних механічних характеристик окремих однотипних двигунів. Це визначає можливість відхилення моменту, cosφ та ККД окремих двигунів однієї марки на декілька відсотків.

При тривалій роботі двигуна на номінальній потужності, як правило, нагрів обмотки статора близький до граничного, що допускається для застосувальної ізоляції. У випадку порушення рівноваги моменту опору на валу й обертального моменту, що розвивається двигуном, внаслідок збільшення моменту опору двигун розвине обертальний момент при певному незначному зниженні швидкості обертання і настане інший рівноважний стан при більшій потужності, що розвивається двигуном.

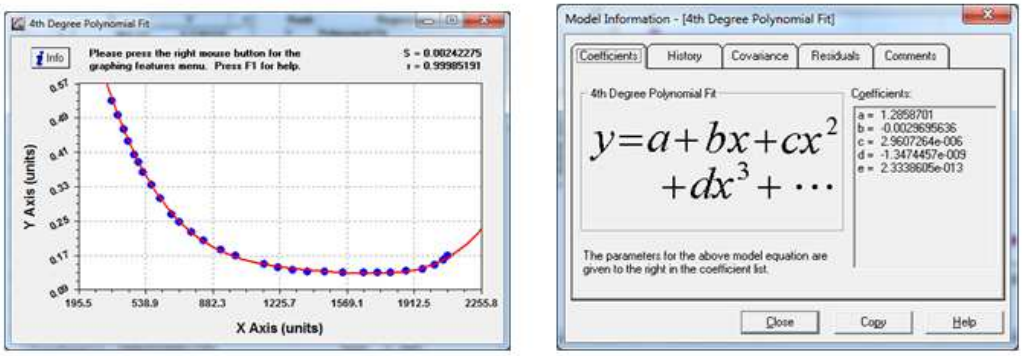
З огляду на викладене, при роботі електробура на великих глибинах необхідно підтриму-



а) залежність струму неробочого ходу двигуна від напруги на його затискачах;



б) залежність суми втрат у магнітопроводі і механічних втрат від напруги на затискачах двигуна;



в) залежність $\cos\varphi_0$ від напруги на затискачах двигуна

Рисунок 3 – Характеристики неробочого ходу двигуна електробура Е250-8

вати на затискачах двигуна трохи підвищену напругу (на 5-10%). Це доцільно використовувати, головним чином, для компенсації втрати напруги при короткочасних перевантаженнях, коли внаслідок збільшення струму зростає втрата напруги в струмовідводі і зменшується напруга на затискачах двигуна електробура. Необхідна напруга з урахуванням його падіння в струмовідводі встановлюється за допомогою спеціального перемикача, змонтованого на кришці силового трансформатора, що живить електробур.

У зв'язку з тим, що магнітна система двигунів електробурів близька до насичення підвищення напруги на затискачах двигуна понад номінальну веде до швидкого зростання струму неробочого ходу двигуна електробура. На рис. 3 наведено характеристики неробочого ходу двигуна електробура Е250-8 [1]та їх інформаційні моделі. З рисунка видно, що за номінальної напруги на затискачах двигуна 1650 В струм неробочого ходу складає 110 А. Величина струму неробочого ходу двигуна електробура з приєднаним до нього оливонаповненим шпинделем незначно відрізняється від величини струму неробочого ходу двигуна електробура без приєднаного шпинделя. Оскільки втрати потужності при неробочому обертанні оливонаповненого шпинделя у нагрітому стані незначні, практично струм неробочого ходу електробура можна приймати рівним струму неробочого ходу двигуна.

Бачимо, незначне підвищення напруги на затискачах призводить до швидкого зростання

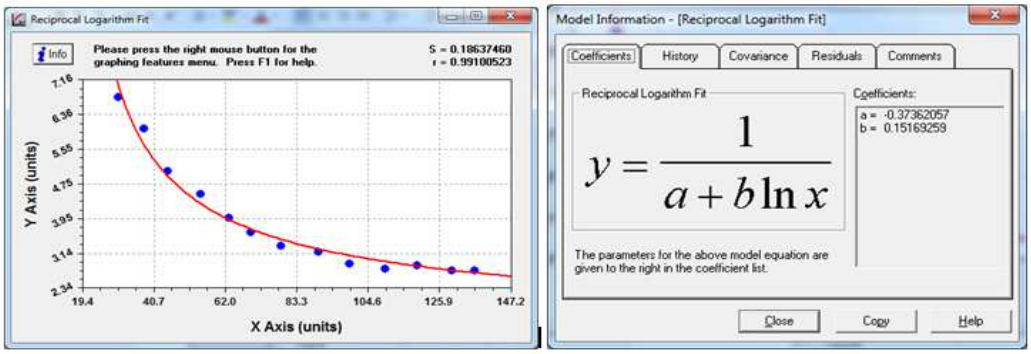
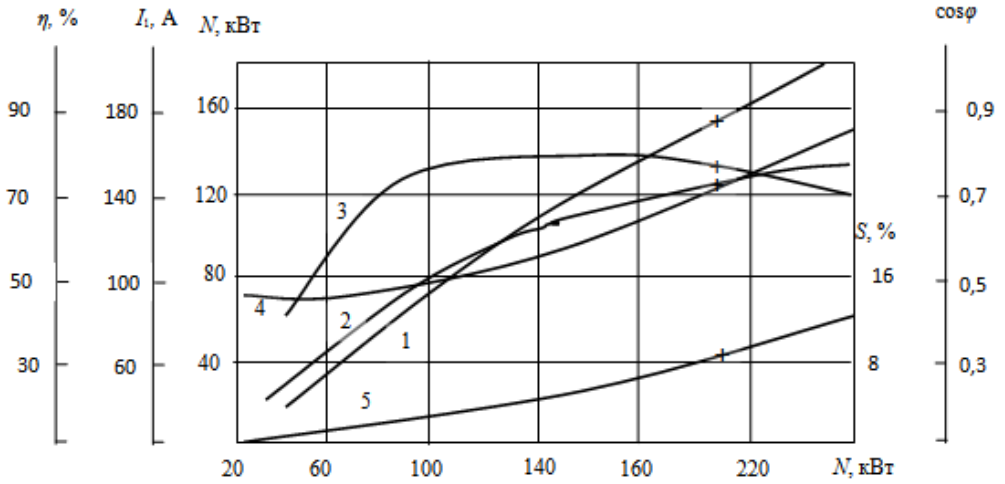


Рисунок 4 – Залежність механічних втрат $N_{мх}$, кВт двигуна електробура Е170 від температури нагрівання (двигун наповнений трансформаторною оливою) та інформаційна модель



1 – потужність на валу двигуна N; 2 – cosφ; 3 – η; 4 – струм статора I_1; 5 – ковзання S

Рисунок 5 – Робочі характеристики двигуна електробура Е215-8 залежно від потужності, що відбирається з мережі

струму неробочого ходу. Так, збільшення напруги на затискачах двигуна з 1650 до 1750 веде до підвищення струму неробочого ходу з 110 до 118 А. Збільшення струму неробочого ходу двигунів електробурів спостерігається на великих глибинах, тому що звичайно для компенсації підвищеної втрати напруги при пусках і перевантаженнях встановлюють підвищену напругу живлення.

Оскільки характеристики неробочого ходу знімаються за температури обмотки двигуна 32-36^{0}С (ця температура встановлюється у режимі неробочого ходу двигуна), то характеристики неробочого ходу при температурі 75^{0}С, прийняті стандартом, чи при температурі 130^{0}С, що відповідає номінальному режиму роботи двигуна, трохи відрізняється від приведених характеристик. Це пояснюється, головним чином, збільшенням опору обмоток і зниженням в'язкості оливи, що наповнює двигун. Втрати в обмотках зростають, втрати на тертя в оливі зменшуються. Оскільки зміни втрат на тертя і в обмотках здебільшого компенсують одна одну, то відмінності потужностей двигуна при зміні його температури незначні.

Характерну зміну втрат на тертя у двигуні електробура, наповненому трансформаторною оливою, залежно від нагрівання, наведено на рис. 4 для двигуна електробура Е170.

Розглянемо робочі характеристики двигуна електробура за кривими зміни струму, обертального моменту, потужності на валу двигуна, ККД, cosφ у залежності від потужності, що забирається електродвигуном з мережі.

На рис. 5 показані робочі характеристики двигуна електробура Е215-8. Слід відзначити, що характер зміни приведених на графіках параметрів аналогічний і для двигунів електробурів інших типів.

Для електробура з оливонаповненим шпинделем внаслідок невеликих втрат у підшипниках кочення практично можна приймати величину обертального моменту на валу електробура за робочими характеристиками його двигуна.

Розглянемо особливості теплових характеристик двигунів електробурів для того, щоб відповідно до конкретних теплових умов свердловини у кожному окремому випадку мати можливість оцінювати допустиме завантаження двигуна і за потреби форсувати режим буріння, використовуючи теплові резерви двигунів.

Визначимо, як впливає кількість бурового розчину на температуру нагрівання двигуна при номінальному його навантаженні. На рис. 6

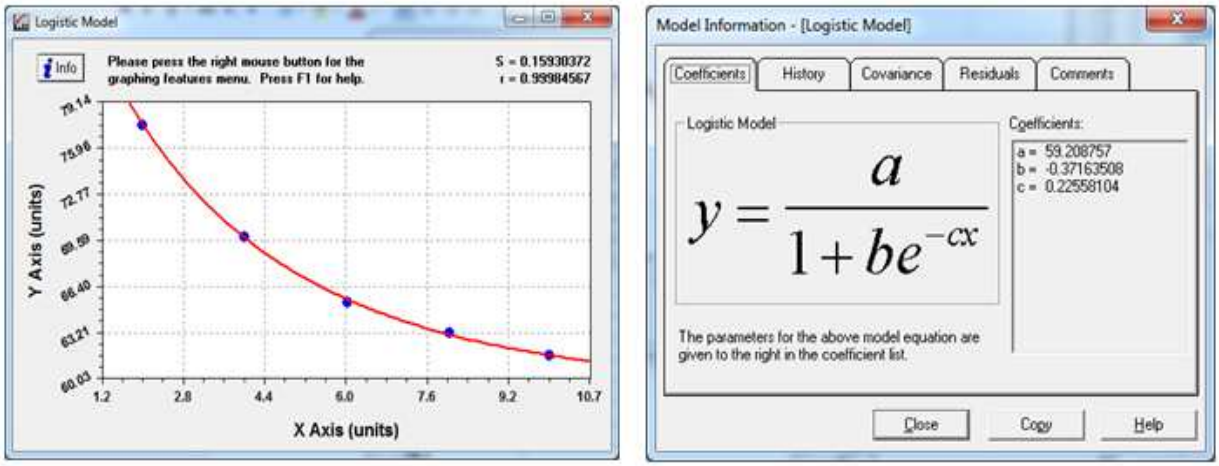


Рисунок 6 – Залежність перегріву τ^0C обмотки двигуна електробура Е250-8 за номінального навантаження від кількості прокачуваної охолоджувальної води Q, л/с і інформаційна модель

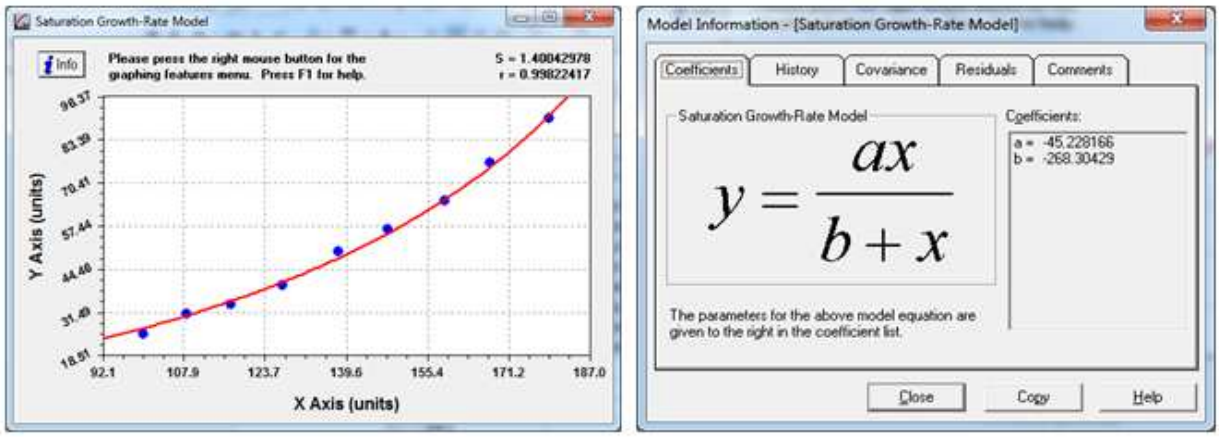


Рисунок 7 – Графік залежності усталеного перегріву τ^0C обмотки двигуна електробура Е250-8 від сили струму *I*, А і інформаційна модель

наведено криву залежності перегріву обмотки двигуна електробура Е250-8 за номінального навантаженнч від кількості прокачувальної охолоджувальної води і інформаційну модель. З рисунка видно, що збільшення кількості прокачувальноїводи понад 8-10 л/с практично не приводить до помітного поліпшення охолодження двигуна. Зі зменшенням продуктивності насосів до 2 л/с нагрівання обмотки підвищується незначно і може допускатися тривалий час без помітної шкоди для роботи двигуна.

Залежність усталеного перегріву обмотки статора від сили струму для двигуна електробура Е250-8 та інформаційна модель наведено на рис. 7. За кривою і температурою навколишнього бурового розчину можна встановити допустимий струм навантаження двигуна, при якому обмотка не буде нагріватися вище допустимої температури. Наприклад, якщо двигун електробура Е250-8 охолоджується буровим розчином, що має температуру $\theta_{зцм}$ = +40^{0}С, то допустимий перегрів обмотки буде складати τ = 130-140=90^{0}С.

За кривою (рис. 7) визначимо силу струму, що відповідає цьому нагріванню, тобто 180 А. Для практичних цілей дуже важливо знати, за який час при номінальному навантаженні температура обмотки двигуна нагрівається і досягає сталого значення.

На рис. 8 наведено криву залежності перегріву обмотки статора від тривалості нагрівання двигуна електробура Е250-8. Стала часу нагрівання цього двигуна електробура T= 3,75 хв. Практично усталене значення перегріву обмотки при номінальному навантаженні настає через $t = 4T = 4 \cdot 3{,}75 = 15$ хв.

Розглянуті взаємозв'язки є статичними характеристиками електробурів.

Висновок

На основі аналізу особливостей статичних характеристик сучасних електробурів отримано моделі, які описують ті статичні властивості електробурів, а саме характеритики неробочого ходу, залежність механічних втрат від температури нагріву, робочі характеристики, закономірності перегріву обмоток двигуна, що дає змогу моделювати усталені режими процесу буріння не тільки вертикальних, але й горизонтальних та розгалужено-горизонтальних нафтових і газових свердловин електробурами.

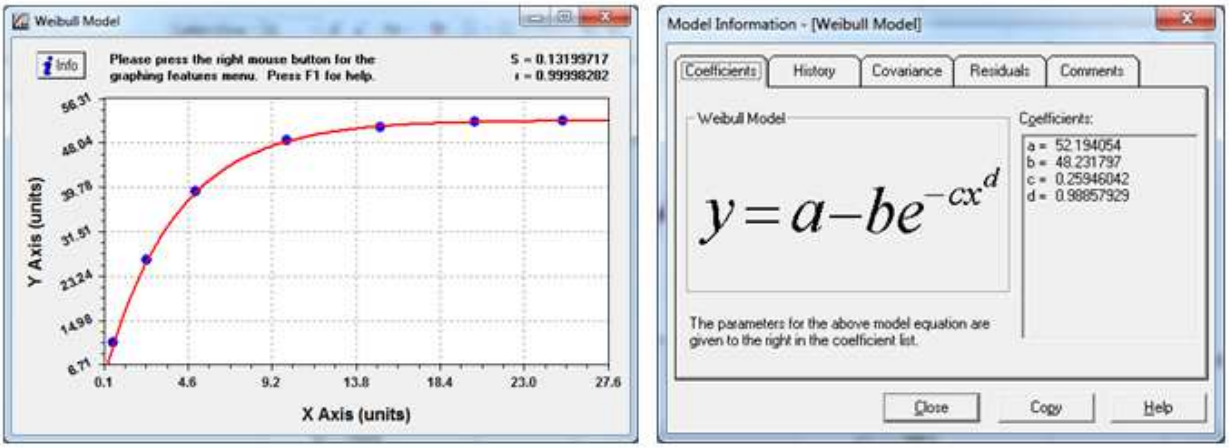


Рисунок 8 – Графік залежності в часі *t*, хв., температури τ^0С нагрівання обмотки статора двигуна електробура Е250-8 при номінальному навантаженні

Література

1 Фоменко Ф. Н. Бурение скважин электробуром / Ф. Н. Фоменко. – М.: Недра, 1974. – 272 с.

2 Діхтяренко К.В. Перспектива відродження електробуріння / К.В.Діхтяренко, В.П.Червінський // Нафта і газ України: матеріали 9-ої міжнар. наук.-практич. конф. «Нафта і газ України – 2013», м. Яремча, 4-6 вересня 2013 р. – Л.: Центр Європи, 2013. – С.59-60.

3 Семенцова А.О. Энергетические показатели и повышение эффективности использования погружного электропривода при бурении скважин: автореф. дис. на соискание уч.степени канд. техн.наук; спец. 05.09.03 – электрооборудование (промышленность). – А.О.Семенцова. Ивано-Франковск, 1984. – 19 с.

4 Семенцова А. О. Аналіз методів і засобів автоматизованого контролю енергетичних показників занурного електроприводу, що використовується при бурінні свердловин / А. О. Семенцова, О. В. Фадєєва // Академічний вісник. – 2004. – №13. – С.108-109.

5 Семенцова А.А. Средства контроля момента на долоте, осевой нагрузки и частоты вращения долота при бурении наклонно-направленных скважин электробурами / А.А.Семенцова // Автоматизация и телемеханизация нефтяной промышленности. – 1982. – № 3. – С. 7-8.

6 ДСТУ 3258-95 (ГОСТ 1586-96). Електробури. Загальні технічні умови. – Київ: Держстандарт України. – 25 с.

7 Бунчак З. Електробур. Парадокси і реальність / З.Бунчак, О.Дудар, О.Кекот, О.Турянський // Електроінформ. – 2003. – № 4. – С. 8-11.

8 Назаренко М.В. Теоретичні засади та принципи побудови моделей динамічних процесів та їх регуляторів: монографія / М.В.Назаренко. – Кривий Ріг: Діоніс (ФОП Чернявський Д.О.). – 2010. – 204 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії 21.10.13
Рекомендована до друку професором ***Костишиним В.С.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)*
професором ***Петришиним Л.Б.*** *(Прикарпатський національний університет, ім. В. Стефаника, м. Івано-Франківськ)*