

УДК 622.323

М. Й. Федорів, канд. тех. наук, доц.;

У. М. Николин, канд. тех. наук;

А. І. Поточний, асп.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРОБУРА

Представлено математичну модель функціонування системи електропостачання (СЕП) електробура (ЕЛБ) в середовищі віртуального програмування *Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench (LabVIEW)*. Отримана математична модель дозволяє моделювати режими роботи електротехнічного комплексу для електробуріння в залежності від глибини забою свердловини. Наведено методику створення такої математичної моделі, її основні особливості та можливості, які можна використати в практичних дослідженнях під час буріння електробурами на теренах Прикарпатського регіону.

Вихідні передумови та постановка задачі

Видобуток нафти та газу в Україні можна збільшити за допомогою розробки нетрадиційних нафтогазоносних об'єктів та збільшення видобутку нафти з малопродуктивних пластів за допомогою буріння горизонтально відгалужених свердловин, які доцільно споруджувати за допомогою електробуріння [1, 2].

Для проведення лабораторних досліджень електротехнічного комплексу для електробуріння (ЕТКЕ) в середовищі віртуального програмування *LabVIEW* створена комп'ютерна модель системи електропостачання ЕЛБ, яка дозволяє моделювати режими роботи ЕЛБ. В основі математичної моделі лежить T -подібна схема заміщення асинхронного двигуна ЕЛБ, представленого комплексними опорами Z_1 , Z_m і $Z_{2(s)}$, відповідно. В коло статора введено комплексні опори бурового трансформатора $Z_{Тр}$, жил кабелю Z_G і бурильної труби Z_T . Останні залежать від глибини буріння та від значення струму електродвигуна. Задаючись числовими значеннями опорів схеми заміщення СЕЕ, глибиною буріння L , номінальними струмом I_N і ковзанням s , знаходимо фазні напруги U_A , U_B , U_C на початку струмопідводу в номінальному режимі. Залишаючи бажані фазні напруги на початку струмопідводу та глибину буріння незмінними, розраховуємо механічну характеристику асинхронного двигуна ЕЛБ $M_{(s)}$ та значення його фазних струмів I_A , I_B , I_C під час зміни ковзання s від 0 до 1 [3, 4].

Вихідними даними, що вносяться на початку моделі, є: параметри бурового трансформатора ТМТБ 630/10 та електродвигуна електробура Е215-8М-В5. До параметрів бурового трансформатора належать: номінальна вторинна напруга бурового трансформатора ТМТБ 630/10-73У1, яка залежить від глибини буріння і для електробура Е215-8М-В5 становить: 1700 В для глибини 0...1000 м, 1750 В для глибини 1000...2000 м, 1850 В для глибини 2000...3000 м, 1900 В для глибини понад 3000 м — $U_{ном.тр} = 1700...1900$ В; номінальний вторинний струм бурового трансформатора ТМТБ 630/10-73У1 — $I_{ном.тр} = 155$ А; напруга короткого замикання ВН-СН бурового трансформатора ТМТБ 630/10-73У — $U_k = 10,7\%$; втрати потужності бурового трансформатора ТМТБ 630/10-73У1 — $\Delta P_k = 10700$ Вт. До параметрів електродвигуна ЕЛБ належать: номінальна напруга електродвигуна електробура Е215-8М-В5 — $U_{ном.еб} = 1550$ В; номінальний струм фази статора електродвигуна електробура Е215-8М-В5 — $I_{ном.еб} = 131$ А; активний опір фази статора електродвигуна електробура Е215-8М-В5 — $r_{1d} = 0,419$ Ом; індуктивний опір фази ротора електродвигуна електробура Е215-8М-В5 — $x_{1d} = 0,635$ Ом; приведені активний опір фази ротора електродвигуна електробура Е215-8М-В5 — $r_2 = 0,691$ Ом; приведені індуктивний опір фази ротора електродвигуна електробура Е215-8М-В5 — $x_2 = x_{1d} = 0,635$ Ом; активний опір фази намагнічувального контуру електродвигуна електробура Е215-8М-В5 — $r_m = 0,671$ Ом; індуктивний опір фази намагнічувального контуру електродвигуна електробура Е215-8М-В5 — $x_m = 7,715$ Ом; синхронна частота обер-

тання ротора електродвигуна електробура E215-8M-B5 — $n_1 = 750$ об/хв; номінальна частота обертання ротора електродвигуна електробура E215-8M-B5 — $n_2 = 655$ об/хв.

Математична модель дозволяє визначати: опори схем заміщення електродвигуна електробура E215-8M-B5 залежно від ковзання; параметри струмопідводу; опори схем заміщення бурового трансформатора ТМТБ 630/10-73У1; опори схеми заміщення струмопідводу залежно від глибини буріння; лінійні напруги на початку струмопідводу залежно від ковзання; фазні струми та напруг на затискачах електродвигуна електробура E215-8M-B5; механічні характеристики електродвигуна електробура E215-8M-B5; енергетичні втрати електродвигуна електробура E215-8M-B5.

На рис. 1 проілюстровано розрахунок фазних напруг на затискачах електродвигуна електробура на глибині буріння 362 м.

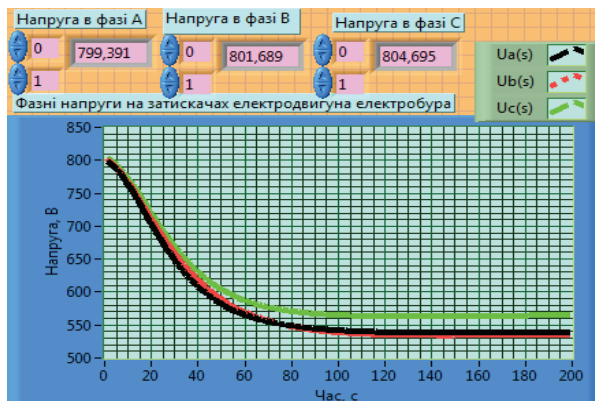


Рис. 1. Розрахунок фазних напруг на затискачах ЕЛБ

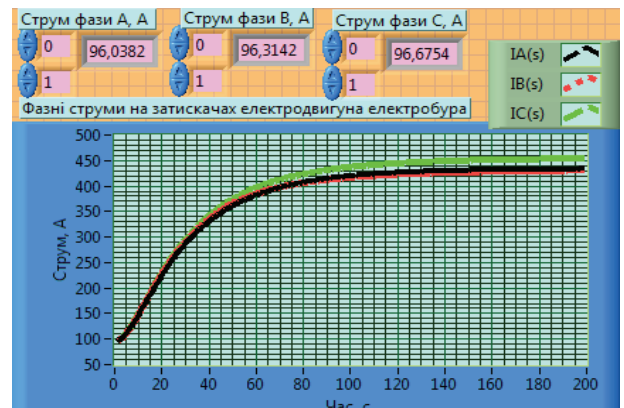


Рис. 2. Розрахунок фазних струмів на затискачах ЕЛБ

Розрахунок фазних струмів на затискачах електродвигуна електробура на глибині буріння 362 м зображено на рис. 2.

Для визначення опорів схеми заміщення електродвигуна електробура E215-8M-B5 залежно від ковзання потрібно визначити: комплексний опір намагнічувального контуру, Ом:

$$Z_m = r_m + x_m \cdot i, \quad (1)$$

де r_m — активний опір фази намагнічувального контуру електродвигуна електробура E215-8M-B5; x_m — індуктивний опір фази намагнічувального контуру електродвигуна електробура E215-8M-B5.

Комплексний опір фази статора, Ом

$$Z_1 = r_{1d} + x_{1d} \cdot i, \quad (2)$$

де r_{1d} — активний опір фази статора електродвигуна електробура E215-8M-B5; x_{1d} — індуктивний опір фази ротора електродвигуна електробура E215-8M-B5.

Комплексний опір фази ротора, Ом

$$Z_{2(s)} = x_2 i + r_2 \frac{1-s}{s}, \quad (3)$$

де r_2 — зведений активний опір фази ротора електродвигуна електробура E215-8M-B5; x_2 — зведений індуктивний опір фази ротора електродвигуна електробура E215-8M-B5.

Комплексний опір фази електродвигуна, Ом

$$Z(s) = Z_1 + \frac{Z_m \cdot Z_{2(s)}}{Z_m + Z_{2(s)}}. \quad (4)$$

Струм електродвигуна, А

$$I(s) = \frac{U_{\text{ном. еб}}}{\sqrt{3} \cdot Z(s)}, \quad (5)$$

де $U_{\text{ном. еб}}$ — номінальна напруга електродвигуна електробура E215-8M-B5.

Для розрахунку параметрів струмопідводу потрібно визначити: питомий активний опір труби при температурі 20 °С, Ом/км

$$r_{t_{20}}(s) = a_0 + a_1 \cdot I(s)^1 + a_2 \cdot I(s)^2 + a_3 \cdot I(s)^3, \quad (6)$$

де a_0, a_1, a_2, a_3 — коефіцієнти апроксимації питомого активного опору труби Н140 за температури 20 °С.

Температура промивної рідини на забої [1], °С

$$T_{bz} = (15 + 12L) + T_{bp}, \quad (7)$$

де T_{bp} — температура промивної рідини на поверхні; L — глибина забою свердловини.

Середня температура струмопідводу [1], °С

$$T_s = \frac{30 + T_{bp} + T_{bz}}{2}. \quad (8)$$

Питомий активний опір труби, Ом/км

$$r_t(s) = r_{t_{20}}(s) \cdot (1 + 0,006T_s). \quad (9)$$

Питомий реактивний опір труби [7], Ом/км

$$x_t(s) = b_0 + b_1 I(s)^1 + b_2 I(s)^2 + b_3 I(s)^3, \quad (10)$$

де b_0, b_1, b_2, b_3 — коефіцієнти апроксимації питомого реактивного опору труби Н140 за температури 20 °С.

Питомий активний опір жили, Ом/км [7]

$$R_g = r_{g_{20}}(1 + 0,004T_s), \quad (11)$$

де $r_{g_{20}}$ — питомий активний опір жили за температури 20 °С.

Індуктивний опір бурового трансформатора в номінальному режимі роботи, Ом

$$X_{\text{ном. тр}} = \sqrt{Z_{\text{ном. тр}}^2 - R_{\text{ном. тр}}^2}. \quad (12)$$

Активний, індуктивний та комплексний опори бурового трансформатора, Ом

$$R_{\text{тр}} = R_{\text{ном. тр}} \frac{U_{\text{тр}}}{U_{\text{ном. тр}}}; \quad (13)$$

$$X_{\text{тр}} = X_{\text{ном. тр}} \frac{U_{\text{тр}}}{U_{\text{ном. тр}}}; \quad (14)$$

$$Z_{\text{тр}} = R_{\text{тр}} + X_{\text{тр}}. \quad (15)$$

Для розрахунку опорів схеми заміщення струмопідводу в залежності від глибини буріння потрібно визначити: активний опір бурильної труби, Ом:

$$R_t(s) = r_t(s)L. \quad (16)$$

Індуктивний опір бурильної труби та жили кабелю, Ом

$$X_t(s) = x_t(s)L; \quad (17)$$

$$X_g = x_g L, \quad (18)$$

де x_g — питомий реактивний опір жили.

Комплексний опір бурильної труби та жили кабелю, Ом

$$Z_t(s) = R_t(s) + X_t(s)i; \quad (19)$$

$$Z_g(s) = R_g(s) + X_g i. \quad (20)$$

Комплексний опір кожної фази, Ом

$$Z_a(s) = Z(s) + Z_t(s) + Z_{tr}; \quad (21)$$

$$Z_b(s) = Z_c(s) = Z(s) + Z_g(s) + Z_{tr}. \quad (22)$$

Розрахунок лінійних напруг на початку струмопідводу залежно від ковзання: фазні струми у номінальному режимі роботи, А:

$$I_a(s) = |I(s)|; \quad (23)$$

$$I_b(s) = |I(s)| \cdot e^{-i \cdot 120 \cdot \text{deg}}; \quad (24)$$

$$I_c(s) = |I(s)| \cdot e^{-i \cdot 240 \cdot \text{deg}}. \quad (25)$$

Лінійні напруги у номінальному режимі роботи, В

$$U_{ab}(s) = I_a(s)Z_a(s) - I_b(s)Z_b(s); \quad (26)$$

$$U_{bc}(s) = I_b(s)Z_b(s) - I_c(s)Z_c(s); \quad (27)$$

$$U_{ca}(s) = I_a(s)Z_a(s) - I_c(s)Z_c(s). \quad (28)$$

Розрахунок фазних струмів та напруг на затискачах електродвигуна електробура E215-8М-В5: комплексний опір струмопідводу, Ом:

$$Z_{abc}(s) = Z_a(s)Z_b(s) + Z_b(s)Z_c(s) + Z_c(s)Z_a(s); \quad (29)$$

$$Z_{ab}(s) = \frac{Z_{abc}(s)}{Z_c(s)}; \quad Z_{bc}(s) = \frac{Z_{abc}(s)}{Z_a(s)}; \quad Z_{ca}(s) = \frac{Z_{abc}(s)}{Z_b(s)}. \quad (30)$$

Фазні струми на початку струмопідводу, А

$$I_{ab}(s) = \frac{U_{a1} - U_{b1}}{Z_{ab}(s)}; \quad I_{bc}(s) = \frac{U_{b1} - U_{c1}}{Z_{bc}(s)}; \quad I_{ca}(s) = \frac{U_{c1} - U_{a1}}{Z_{ca}(s)}, \quad (31)$$

де U_{a1}, U_{b1}, U_{c1} — фазні напруги на початку струмопідводу.

Фазні струми на затискачах електробура у фазі А, В і С, А

$$IA(s) = Iab(s) - Ica(s); \quad IB(s) = -Iab(s) + Ibc(s); \quad IC(s) = -Ibc(s) + Ica(s). \quad (32)$$

Фазні напруги на затискачах електробура у фазі А, В і С, В

$$U_A(s) = I_A(s)Z(s); \quad U_B(s) = I_B(s)Z(s); \quad U_C(s) = I_C(s)Z(s). \quad (33)$$

Розрахунок механічної характеристики електродвигуна електробура E215-8М-В5 показано на рис. 3.

Момент у фазі А (аналогічно знаходимо моменти в фазі В та С) [8], кг·м

$$Ma(s) = \frac{(|U_A(s)|)^2 \cdot r_2}{\frac{2\pi \cdot n1}{60} \cdot s \cdot 9,807 \left(\left(r1d + \left| \frac{Z_m + Z1}{Z_m} \right| \cdot \frac{r_2}{s} \right)^2 + \left(x1d + \left| \frac{Z_m + Z1}{Z_m} \right| \cdot x_2 \right)^2 \right)}. \quad (34)$$

Момент електродвигуна, кг·м

$$M(s) = Ma(s) + Mb(s) + Mc(s). \quad (35)$$

Розрахунок енергетичних втрат електродвигуна електробура E215-8М-В5 показано на рис. 4.

Потужність, що споживається електробуром, знаходять шляхом обчислення втрат в струмопідводі та електробурі. Зміни в процесі буріння осьового навантаження і моментомності прохідних порід обумовлюють коливання завантаження електробура. Тому потужність, що розвивається дви-

гуном, відрізняється від номінальної, для якої в технічних характеристиках двигуна дається певне значення коефіцієнта корисної дії [1, 5]. На рис. 4 зображена підпрограма для розрахунку енергетичних втрат електродвигуна електробура.

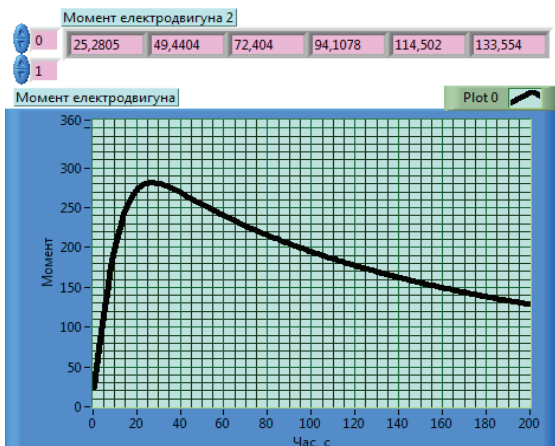


Рис. 3. Механічна характеристика ЕЛБ

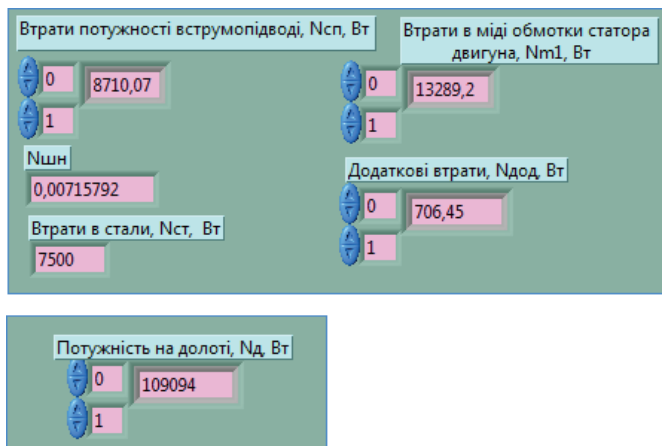


Рис. 4. Підпрограма для розрахунку енергетичних втрат ЕЛБ

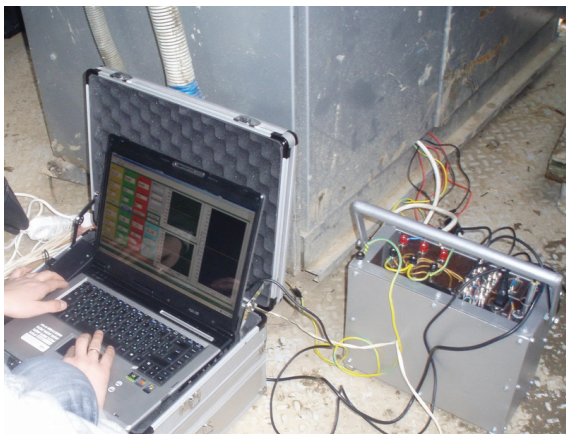


Рис. 5. АПК для збору експериментальних даних

лого-цифровий перетворювач NI USB-6210, ноутбук та джерело безперебійного електроживлення. Програмне забезпечення розроблене у середовищі графічного програмування LabVIEW. Спочатку здійснюється запис початкових вимірних величин у файл, після чого запускається програма математичної опрацювання [3].

За допомогою АПК проведено збір експериментальних даних на буровій «Сибівка» № 111 Прикарпатського УБР у с. Ясеновець, Рожнятівський район, Івано-Франківська область. Під час проведення експерименту отримані такі дані: гармоніки струмів та напруг під час пуску електродвигуна ЕЛБ, споживання активної, реактивної та повної потужностей, коефіцієнт потужностей $\cos \varphi$, фазний струм та напруга на глибині забою свердловини 362 м.

Для перевірки адекватності цієї математичної моделі спеціалістами кафедри електропостачання та електрообладнання промислових підприємств Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу розроблено та виготовлено апаратно-програмний комплекс (АПК) (рис. 5) для аналізу параметрів електроспоживання, який забезпечує вимірювання та реєстрацію на жорсткий диск ЕОМ миттєвих значень струмів у трьох фазах та нульовому провіднику, трьох фазних (або лінійних) напруг, швидкості обертання вала електропривода. До складу апаратної частини входять перетворювачі напруги CV3-1000 та струму i3000s Flex, оптичний інкрементальний енкодер E25-24-8 в якості датчика кутової швидкості обертання, 16-бітний багатоканальний ана-

лого-цифровий перетворювач NI USB-6210, ноутбук та джерело безперебійного електроживлення. Програмне забезпечення розроблене у середовищі графічного програмування LabVIEW. Спочатку здійснюється запис початкових вимірних величин у файл, після чого запускається програма математичної опрацювання [3].

За допомогою АПК проведено збір експериментальних даних на буровій «Сибівка» № 111 Прикарпатського УБР у с. Ясеновець, Рожнятівський район, Івано-Франківська область. Під час проведення експерименту отримані такі дані: гармоніки струмів та напруг під час пуску електродвигуна ЕЛБ, споживання активної, реактивної та повної потужностей, коефіцієнт потужностей $\cos \varphi$, фазний струм та напруга на глибині забою свердловини 362 м.

На рис. 6 показано щит управління електробура, на якому відображено струми у фазах А, В та С. Прилади показують незначну несиметрію струмів, а саме у фазі А струм рівний 90 А, у фазі В — 94 А і у фазі С — 86 А.

На рис. 7 показано результати роботи АПК, який зафіксував струм фази С 86,16 А.

Як бачимо з результатів дослідження (рис. 6, 7) та даних, які розраховані математичною моделлю (рис. 1 та 2), похибка є досить малою (в межах 5 %) [6].



Рис. 6. Щит управління ЕЛБ

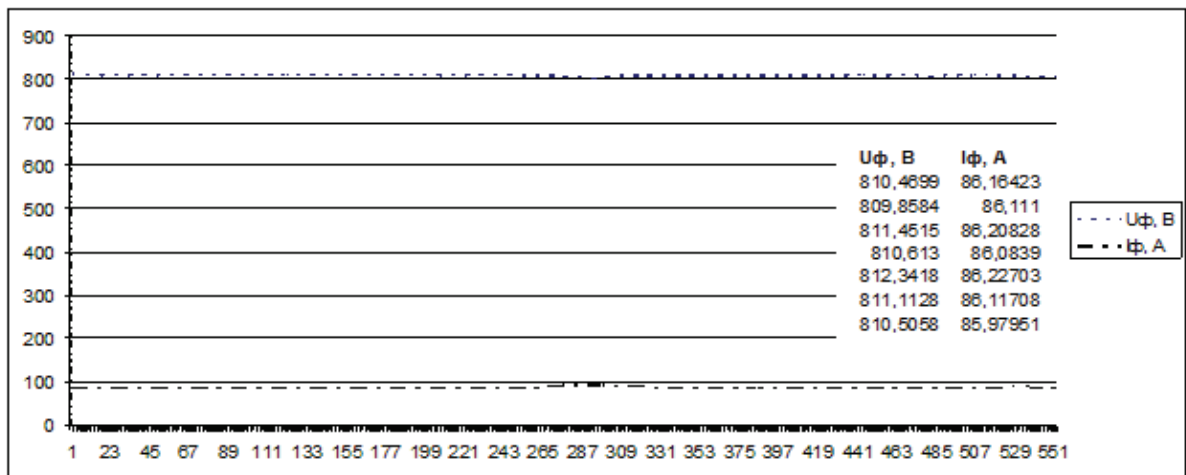


Рис. 7. Результати роботи АКП

Висновки

Використання створеної авторами в середовищі програмування LABVIEW математичної моделі функціонування системи електропостачання електробура дає змогу досліджувати режими роботи ЕЛБ залежно від глибини вибою свердловини. Експериментальні дослідження підтверджують адекватність побудованої математичної моделі електротехнічного комплексу під час буріння свердловини. В результаті проведених досліджень втрат двигуна електробура під час буріння на різних глибинах виявлено закономірність збільшення втрат активної потужності в струмопідводі у разі збільшення глибини буріння. Результати досліджень на буровій «Сибівка» № 111 Прикарпатського УБР у с. Ясеновець, Рожнятівський район, Івано-Франківська область, показали, що для підвищення енергоефективності роботи ЕЛБ необхідно розробити оптимальний алгоритм пофазного регулювання напруги живлення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Фоменко Ф. Н. Бурение скважин электробуром / Ф. Н. Фоменко. — М. : Недра. — 1974. — 272 с.
2. Федорів М. Й. Застосування середовища програмування Labview для моделювання режиму роботи електробура / М. Й. Федорів, А. І. Поточний, О. І. Кіянук // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика PEES 2011 : матер. XIII Міжнар. конфер., секція «Моделювання та методи оптимізації». — Кременчук, 2011. — Вип. 1/2011(1). — С. 340—341.
3. Поточний А. І. Контроль енергетичних параметрів електрообладнання бурових установок / А. І. Поточний // Техніка і прогресивні технології у нафтогазовій інженерії : зб. тез Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів, 5—7 листопада 2012 р. — Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2012. — С. 218—221.
4. Гладь І. В. Модернізація системи електропостачання електробура на основі її математичної моделі / І. В. Гладь, М. Й. Федорів, І. Д. Галушак // Проблеми економії енергії : тези III Міжнародної науково-практичної конференції. — Львів, 2001. — С. 164—165.
5. Поточний А. І. Аналіз енергетичних втрат двигуна електробура під час буріння / А. І. Поточний, Б. І. Петровський // Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації. Секція «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації» : матер. IX Міжнар. наук.-техн. конфер. молодих учених та спеціалістів. — 2011. — № 1. — С. 133—134.
6. Федорів М. Й. Дослідження енергетичних параметрів електротехнічного комплексу для електробуріння / М. Й. Федорів, І. В. Гладь, А. І. Поточний // Нафтогазова енергетика. — 2011. — № 3(16). — С. 61—71.
7. Гладь І. В. Контроль та регулювання напруги на затискачах електродвигуна електробура / І. В. Гладь // Проблеми економії енергії : IV МНПК : зб. матер. — Львів, 2003. — С. 149—150.
8. Федорів М. Й. Підвищення надійності та ефективності електробура / М. Й. Федорів, І. В. Гладь // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. — 2003. — № 6(64). — С. 69—75.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту

Стаття надійшла до редакції 21.06.2013

Рекомендована до друку 19.07.2013

Федорів Михайло Йосипович — доцент, **Николин Уляна Михайлівна** — асистент, **Поточний Андрій Ігорович** — аспірант.

Кафедра електропостачання та електрообладнання промислових підприємств, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ