УДК 681.516.77:622.24.054

СУМІСНІ МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОБУРІВ І ДОЛІТ

Л.О. Копистинський

ІФНТУНГ; 76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15, тел. (097) 7132238,
e-mail: kafatp@ukr.net

Запропоновано інформаційні моделі електробурів, які ґрунтуються на сумісних механічних характеристиках двигунів електробурів і доліт. На основі цих моделей запропоновано аналізувати показники якості і стійкості системи автоматичного регулювання струму або активної потужності електробурів. З'ясовано причини нестабільності роботи електробурів, що дало змогу виявити причини зміни їх параметрів, з'ясувати які еквівалентні параметри системи управління змінюються і, що змінюється в об'єкті керування.

Ключові слова: буріння, електробур, механічні характеристики, інформаційна модель, причини, нестабільність роботи.

Предложено информационные модели электробуров, основанные на совместных механических характеристиках двигателей электробуров и долот. На основе этих моделей предложено анализировать показатели качества и устойчивости системы автоматического регулирования тока или активной мощности электробуров. Выяснены причины нестабильности работы электробуров, что позволило выявить причины изменения их параметров, выяснить которые эквивалентны параметры системы управления меняются и изменяющейся в объекте управления.

Ключевые слова: бурение, электробур, механические характеристики, информационная модель, причины, нестабильность работы.

The information models of electric drills, which are based on the common mechanical characteristics of electric drills and bore bits are proposed. Based on these models, it is proposed to analyze the quality and stability indexes of the system of automatic regulation of current or actual power of electric drills. The reasons of instability of the electric drills operation have been found, which made it possible to find out the reasons for changing their parameters, to find out which equivalent parameters of the control system are changing and what is changing in the controlled object.

Keywords: drilling, electric drill, mechanical characteristics, information model, causes, instability of operation

Постановка проблеми. З існуючих наукових досліджень [1, 2, 3, 4, 5, 6 та ін.] відомо, що явища, які супроводжують процес буріння свердловин електробурами, вивчені недостатньо: не до кінця з'ясовані характер і механізм процесу руйнування гірських порід і основні параметри, що визначають процес буріння; не встановлено характер великої кількості факторів, що впливають на величину момента на долоті. Все це не дозволяє з достатньою точністю визначити величину статичного моменту долота і встановити закономірність зміни величини моменту на долоті в функції різних змінних. Відомо також, що швидкість n долота, осьове навантаження F на долото, зношеність озброєння ε і опор долота g, буримість породи та інші параметри суттєво впливають на зусилля, що виникають на валі долота і визначають величину статичного моменту. Проте, розроблення адаптивної системи керування процесом буріння електробурами, що відповідає сучасним вимогам технології буріння, а також підвищення швидкості проходки свердловин з додержанням технічних і економічних норм обумовлюють необхідність уточнення статичних характеристик доліт та сумісних механічних характеристик електробурів.

Отже, важливою задачею є встановлення зв'язку між моментом навантаження електробурами і швидкістю долота з урахуванням основних факторів, які визначають механічні характеристики долота і двигуна електробура.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню проблеми формування механічних характеристик електробурів як статичних моделей об'єкта керування приділяє увагу багато вітчизняних й іноземних науковців. Теоретичні основи побудови механічних характеристик асинхронних двигунів, якими є двигуни електробурів, заклав Клосс [7,8,9]. Наукові погляди на побудову механічних характеристик електробурів представлені у працях [1,2,10,11,12]. Водночас у працях зазначених авторів не приділяється увага питанням створення базової статичної моделі електробурів для задач автоматизованого управління. У той час як від обґрунтування статичної моделі електробура значною мірою залежать показники якості і стійкості системи автоматичного регулювання активної потужності або струму навантаження електробура. Тож обрана тема наукових досліджень є актуальною на сучасному етапі розвитку буріння свердловин електробурами на сланцеві поклади в країні.

Основні результати дослідження. Відзначимо, що для широкого класу виконавчих механізмів залежність моменту виконавчої машини від швидкості обертання має такий вигляд [2]:

$$\frac{M_0}{M_н} = \frac{M_m}{M_н} + \left(1 - \frac{M_m}{M_н}\right)\left(\frac{n}{n_н}\right)^{K-1}, \qquad (1)$$

де M_0, $M_т$, $M_н$ – статичний момент, момент тертя і номінальний момент виконавчого механізму;

n, $n_н$ – поточне і номінальне значення швидкості;

K – постійний коефіцієнт, K = 0,1,2,3...

За умов незначних змін швидкості долота механічну характеристику долота можна описати формулою (1) шляхом вибору відповідної величини K. Проте ця характеристика буде адекватною лише для конкретного випадку і долота, а отже, не є універсальною. Коефіцієнт K необхідно визначати для конкретних умов.

Для встановлення математичного зв'язку між моментом і швидкістю обертання долота слід врахувати вплив усіх факторів, що супроводжують процес руйнування породи. Оскільки це неможливо, то обмежимося урахуванням лише основних факторів, які найбільш суттєво впливають на величину моменту і механічну характеристику долота.

Складемо рівняння балансу механічної енергії, що підводиться до долота:

$$W_{дол} = W_м + W_н, \qquad (2)$$

де $W_{дол}$ – механічна енергія, що підведена до долота;

$W_м$ – механічна енергія, що витрачається на процес буріння;

$W_н$ – механічна енергія, обумовлена переміщенням точки прикладання навантаження на долото.

Відомо [2], що

$$W_{дол} = A\left[\frac{2\pi n}{60}\int_0^t M dt + Fh\right], \qquad (3)$$

де A – термічний еквівалент механічної роботи, ккал/кг·м;

h – проходка на долото за час буріння t, с.

Тоді з (3) отримаємо

$$M_{дол} = \frac{60}{2\pi n}\left(\frac{P_{дол}}{A} - F\frac{h}{t}\right), \qquad (4)$$

де $P_{дол}$ – потужність на валі долота.

Тепер розглянемо зміну потужності $P_{бур}$, що витрачається на буріння. Якщо відома буримість породи, то [2]

$$P_{бур} = \frac{\beta}{K'} f \frac{h}{t} d^2, \qquad (5)$$

де $\beta = \dfrac{2h_{сер}}{d_{ш.сер}}$ – коефіцієнт, який враховує зміну діаметра свердловини при бурінні;

$h_{сер}$ – середня величина кроку зубців озброєння шарошки;

$d_{ш.сер}$ – середній діаметр шарошки;

d – діаметр свердловини;

K' – коефіцієнт пропорційності.

Водночас, відомо [2], що

$$\frac{h}{t} = \left[h_0 + c\left(1 + K\lg n\right)\right]n, \qquad (6)$$

де h_0 – проходка на долото, що відповідає осьовому навантаженню F_0; при $F \le F_0$ величина h_0 не залежить від n;

c – коефіцієнт, що залежить від осьового навантаження F, механічних властивостей породи та геометричних розмірів долота;

K – коефіцієнт, який залежить від глибини руйнування породи і для різних порід має своє значення.

З рівнянь (4), (5), (6) отримаємо

$$M_{дол} = \frac{60}{2\pi}\left[h_0 + c\left(1 - K\lg n\right)\right]\left(\frac{\beta t d_д^2}{K'A} - F\right). \qquad (7)$$

Оскільки $M = 975\dfrac{N}{n}$ [7], то використовуючи рівняння (5) і (7), отримаємо

$$M_{дол} = 3F\left(h_0 + c\right) - 3FcK\lg n. \qquad (8)$$

Цей вираз є рівнянням механічної характеристики долота.

На рис. 1 зображена крива 1 зміни моменту на долото залежно від швидкості обертання, побудована за рівнянням (8). Для порівняння додатково наведені криві механічної характеристики 2 для випадку, коли швидкість регулюється за постійної потужності і крива 3 за постійного моменту.

Інформаційні моделі механічних характеристик (1), (2) долота наведені на рис. 2.

Для порівняння впливу різних механічних характеристик долота на сумісну механічну характеристику електробура розглянемо це питання на прикладі механічної характеристики електробура ЕП240-8-В5 [13].

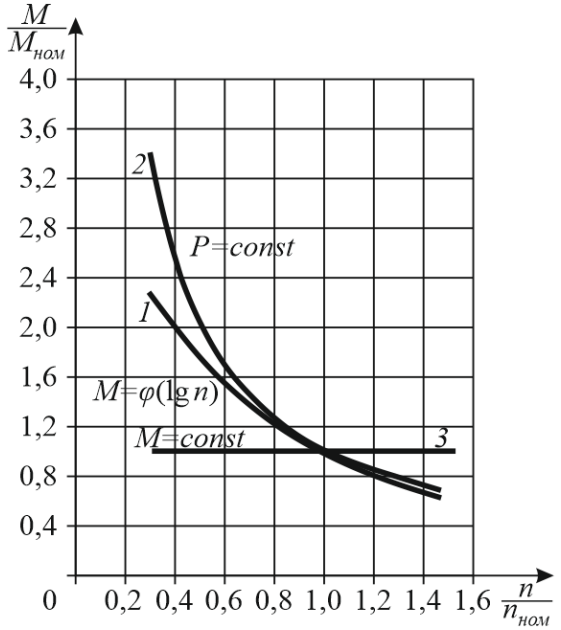
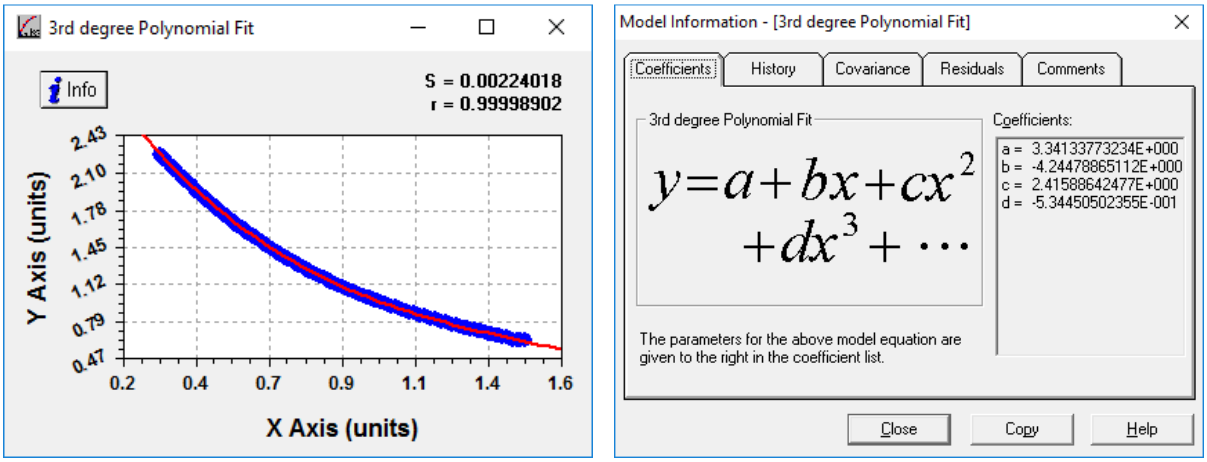


Рисунок 1 – Механічні характеристики шарошкових доліт

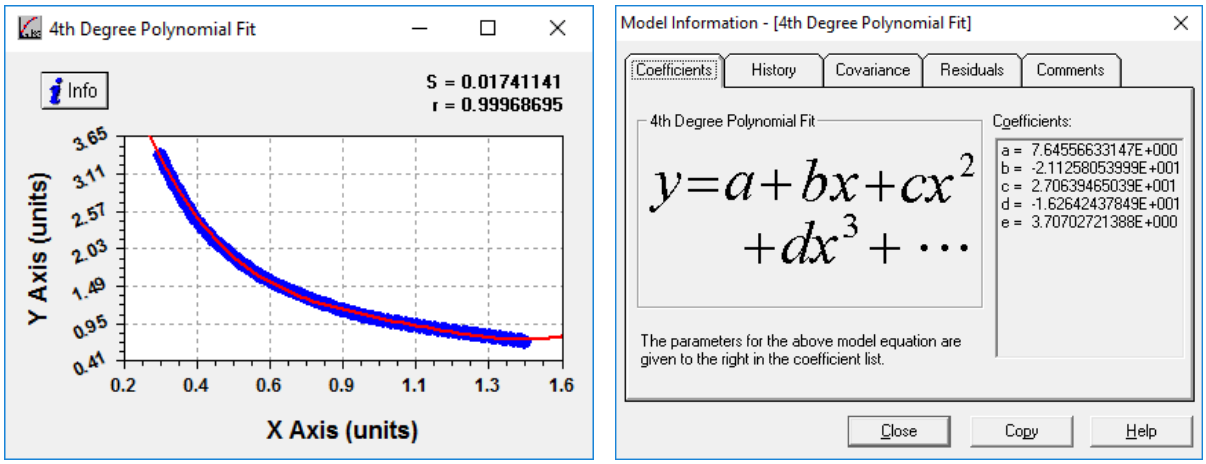
Механічна характеристика (1) електробура ЕП240-8-В5 наведена на рис. 3. Вона побудована за паспортними даними занурного двигуна за допомогою рівняння Клоса [12].

На рис. 4 подані інформаційні моделі механічних характеристик занурного двигуна та долота, побудовані за допомогою програмного середовища CurveExpert.

ISSN 1993–9868 print
ISSN 2415–3109 online

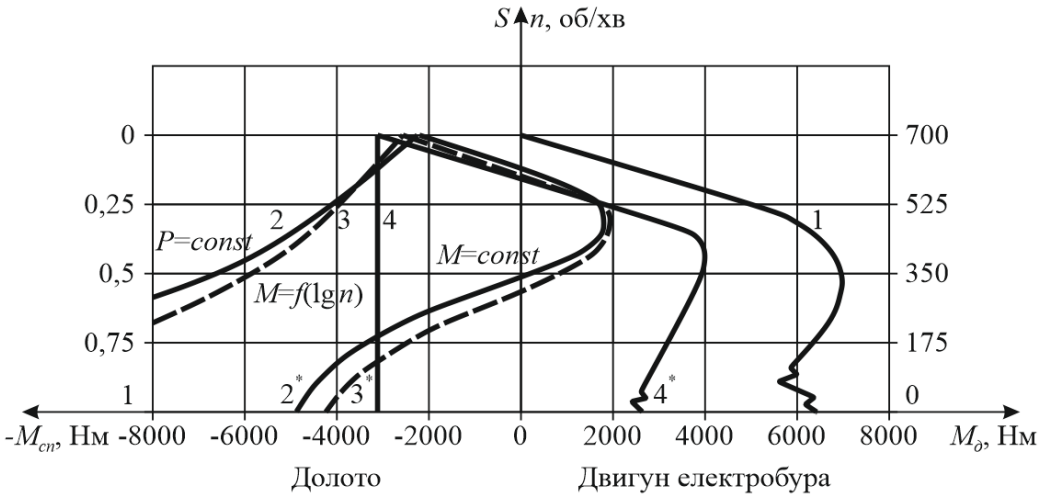


Для 1 – $M = f(\lg n)$



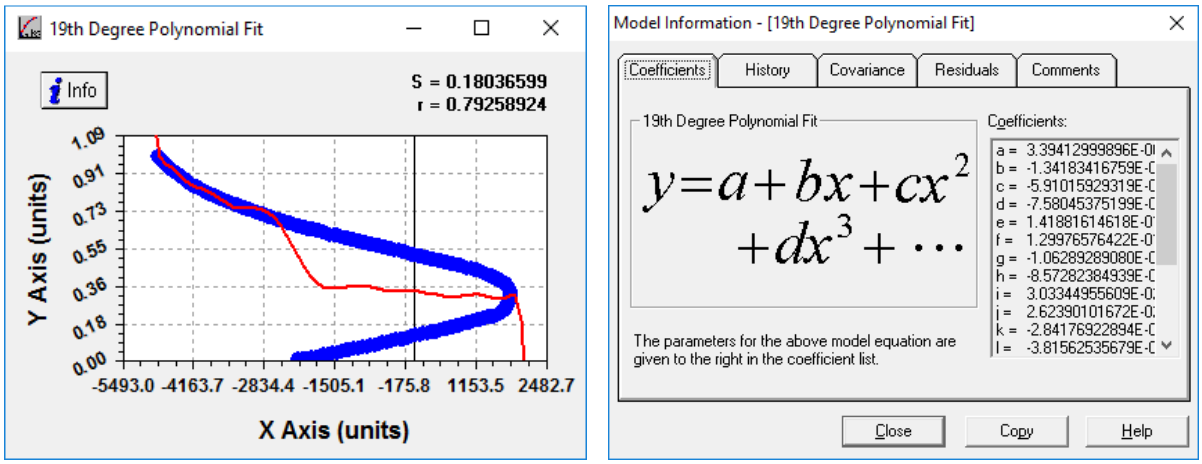
Для 2 – $P = const$

Рисунок 2 – Вікна програмного середовища Curve Expert для інформаційних моделей механічних характеристик долота (1) і (2)

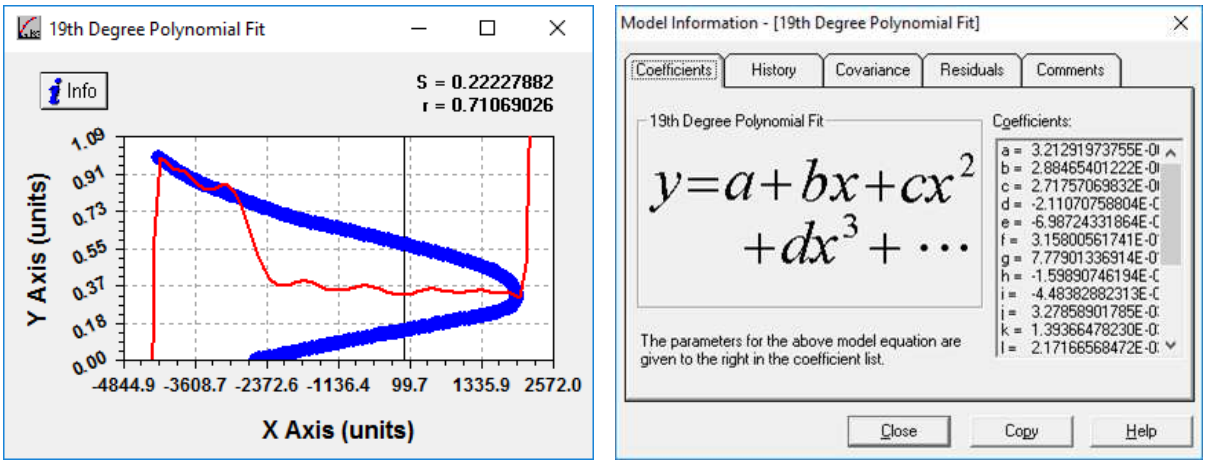


потужність номінальна $P_{ном}$ = 210 кВт, напруга номінальна – 1700 В, струм номінальний I = 144 А, номінальна швидкість – 690 об/хв, $M_{ном}$ = 2800 Нм, M_{max} = 7000 Нм, ККД = 75 %, cos φ = 0,66, маса – 3639 кг

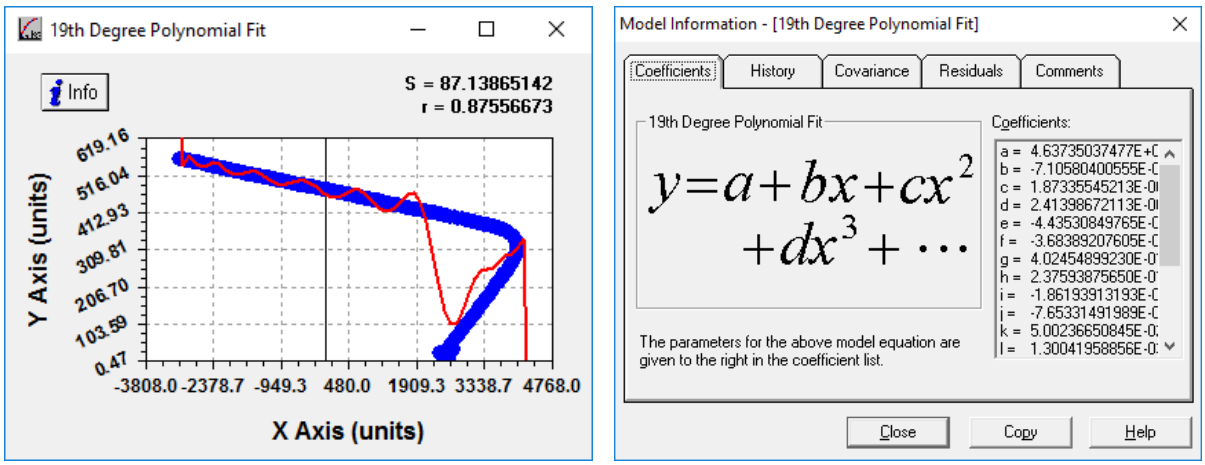
Рисунок 3 – Механічні характеристики занурного електродвигуна (1) і долота (2, 3, 4) при різних законах керування і сумісні механічні характеристики (2*, 3*, 4*) для електробура ЕП240-8-В5



Для 2*



Для 3*

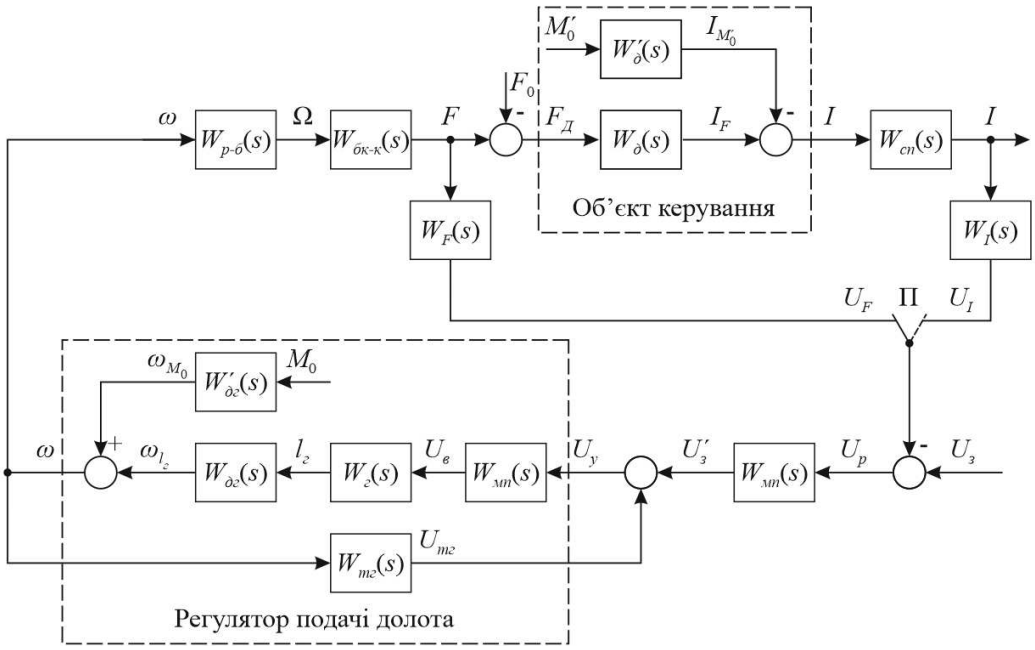


Для 4*

Рисунок 4 – Вікна програмного середовища CurveExpert для інформаційних моделей сумісних механічних характеристик двигуна електробура та долота

Сумісні механічні характеристики електробура побудовані для трьох механічних характеристик доліт – 2 – $P = const$, 3 – $M = f(\lg n)$, 4 – $M = const$. Аналіз характеристик показує, що з точки зору забезпечення потужності на валі електробура, для оптимального руйнування породи доцільно використовувати долота з механічними характеристиками (2) або (3). Жорсткість сумісних механічних характеристик електробура при цьому майже однакова й інформаційні моделі (рис. 3) забезпечують їх апроксимацію з високим коефіцієнтом кореляції r = 0,999 і середньоквадратичними відхиленнями для $M = f(\lg n)$ – S = 0,002, для $P = const$ – S = 0,017.

ISSN 1993–9868 print
ISSN 2415–3109 online



П– перемикач режимів роботи

Рисунок 5 – Алгоритмічна структура системи автоматичного керування активної складової струму статора двигуна електробура (або ваги бурильної колони на гаку) з використанням регулятора подачі долота типу АВТ-2

Отже, побудовані інформаційні моделі адекватно описують зв'язок між поточними значеннями моменту і швидкості двигуна електробура, що дозволяє використати їх у системі online моніторингу й адаптивного управління.

Можливість здійснення процесу адаптації в системі електробуріння ґрунтується на вивченні властивостей навколишнього середовища і об'єкта керування та використання результатів цього вивчення для відповідної зміни алгоритму функціонування системи. Адаптацію доцільно застосовувати в системах автоматичного управління процесом електробуріння, оскільки зміни структури і параметрів керування в процесі поглиблення свердловин передбачити неможливо.

Відзначимо, що електробури в сукупності з автоматизованою системою управління та інформаційним і програмним забезпеченням є сучасною мехатронною системою, що має складні динамічні властивості та містить різноманітні лінійні, нелінійні стаціонарні і нестаціонарні ланки: оливонаповнений електродвигун змінного струму, який перетворює електричну енергію в механічну; механічну частину (шпиндель, редуктор, механізм викривлення), що передає перетворену енергію робочому органу електробура – долоту; систему керування, що містить як силове регульоване джерело живлення, так і підсистему, яка забезпечує автоматичну подачу долота. Усі ці елементи створюють єдину електромеханічну (мехатронну) систему, складові частини якої щільно пов'язані між собою. Виходячи з цього, нестабільність роботи електробурів може залежати як від властивостей долота, так і від стану електричної частини привода в процесі поглиблення свердловини.

Розглянемо причини нестабільної роботи електробурів, користуючись алгоритмічною структурою відомої системи стабілізації активної складової струму статора двигуна електробура (або ваги на гаку) типу АВТ-2 [14]. Система залежно від положення перемикача П режимів роботи забезпечує стабілізацію активної складової струму статора двигуна електробура або ваги бурильної колони, що вимірюється на гаку (рис. 5).

Виконавчим механізмом системи є привод Г-Д (генератор-двигун) із збудженням від магнітного підсилювача. Керувальний сигнал $U'_з$ формує електронний підсилювач залежновід величини і знака сигналу розузгодження $U_р$, що дорівнює різниці між напругою $U_з$, пропорційною заданому впливу, та U_I (або U_F), пропорційною струму навантаження (або осьовому навантаженню на долото).

Окрім головного від'ємного зворотного зв'язку в системі стабілізації застосовано від'ємний зворотний зв'язок по швидкості ω двигуна системи Г-Д.

Двигун електробура в алгоритмічній схемі представлений двома ланками з функціями передачі $W_д(s)$ і $W'_д(s)$, вихідні величини яких віднімаються.

Керувальна дія (осьове навантаження на долото $F_д$) від привода подачі передається до електробура через механічну систему – лебідку з редуктором, барабаном $W_{р\text{-}б}(s)$, талеву систему і бурильну колону $W_{бк\text{-}к}(s)$.

Якщо знехтувати величиною відношення ковзання двигуна до його критичного значення, а також коливаннями напруги живлення і частоти змінного струму, то двигун електробура можна розглядати як інерційну ланку першого порядку з функцією передачі [14]

Таблиця 1 – Показники електробурів і коефіцієнти передачі

Найменування показника	Діаметр електробура, мм				
	164	190	215	240	290
Струм номінальний, А	89	125	131	144	165
Осьове навантаження, кН	150	200	160÷180	250÷300	250÷500
Коефіцієнт передачі	0,593	0,625	0,774	0,576	0,55

$$W_{д}(s)=\frac{K_{д}}{T_{д}s+1}, \qquad (9)$$

де $K_{д}$ – коефіцієнт передачі двигуна електробура, А/кН;

$T_{д}$ – електромеханічна стала часу двигуна електробура, с.

Проте ця функція передачі не враховує збурення, що є недосяжними для вимірювання. Крім цього, коефіцієнти передачі електробурів є нестабільні (табл. 1).

Нестабільними також є електромеханічні сталі часу двигунів електробурів різних потужностей, довжини і діаметрів.

Струмопідвід системи «два проводи – труба» (ДПТ), де одним із проводів є бурильна колона, наближено описують [15] функцією передачі безінерційної ланки

$$W_{сп}(s)=K_{сп}, \qquad (10)$$

де $K_{сп}$ – коефіцієнт передачі, А/а; який практично $K_{сп}$ = 1.

Функціонування системи ДПТ характеризується [10] наявністю кількох сотень штепсельних рознімів у місцях згвинчування окремих труб. Конструкція рознімів має обмеження, зумовлені необхідністю їх автоматичного з'єднання при згвинчуванні окремих труб, на яких електробур опускається у свердловину. Причинами нестабільності роботи системи ДПТ є те, що на ізоляцію кабеля впливає амплітуда напруги змінного струму, а через струмопідвід передається не тільки активна потужність, але й реактивна. Труба в системі ДПТ проводить змінний струм приблизно одноміліметровим поверхневим шаром при частоті 50 Гц (ефект витиснення в феромагнетику).

Давач струму – це інерційна ланка першого порядку з невеликим значенням сталої часу [15]:

$$W_{J}(s)=\frac{K_{c}}{T_{c}s+1}, \qquad (11)$$

де K_{c} – коефіцієнт передачі, В/А;

T_{c}– електромеханічна стала часу, с.

Електронний підсилювач є статичною інерційною ланкою першого порядку

$$W_{п}(s)=K_{п}, \qquad (12)$$

де $K_{п}$ – коефіцієнт підсилення, В/В.

Магнітний підсилювач є статичною інерційною ланкою першого порядку

$$W_{мп}(s)=\frac{K_{мп}}{T_{мп}s+1}, \qquad (13)$$

де $K_{мп}$ – коефіцієнт передачі підсилювача, В/В;

$T_{мп}$ – електромеханічна стала часу, с.

Функція передачі генератора постійного струму, згідно з його лінійною моделлю [16], має такий вигляд:

$$W_{г}(s)=\frac{K_{г}}{T_{e}s+1}, \qquad (14)$$

де $K_{г}$ – коефіцієнт передачі генератора, В/В;

T_{e} – електромагнітна стала часу обмотки збудження, с.

Функція передачі двигуна постійного струму за керувальним впливом – ЕРС генератора – дорівнює [16]:

$$W_{дг}(s)=\frac{K_{дг}}{T_{м}T_{я}s^{2}+T_{м}s+1}, \qquad (15)$$

а за збурювальним впливом (моментом навантаження):

$$W'_{дг}(s)=\frac{-K'_{дг}\left(T_{я}s+1\right)}{T_{м}T_{я}s^{2}+T_{м}s+1}, \qquad (16)$$

де $K_{дг}=\frac{1}{C_{e}\Phi_{o}}$ – коефіцієнт передачі двигуна за керувальним впливом;

$K'_{дг}=\frac{r_{я}}{C_{м}C_{e}\Phi_{o}^{2}}$ – коефіцієнт передачі двигуна за збурювальним впливом;

C_{e} – конструктивна стала двигуна;

$C_{м}$ – конструктивна стала двигуна;

Φ_{o} – магнітний потік збудження;

$T_{я}$ – електромеханічна стала часу якірної обмотки;

$T_{м}=\frac{2\pi r_{я}J}{C_{м}C_{e}\Phi_{o}^{2}}$ – електромеханічна стала часу двигуна;

$r_{я}$ – активний опір якірної обмотки;

J – сумарний момент інерції двигуна і приведений до валу двигуна моменту інерції робочого механізму.

Окрім температурної нестабільності опорів обмоток, що змінюються повільно та впливають на сталі часу обмоток збудження і якоря, в системі Г-Д є ще параметри, що змінюються швидко, і нестабільність яких залежить від багатьох факторів. Коефіцієнт передачі $K_{г}$ генератора залежить від нелінійності характеристики «вхід – вихід», сталі часу T_{e}, $T_{м}$, $T_{я}$ також залежать від $U_{у}$, $U_{в}$; опори і індуктивності обмоток є функціонально залежними від фазових координат та керувальних впливів; при регулюванні потоку збудження Φ_{o} змінюються сталі часу і коефіцієнт передачі; навіть за постійного струму збудження не можна стверджувати, що потік збудження Φ_{o} = *const*, оскільки на результуючий потік збудження впливає реакція якоря.

ISSN 1993–9868 print
ISSN 2415–3109 online

Редуктор, барабан лебідки і тахогенератор можна вважати безінерційними ланками з функціями передачі

$$W_{р-б}(s) = K_{р-б}; \quad (17)$$

$$W_{тг}(s) = K_{тг}, \quad (18)$$

де $K_{р-б}$ – коефіцієнт передачі системи «редуктор – барабан лебідки», $^{1/с}/_{1/с}$;

$K_{тг}$ – коефіцієнт передачі тахогенератора, $^{В}/_{1/с}$.

Проте найбільш складною ланкою в системі подачі долота є ланка «бурильна колона – канат талевої системи».

У зв'язку з тим, що бурильна колона має фрактальну структуру і збільшується в процесі поглиблення свердловини, математичний опис її властивостей як елемента системи автоматики є досить складним. У [4] запропоновано систему «бурильна колона – канат» описувати трансцендентною функцією передачі

$$W_{бк-к}(s) = \frac{\gamma}{\gamma W_{бк}(s) - s}, \quad (19)$$

де γ – жорсткість каната, Н/м;

$W_{бк}(s)$ – функція передачі бурильної колони.

Водночас параметри такої ланки змінюють дискретно у міру нарощування труб і збільшення глибини свердловини. Це значно ускладнює використання функції передачі (18) для аналізу системи керування.

Було доведено [4, 17], що для малих глибин (до 250 м) можлива апроксимація функції передачі інерційною ланкою першого порядку

$$W_{бк-к}(s) = \frac{K_{бк-к}}{Ts+1}, \quad (20)$$

а для великих глибин – коливальною ланкою

$$W_{бк-к}(s) = \frac{K_{бк-к}}{T^2 s^2 + 2\zeta Ts + 1}, \quad (21)$$

де $K_{бк-к}$ – коефіцієнт передачі ланки «бурильна колона – канат»;

$T = \sqrt{1{,}5Q_0} \cdot h$ – стала часу ланки;

$\zeta = \dfrac{Q_1}{2\sqrt{Q_0}} \cdot h$ – коефіцієнт загасання;

h – довжина бурильної колони;

$Q_0 = 0{,}38 \cdot 10^{-7}$;

$Q_1 = \dfrac{R}{67{,}46} \cdot 10^{-7}$;

R – коефіцієнт втрат.

Числові значення коефіцієнтів Q_0 і Q_1 визначені [17] для таких умов буріння: зовнішній діаметр бурильних труб D=114,3·10^{-3} м; товщина стінки труби Δ=10^{-2} м; маса погонного метра труби m=26,7 кг/м; модуль Юнга E=20,601·10^{10} Н/м; довжина обважених бурильних труб $h_{ОБТ}$ = 25 м; маса обважених бурильних труб – 156 кг/м; маса занурного двигуна – 3900 кг.

Отже, причинами нестабільності роботи електробурів є:

– зміни коефіцієнтів передачі системи Г-Д (або ТП-Д) механізму подачі долота;

– нестабільність параметрів електромагнітних контурів у колі Г-Д, або ТП-Д (реакція якоря, насичення магнітопроводів, трансформаторів, дроселів, зміна параметрів якірного ланцюга та ін.);

– залежність потоку збудження двигуна від реакції якоря, зсуву щіток з геометричної нейтралі та ін.;

– повторно-короткочасний режим роботи механізму подачі долота.

Ще більше параметри електробура, як об'єкта керування, залежать від його механічної частини при зміні умов роботи – моменту інерції, пружності механічних елементів. Наприклад, при бурінні похило-скерованих свердловин глибиною приблизно 5000 м, а в майбутньому – до 6000 м, як правило, погано відомі гірничо-технологічні умови, фізико-механічні властивості гірських порід, траєкторія руху електробура. Окрім цього, майже невідомі параметри зовнішнього середовища (температура до 200ºС, вібрації, дуже великий гірничий тиск, прискорення на долоті в 100 разів більше g = 9,81 [1]), зношення долота. Отже, причинами нестабільності роботи електробурів є зміни не тільки властивостей електричної частини, але й властивостей механічної частини бурової установки в процесі поглиблення свердловини, а саме:

– зміни моментів інерції, жорсткостей, коефіцієнтів механічних передач;

– нестабільність збурювальних впливів на механічну частину електробура;

– взаємний вплив механічних параметрів механізму подачі долота, бурильної колони і електробура з долотом.

У табл. 2 наведено узагальнені відомості про можливі причини нестабільності роботи електробурів і найбільш характерні особливості зміни їхніх параметрів.

Висновки

Розроблено сумісні механічні характеристики двигуна електробура і шарошкового долота, що дозволило побудувати інформаційні моделі механічних характеристик з коефіцієнтами кореляції 0,71-0,87.

Аналіз причин нестабільності роботи електробурів показав також, що зі зміною осьового навантаження на долото повний струм і активна складова струму статора змінюються несуттєво (відношення робочого номінального струму до струму неробочого ходу за номінальної напруги складає для електробурів різних типів 1,06÷1,36), що пояснюється конструктивними особливостями двигунів електробурів. А збільшення опору в колі статора здійснюється за рахунок струмопідведення. Все це вимагає проведення додаткових досліджень динамічних властивостей бурильної колони, функції передачі електробура з урахуванням недосяжних для вимірювань збурень, вибору іншої керованої величини, створення адаптивної системи керування із змінною структурою.

Таблиця 2 – Причини нестабільності роботи електробурів

Об'єкт керування	Причини зміни параметрів	Зміни в об'єкті керування	Еквівалентні параметри системи, що змінюються
Процес буріння нафтових і газових свердловин електробурами	Технологічна, зміна геометрії свердловини, переміщення електробура, заміна долота, зношування долота, взаємозв'язки з пружними елементами системи (бурильною колоною, талевою системою), зміна потоку промивальної рідини, нелінійність магнітної системи двигуна електробура; недостатня узгодженість параметрів механізму подачі долота з параметрами бурильної колони.	Сумарний момент інерції. Параметри пружного зв'язку між колоною бурильних труб і долотом. Довжина бурильної колони. Довжина струмопідводу	Електромеханічна стала часу. Функція передачі Власна частота коливань бурильного інструменту. Коефіцієнти передачі елементів бурильного інструменту

Література

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

2 Эфендизаде А. А. Частотное управление электробуром / А. А. Эфендизаде. – Баку: Азернешр, 1969. – 261 с.

3 Эскин М. Г. Автоматическое управление забойными двигателями для бурение нефтяных и газовых скважин: автореф. дис. док. техн. наук / М. Г. Эскин. – М.: МИНГ, 1972. – 51 с.

4 Гафиятуллин Р. Х. Некоторые результаты исследование и использование автомата подачи долота для станков геологоразведочного бурения / Р. Х. Гафиятуллин, В. А. Дегтярев, О. Л. Коротный // Автоматика и телемеханика. – 1977. – №3. – С. 163-171.

5 Абизбаев Б. Й. Электробур обеспечивает получение достаточной забойной информации для эффективного управления процессом бурение / Б. И. Абизбаев, Б. В. Байдюк // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 1996. – №10. – С. 7-12.

6 Козловский Е. А. Современные методы и технические средства оптимизации разведочного бурения / Е. А. Козловский, В. Т. Борисович, М. А. Комаров // Итоги науки и техники. Техника геологоразведочных работ. Т. 9. – 1975. – С. 68-69.

7 Ключев В. И. Теория электропривода / В. И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.

8 Атакишиев Т. А. Электроэнергетика нефтяных и газовых скважин / Т. А. Атакишиев, Р. В. Бабаев, А. А. Барьюдин. – М.: Недра, 1988. – 221 с.

9 Ожоган В. А. Электрификация нефтяной и газовой промышленности / В. А. Ожоган, А. С. Чернов, А. А. Семенцова // Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 1984. – 47 с.

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

11 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», (Яремча, 4-6 вересня 2013 р.) – Львів: Центр Європи, 2013. – С. 59-60.

12 Фадєєва О. В. Удосконалення механічної характеристики асинхронного двигуна приводу роторного стола бурової установки / О. В. Фадєєва // Нафтогазова енергетика. – 2009. – № 1(10). – С. 28-33.

13 Электробуры. Руководство по эксплуатации. А03П.610106.001РЭ. – Харьков: ОАО завод «Потенциал», 2002. – 70 с.

14 Вольгемут Э. А. Результаты промышленных испытаний автоматического регулятора подачи долота АВТ-2 для электробурения / Э. А. Вольгемут, И. П. Кепке, М. Г. Эскин // Сер. Машины и нефтяное оборудование. – 1974. – №3. – С. 18-26.

15 Семенцова А. О. Энергетические показатели и повышение эффективности использования погружного электропривода при бурении скважин: автореф. дис. канд. техн. наук; спец. 05.09.03 – Электрооборудование (промышленность). – Свердловск, 1984. – 19 с.

16 Лукас В. А. Теория автоматического управления: учеб. для ВУЗов / В. А. Лукас. – Москва: Недра, 1990. – 416 с.

17 Семенцов Г. Н. Алгоритм расчёта оптимального режима процесса углубления скважин и результаты их промысловых испытаний / Г. Н. Семенцов, М. И. Горбийчук // Автоматизация и телемеханизация нефтяной промышленности. – 1981. – №2. – С. 3-6.

Стаття надійшла до редакційної колегії 10.10.17
Рекомендована до друку професором ***Семенцовим Г.Н.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)*
д-ром техн. наук ***Лопатіним В.В.*** *(Інститут геотехнічної механіки імені М.С. Полякова НАН України, м. Дніпро)*