

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОБУРА

*І.В.Гладь, М.Й.Федорів*

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 48003,  
e-mail: public@nung.edu.ua*

*Показаны методика и результаты экспериментальных исследований энергетических параметров электробура. Предложен способ контроля напряжения на его зажимах.*

*The method and results of experimental researches of power parameters of an electrical drill are shown. The way of the control of voltage on his clips is offered.*

Буріння нафтових і газових свердловин електробуром має суттєві переваги порівняно з бурінням турбобуром та роторним бурінням, головними з яких є жорстка механічна характеристика занурюваного електродвигуна (ЗЕД) електробура, нечутливість до витрати промивної рідини, відсутність втрат потужності на обертання колони бурильних труб (КБТ) та їх низьке механічне зношування, неперервне одержання інформації про викривлення і кут нахилу свердловини від телеметричної системи, можливість контролю крутного моменту на долоті.

Однак низька експлуатаційна надійність ЗЕД електробура зумовлює проведення науково-дослідних робіт, спрямованих на її підвищення [1]. Розробка спеціальних технічних засобів є одним із способів забезпечення високої надійності та ефективності буріння свердловин електробуром.

У роботах [2, 3] обґрунтовано необхідність регулювання напруги живлення електробура у процесі буріння глибоких свердловин. Внаслідок зміни моменту опору долота збільшується струм споживання ЗЕД електробура, тому у фазах системи підведення струму (СПС) до електробура виникають втрати напруги, які відповідно призводять до зменшення напруги на затискачах з ЗЕД. Оскільки обертовий момент ЗЕД є у квадратичній залежності від величини напруги на його затискачах, то у процесі буріння глибоких свердловин суттєво зменшується його перевантажувальна здатність.

Стабілізація напруги на затискачах ЗЕД електробура шляхом регулювання напруги живлення забезпечить його надійне та ефективне функціонування. Застосування контролю напруги на затискачах ЗЕД електробура необхідне для її стабілізації на коливаннях моменту опору долота.

Робота [4] містить спосіб непрямого контролю напруги на затискачах електробура, суть якого полягає у використанні вимірювань на поверхні таких електричних величин як діючі значення фазних струмів, фазних напруг, значення фазних активних потужностей, а також величини активних та індуктивних опорів жил кабелю та КБТ, одержаних у результаті допоміжних вимірювань. Вказані величини одержу-

ють шляхом цифрової обробки миттєвих значень фазних струмів і фазних напруг на початку СПС.

Технічна реалізація запропонованого у роботі [4] способу контролю напруги на затискачах ЗЕД електробура наведена у праці [5]. Система контролю енергетичних параметрів занурюваних електродвигунів містить 7 вимірювальних каналів, 6 з яких використовується для вимірювання фазних струмів і фазних напруг на початку СПС, а 1 – для вимірювання ваги КБТ.

Враховуючи особливість конструкції системи електропостачання електробура (СЕЕ), яка являє собою трифазну систему з ізолюваною нейтраллю та заземленою однією фазою (КБТ), актуальним є питання вимірювання миттєвих значень лінійних напруг між кожною жилою кабелю і КБТ та струмів у жилах кабелю, а саме  $u_{AB}$ ,  $u_{CA}$ ,  $i_B$ ,  $i_C$ , що зменшить кількість вимірювальних каналів з шести до чотирьох. Миттєві значення напруги між жилами кабелю та струму у КБТ можна обчислити так:  $u_{BC} = u_{AB} - u_{CA}$ ,  $i_A = -i_B - i_C$ . Дані залежності справджуються також за наявності вищих гармонік у трифазному електричному колі з ізолюваною нейтраллю [6].

Спосіб контролю напруги на затискачах електробура, для реалізації якого потрібно чотири вимірювальні канали, авторами цієї статті названо способом двох фаз. Аналогічно до роботи [4] в ході реалізації способу двох фаз на основі методу топологічних діаграм (рис. 1) шляхом здійснення наведеної нижче послідовності аналітичних розрахунків обчислюються діючі значення фазних напруг на затискачах ЗЕД електробура.

На основі вимірюваних миттєвих значень лінійних напруг на початку СПС обчислюються їх діючі значення  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$  за період інтегрування  $T$ :

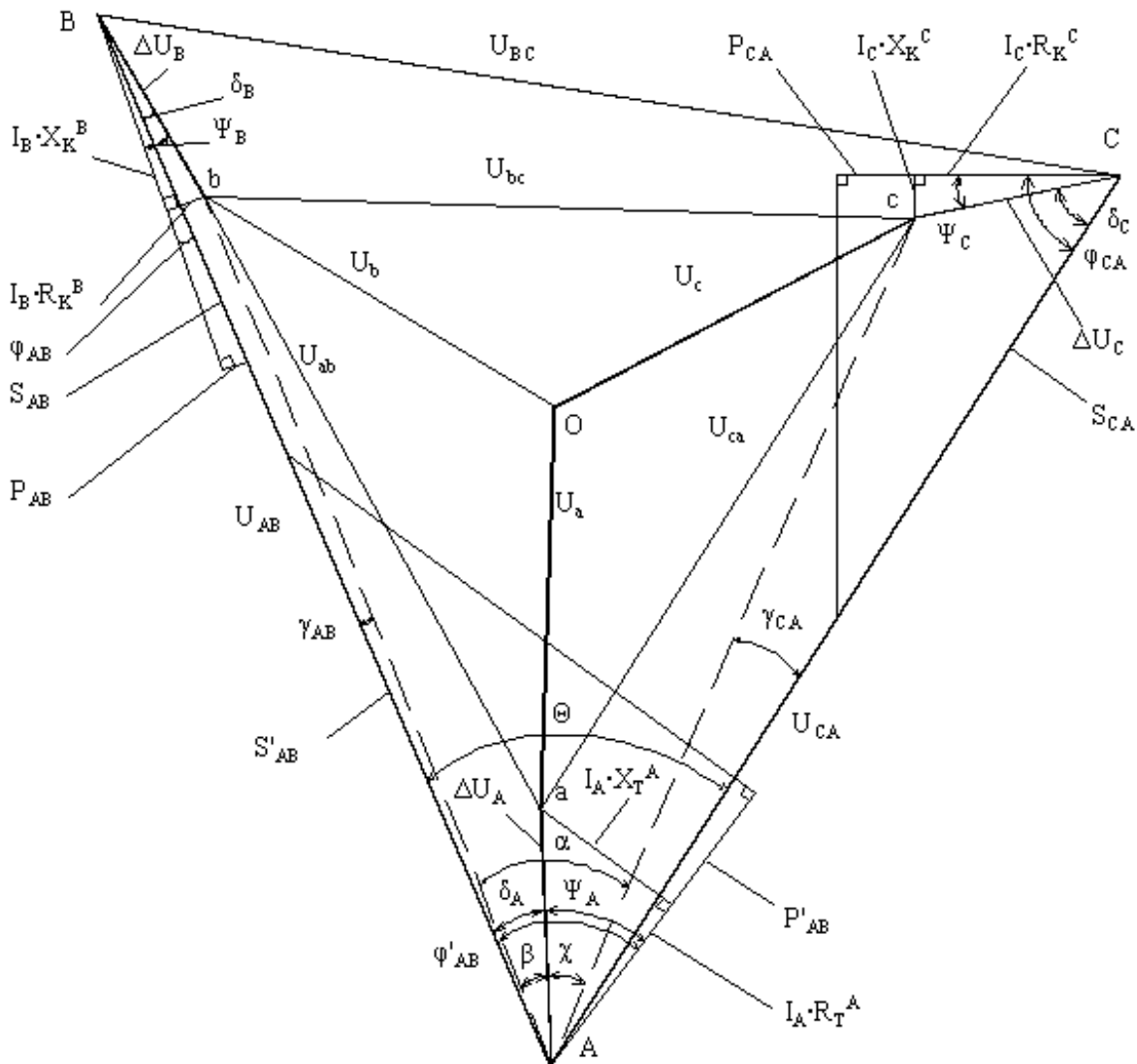


Рисунок 1 — Топологічна діаграма напруг і потужностей у фазах СЕЕ

$$\begin{aligned}
 U_{AB} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int u_{AB}^2 dt}, \\
 U_{BC} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int u_{BC}^2 dt}, \\
 U_{CA} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int u_{CA}^2 dt}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Далі обчислюються діючі значення струмів  $I_A, I_B, I_C$  у фазах СПС за період інтегрування

$$\begin{aligned}
 I_A &= \sqrt{\frac{1}{T} \int i_A^2 dt}, \\
 I_B &= \sqrt{\frac{1}{T} \int i_B^2 dt}, \\
 I_C &= \sqrt{\frac{1}{T} \int i_C^2 dt}.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Обчислюються середні значення активних потужностей  $P_{AB}, P_{CA}$  та фіктивної активної потужності  $P'_{AB}$  на початку СПС, яка необхідна для визначення допоміжних кутів топологічної діаграми, за період інтегрування:

$$\begin{aligned}
 P_{AB} &= \frac{1}{T} \int (u_{AB} \cdot i_B) dt, \\
 P_{CA} &= \frac{1}{T} \int (u_{CA} \cdot i_C) dt, \\
 P'_{AB} &= \frac{1}{T} \int (u_{AB} \cdot i_A) dt.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Обчислюються повні потужності  $S_{AB}, S_{CA}$  кіл АВ і СА відповідно та фіктивна повна потужність  $S'_{AB}$  кола АВ:

$$\begin{aligned}
 S_{AB} &= U_{AB} \cdot I_B, \\
 S_{CA} &= U_{CA} \cdot I_C, \\
 S'_{AB} &= U_{AB} \cdot I_A.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Обчислюються кути  $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C$ , що характеризують співвідношення між активними та повними опорамі КБТ та жил кабелів:

$$\begin{aligned} \Psi_A &= \arccos\left(\frac{R_A^T}{\sqrt{(R_A^T)^2 + (X_A^T)^2}}\right), \\ \Psi_B &= \arccos\left(\frac{R_B^K}{\sqrt{(R_B^K)^2 + (X_B^K)^2}}\right), \\ \Psi_C &= \arccos\left(\frac{R_C^K}{\sqrt{(R_C^K)^2 + (X_C^K)^2}}\right). \end{aligned} \quad (5)$$

Обчислюються кути  $\varphi_{AB}$  і  $\varphi_{CA}$ , що характеризують співвідношення між активними та повними потужностями кіл АВ і СА відповідно та кут  $\varphi'_{AB}$ , що характеризує співвідношення між фіктивними активною та повною потужностями кола АВ:

$$\begin{aligned} \varphi_{AB} &= \arccos\left(\frac{P_{AB}}{S_{AB}}\right), \\ \varphi_{CA} &= \arccos\left(\frac{P_{CA}}{S_{CA}}\right), \\ \varphi'_{AB} &= \arccos\left(\frac{P'_{AB}}{S'_{AB}}\right). \end{aligned} \quad (6)$$

Визначаються втрати напруги  $\Delta U_A$  у КБТ та  $\Delta U_B$  і  $\Delta U_C$  у жилах кабелів:

$$\begin{aligned} \Delta U_A &= I_A \sqrt{(R_A^T)^2 + (X_A^T)^2}, \\ \Delta U_B &= I_B \sqrt{(R_B^K)^2 + (X_B^K)^2}, \\ \Delta U_C &= I_C \sqrt{(R_C^K)^2 + (X_C^K)^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Обчислюються кути  $\delta_A, \delta_B, \delta_C$  між векторами струмів  $I_A, I_B, I_C$  відповідно та вектором лінійної напруги  $U_{AB}$ :

$$\begin{aligned} \delta_A &= \varphi'_{AB} - \Psi_A, \\ \delta_B &= \varphi_{AB} - \Psi_B, \\ \delta_C &= \varphi_{CA} - \Psi_C. \end{aligned} \quad (8)$$

За теоремою косинусів визначаються допоміжний відрізок  $Ab$ , який сполучає точку А з кінцем вектора втрат напруги  $\Delta U_B$  у кабелі фази В та допоміжний відрізок  $Ac$ , який з'єднує точку А з кінцем вектора втрат напруги  $\Delta U_C$  у кабелі фази С:

$$\begin{aligned} Ab &= \sqrt{U_{AB}^2 + \Delta U_B^2 - 2U_{AB} \cdot \Delta U_B \cdot \cos(\delta_B)}, \\ Ac &= \sqrt{U_{CA}^2 + \Delta U_C^2 - 2U_{CA} \cdot \Delta U_C \cdot \cos(\delta_C)}. \end{aligned} \quad (9)$$

За теоремою синусів визначається допоміжний кут  $\gamma_{AB}$  між допоміжним відрізком  $Ab$  і вектором лінійної напруги  $U_{AB}$  та допоміжний кут  $\gamma_{CA}$  між допоміжним відрізком  $Ac$  і вектором лінійної напруги  $U_{CA}$ :

$$\begin{aligned} \gamma_{AB} &= \arcsin\left(\frac{\Delta U_B \cdot \sin(\delta_B)}{Ab}\right), \\ \gamma_{CA} &= \arcsin\left(\frac{\Delta U_C \cdot \sin(\delta_C)}{Ac}\right). \end{aligned} \quad (10)$$

Далі обчислюється кут  $\Theta$  між векторами лінійних напруг  $U_{AB}$  і  $U_{CA}$  при вершині А трикутника АВС:

$$\Theta = \arccos\left(\frac{U_{AB}^2 + U_{CA}^2 - U_{BC}^2}{2U_{AB} \cdot U_{CA}}\right). \quad (11)$$

Обчислюється кут  $\alpha$  між відрізками  $Ab$  та  $Ac$  при вершині А трикутника АВС:

$$\alpha = \Theta - \gamma_{CA} + \gamma_{AB}. \quad (12)$$

Обчислюється кут  $\beta$  між відрізком  $Ab$  і вектором втрат напруги  $\Delta U_A$  та кут  $\chi$  між відрізком  $Ac$  і вектором втрат напруги  $\Delta U_A$ :

$$\begin{aligned} \beta &= \delta_A + \gamma_{AB}, \\ \chi &= \Theta - \gamma_{CA} - \delta_A. \end{aligned} \quad (13)$$

За теоремою косинусів визначаються діючі значення лінійних напруг  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$  на затискачах ЗЕД електробура:

$$\begin{aligned} U_{ab} &= \sqrt{Ab^2 + \Delta U_A^2 - 2Ab \cdot \Delta U_A \cdot \cos(\beta)}, \\ U_{bc} &= \sqrt{Ab^2 + Ac^2 - 2Ab \cdot Ac \cdot \cos(\alpha)}, \\ U_{ca} &= \sqrt{Ac^2 + \Delta U_A^2 - 2Ab \cdot \Delta U_A \cdot \cos(\chi)}. \end{aligned} \quad (14)$$

Обчислюються діючі значення фазних напруг  $U_a, U_b, U_c$  на затискачах ЗЕД електробура:

$$\begin{aligned} U_a &= \frac{1}{3} \sqrt{2(U_{CA}^2 + U_{AB}^2) - U_{BC}^2}, \\ U_b &= \frac{1}{3} \sqrt{2(U_{AB}^2 + U_{BC}^2) - U_{CA}^2}, \\ U_c &= \frac{1}{3} \sqrt{2(U_{BC}^2 + U_{CA}^2) - U_{AB}^2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Оскільки у визначенні напруги на затискачах ЗЕД як проміжна величина обчислюється активна потужність, то виникає можливість визначення таких енергетичних параметрів елект-

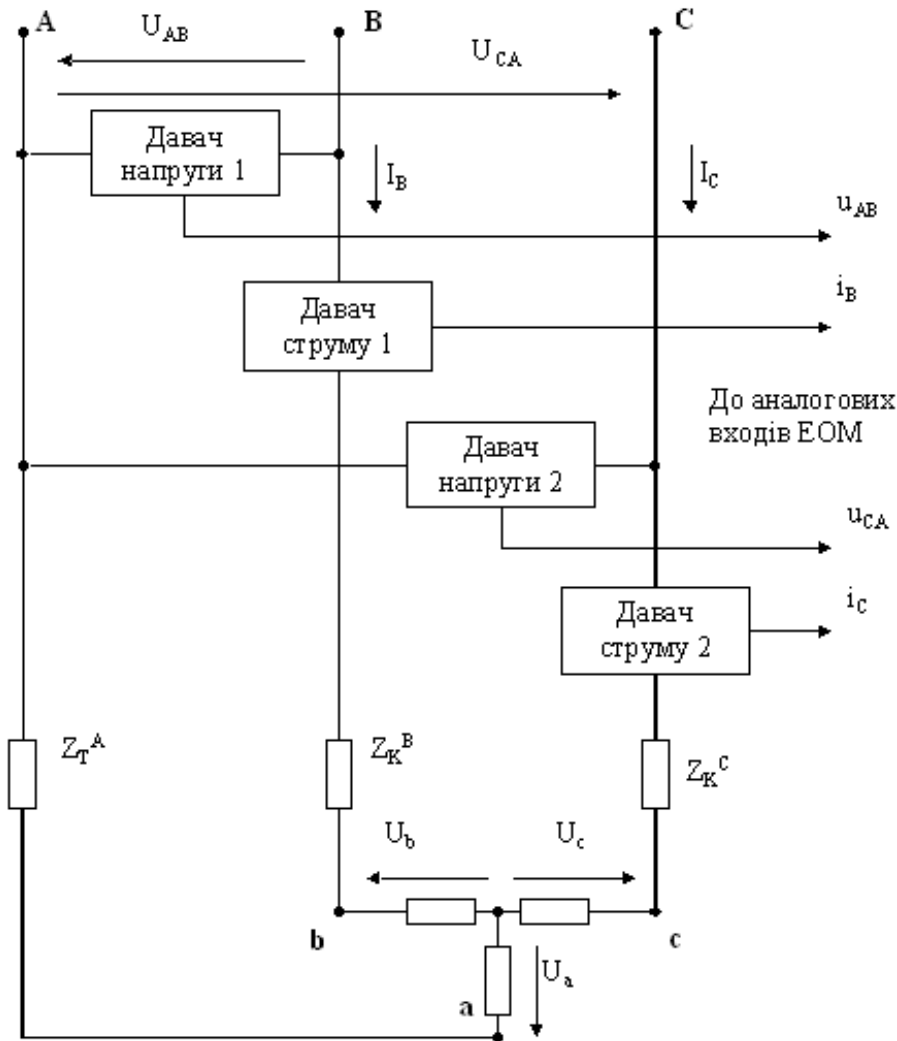


Рисунок 2 — Схема вимірювання енергетичних параметрів електробура

робура як споживана активна потужність ЗЕД, діючи значення струмів у фазах та коефіцієнт їх несиметрії.

За даними роботи [7] на основі методу енергетичних діаграм можна визначити величину крутного моменту на долоті

$$M = \frac{30 \cdot P}{\pi \cdot n}, \tag{16}$$

де:  $M$  – крутний момент на долоті, (Н·м);  
 $P$  – потужність на долі, (Вт);  
 $n$  – частота обертання вала долота, (об/хв).

Потужність на долоті визначається як різниця між виміряною на поверхні активною потужністю споживання на початку СПС і втратами потужності в її елементах:

$$P = (u_{AB} \cdot i_B + u_{CA} \cdot i_C) - \Delta P_{SPS} - \Delta P_{ZED} - \Delta P_{shp},$$

де:  $\Delta P_{SPS}$  – втрати потужності у фазах СПС, (Вт);

$\Delta P_{ZED}$  – втрати потужності у ЗЕД, (Вт);

$\Delta P_{shp}$  – втрати потужності у шпинделі електробура, (Вт).

Дослідження способу двох фаз проводилися на математичній моделі СЕЕ, виконаній у середовищі Matlab+Simulink. У результаті досліджень підтверджено можливість використання способу двох фаз для контролю енергетичних параметрів електробура за наявності трифазної несиметричної системи напруг на початку СПС, яка містить вищі гармоніки.

Спосіб двох фаз проходив випробування на буровій установці “829-Долина” Івано-Франківського управління бурових робіт.

Технічна реалізація способу двох фаз виконана у вигляді дослідної інформаційно-вимірювальної системи (ІВС). ІВС виконана на базі ЕОМ, оснащеної двома двоканальними платами вводу аналогових сигналів та первинними перетворювачами (ПП) напруги і струму.

Схему вимірювання енергетичних параметрів електробура за допомогою дослідної ІВС зображено на рисунку 2.

Чотири вимірювальні канали плат вводу аналогових сигналів синхронізовані між собою шляхом застосування спільного кварцового тактового генератора.



**Рисунок 3 — Розміщення здавачів струму і напруги у високовольтній комірці шафи керування електробуром**

Синхронізація вимірювальних каналів унеможливило виникнення похибки несинфазності вимірювання.

Як ПП напруги застосовано нестандартні резистивні двоступінчасті розподільники, які складаються з високовольтного (2270/60 В) і низьковольтного (60/1 В) плеч. Застосування резистивних розподільників напруги уможливило додаткову реєстрацію комутаційних перенапруг на початку СПС та дало змогу підвищити точність вимірювання напруги за рахунок відсутності фазової похибки, яка наявна у трансформаторах напруги. Два високовольтні резистивні розподільники розміщені у зварному металевому корпусі, який заповнений трансформаторним маслом і герметизований. Низьковольтні резистивні розподільники розташовані в окремому корпусі безпосередньо біля ЕОМ.

Для вимірювання струму застосовано нестандартні трансформатори струму з коефіцієнтом трансформації 200/2,7 А. Їх конструктивне виконання передбачає монтаж у станції керування електробуром УЗЕБ шляхом нанизання на жили кабеля СПС і закріплення ізоляційною стрічкою (рисунок 3).

Необхідність у нестандартних ПП напруги і струму виникла виходячи з умови невтручання у функціонування релейного захисту станції керування електробуром УЗЕБ-85, а також підвищення точності вимірювань.

ПП пройшли індивідуальне визначення їх метрологічних характеристик за допомогою випробувального стенда, оснащеного джерелами змінного струму і напруги, які регулюються, а також лабораторними контрольно-вимірювальними приладами класу точності 0,1.

Виходи ПП під'єднані до аналогових входів за допомогою екранованого кабеля. З метою

захисту аналогових входів вимірювальних каналів напруги і струму до них зустрічно-паралельно під'єднано діодні обмежувачі напруги.

На відміну від раніше розробленої плати збору даних [5, 8], застосування синхронізованих плат вводу аналогових сигналів має суттєві переваги:

- частота дискретизації змінюється в діапазоні від 6 кГц до 48 кГц;

- верхня границя діапазону розрядної сітки

становить  $\frac{2^{16}}{2} = \frac{65536}{2} = 32768$  дискрет;

- діапазон вхідної напруги каналів вводу аналогових сигналів становить від  $-1$  до  $+1$  В;

- у колі вводу аналогового сигналу знаходяться фільтри високочастотних завад;

- можливість застосування готового професійного програмного забезпечення.

Висока чутливість плати уможливило під'єднання виходів ПП через нормуючі розподільники напруги безпосередньо до аналогових входів вимірювальних каналів, що спрощує конструктивне виконання ІВС. Висока частота дискретизації і широкий динамічний діапазон АЦП плати вводу аналогових сигналів, а також термостабільність і завадостійкість сприяють підвищенню точності вимірювань енергетичних параметрів електробура.

Програмне забезпечення дослідної ІВС складається з двох програм: програми збору експериментальних даних і програми їх обробки. Для збору даних застосовано готове програмне забезпечення Adobe Audition, перевагами якого є можливість керувати опціями плат вводу аналогових сигналів та форматами файлів даних, а також зручний інтерфейс. Дана програма уможливило запис аналогових сигналів протягом тривалого часу, який визначається об'ємом жорсткого диску ЕОМ. Файли даних

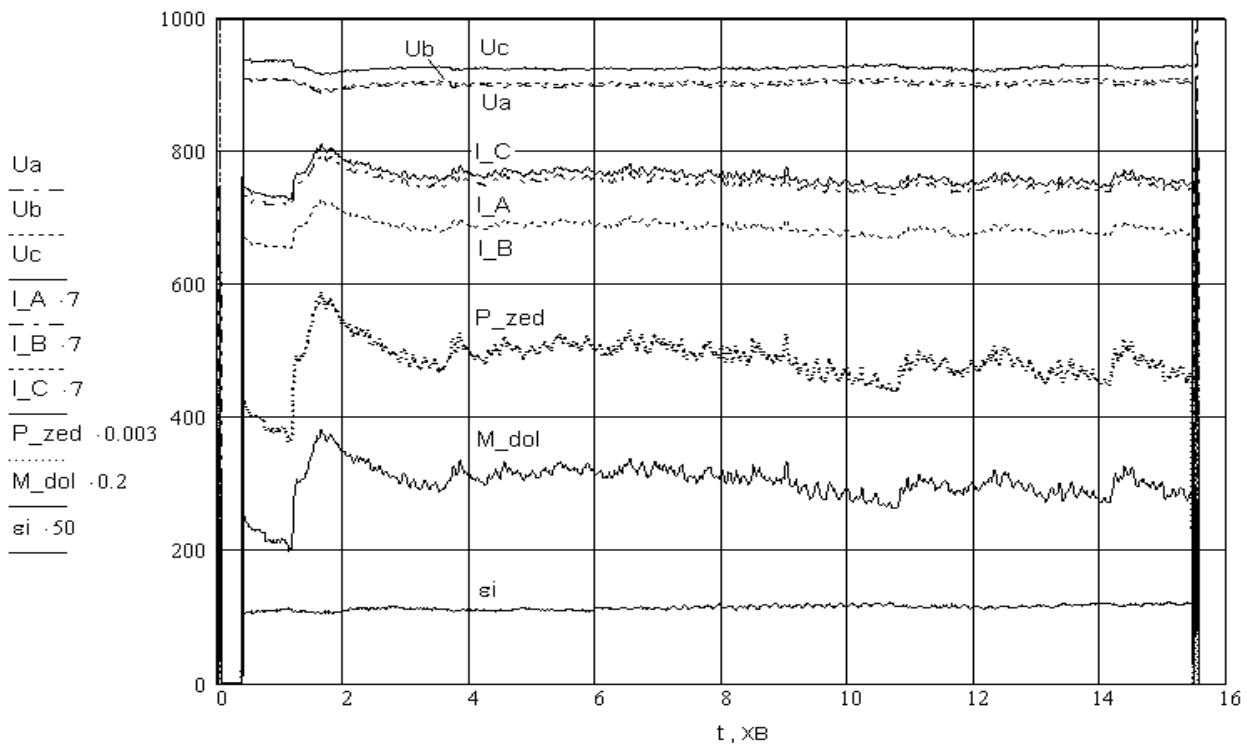


Рисунок 4 — Динаміка енергетичних параметрів електробура E240-8

зберігаються на жорсткому диску EOM у форматі PCM, а для математичної обробки конвертуються у текстовий формат ASCII.

З метою математичної обробки експериментальних даних за авторським алгоритмом розроблено програму, що функціонує у середовищі Mathcad 2001 і реалізує спосіб двох фаз для визначення енергетичних параметрів електробура. Математичний редактор Mathcad 2001 містить опцію читання масивів даних, збережених у ASCII-форматі. Головною перевагою даного математичного редактора є можливість вводити математичні вирази у загальноприйнятому вигляді, розвинута ілюстративна графіка, а також наявність функцій нелінійного програмування.

Можливість індексації елементів масивів текстового формату значно прискорює швидкість їх обробки, а також уможливорює корекцію фазової похибки трансформаторів струму. Остання коректується шляхом зміщення початкового індексу зчитування масиву миттєвих значень струмів.

На рисунку 4 зображено графік залежностей енергетичних параметрів електробура E240-8 від часу в процесі буріння свердловини "829-Долина" на глибині 1500 м і ручній подачі долота, одержаний за допомогою дослідної ІВС. Дослідження проводилися з періодом інтегрування  $T = 0,2$  с і частотою дискретизації  $f_d = 6000$  Гц.

У діапазоні часу від 0 до 1 хв відбувається проробка нового долота. У діапазоні часу від 1 хв до 1 хв 30 с бурильник плавно збільшує осьове навантаження на долото.

Решта періоду ілюструє нормальний процес буріння свердловини. З даного графіка мо-

жна зробити висновок про наявність посадки напруги на затискачах ЗЕД електробура для збільшення осьового навантаження на долото після початку буріння свердловини (друга хвилина). Щоб уникнути можливого критичного перевантаження електробура, за якого його ЗЕД зупиняється, бурильник не збільшує осьове навантаження на долото до оптимальної з точки зору механічної швидкості буріння величини.

У результаті експериментальних досліджень енергетичних параметрів електробура на базі свердловини "829-Долина" випробувано функціонування дослідної ІВС у польових умовах, одержано експериментальні первинні дані, які характеризують функціонування електробура E240-8 в процесі буріння свердловини на глибині 1000 м і 1500 м шарошковим долотом. За результатами аналізу експериментальних даних одержано підтвердження явища коливання напруги на затискачах ЗЕД електробура під час зміни осьового навантаження на долото. Підтверджено доцільність контролю напруги на затискачах ЗЕД електробура, що в кінцевому результаті забезпечить високу експлуатаційну надійність і ефективність буріння глибоких свердловин.

#### Література

1. Гладь І.В., Федорів М.Й. Аналіз надійності роботи електрообладнання системи електропостачання електробурів // Збірник наукових праць 4-ї МНПК "Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств". – Маріуполь, 2000. – С. 94-97.

2. Гладь І. В., Федорів М. Й. Розрахунок напруги живлення електробура // Нафтова і газова промисловість. – 2001. – № 5. – С. 23-24.

3. Гладь І.В., Федорів М.Й., Галушак І.Д. Модернізація системи електропостачання електробура на основі її математичної моделі // Тези ІІІ МНПК “Проблеми економії енергії”. – Львів, 2001. – С. 164-165.

4. Гладь І.В. Аналіз методів та засобів контролю напруги на затискачах занурюваних електродвигунів // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ, 2003. – № 11. – С. 85-90.

5. Гладь І.В. Система контролю енергетичних параметрів занурюваних електродвигунів // Розвідка і розробка нафтових і газових родо-

ваних та досліджених авторами [1, 2, 7], досягається значно менше винесення абсорбенту ніж у вищ. – Івано-Франківськ, 2004. – № 1(10). – С.96-99.

6. Шидловський А.К., Музиченко О.Д. Симетруючі пристрої. – К.: Техніка, 1970.– 164 с.

7. Семенцова А.А. Средства контроля момента на долоте, осевой нагрузки и частоты вращения долота при бурении наклонно-направленных скважин электробурами // Автоматизация и телемеханизация нефт. пром-сти. – 1982. – № 3. – С. 7-9.

8. Гладь І.В. Система контролю параметрів електроспоживання промислових споживачів // Зб. наукових праць за результатами МНПК “Мікропроцесорні пристрої та системи в автоматизації виробничих процесів”. – Хмельницький, 2003. – С. 54-58.

УДК 621.532.3

## КРИТИЧНІ ШВИДКОСТІ ПОЧАТКУ РЕЖИМІВ ПІДВИСАННЯ ТА ЗАХЛИНАННЯ ТРУБЧАСТОГО ТЕПЛОМАСООБМІННОГО ЕЛЕМЕНТА

Ф.В.Козак, Я.М.Дем'янчук

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42351,  
e-mail: teplo@nung.edu.ua

*Исследованы режимы работы трубчатого теплообменного элемента и получены эмпирические зависимости для определения критических скоростей начала режимов подвисания и захлебывания, а также проведено моделирование этих критических скоростей при реальных условиях, существующих в газовой промышленности.*

У процесі видобування та транспортування природного газу від родовищ до споживачів актуальною є проблема вилучення з газового потоку газоподібної вологи, яка призводить до багатьох негативних наслідків для газотранспортного устаткування. Встановлені жорсткі норми вмісту вологи в природному газі в процесі транспортування та подачі його споживачам. Для дотримання цих норм потрібна ефективна робота установок осушення, як у підготовці газу на промислах, так і на проміжних компресорних станціях магістральних газопроводів. У вітчизняній практиці широко застосовується абсорбційне осушення природного газу за допомогою гліколів високої концентрації. В експлуатаційних витратах на осушення газу основну частину складають втрати гліколю високої вартості з потоком осушеного газу. Отже, радикального зменшення експлуатаційних витрат можна досягнути у випадку використання таких технологій осушення газу, які забезпечують мінімальні втрати абсорбенту.

Однією з таких технологій є трубчато-колонне фракціонування, за якого завдяки плівковій схемі руху абсорбенту в середині трубчастих теплообмінних елементів, запропоно-

*It has been investigated the operating mode of the tubular heat-mass exchange part and received the empirical dependence for the determination of critical speeds of the beginning of such modes as hanging and flooding. There has been done the simulation of the critical speeds at real conditions that exist in gas industry.*

широко розповсюджених апаратах барботажного типу. Для одержання максимальної продуктивності масообмінних апаратів за мінімальних матеріальних затрат важливо досягати якомога більших швидкостей руху газового потоку в середині цих елементів без появи явища винесення абсорбенту з газовим потоком. Тому, в ході досліджень велика увага приділялася визначенню меж зміни режимів роботи трубчастого теплообмінного елемента. Виявлено, що досліджуваний теплообмінний елемент має чотири режими роботи [2]. З точки зору придатності для експлуатації найбільш оптимальним є перший режим роботи – режим вільного стікання плівки рідини.

Аналітично визначити межі зміни режиму роботи трубчастого теплообмінного елемента – надзвичайно складна задача. Для одержання залежностей, за якими можна визначити критичні зміни режимів руху фаз, багатьма дослідниками на практиці використовуються напівемпіричні залежності, які дозволяють з певною точністю описати зміну режимів для конкретних конструкцій апаратів та використаних контактних пристроїв.