

ПІДВИЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ БУРИЛЬНИХ УСТАНОВОК

М. Й. Федорів, І. В. Гладь, І. Д. Галушак, Я. В. Бацала, І. М. Михайлів

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727172,
e-mail: ghladj@ukr.net

Під час розроблення математичної моделі функціонування електротехнічного комплексу бурильної установки враховано вплив технологічних факторів на надійність та енергоефективність у процесі буріння свердловин електробуром. Побудовано математичні моделі надійності та енергоефективності систем електропостачання та електрообладнання бурильної установки в середовищі програмування віртуальних приладів LabVIEW. За допомогою інформаційно-виміральної системи контролю енергетичних параметрів експериментально отримано енергетичні параметри електроприводних бурильних установок. Визначено вплив технологічних та енергетичних параметрів на надійність і енергоефективність електрообладнання. Доведено необхідність розроблення організаційних та технічних заходів, спрямованих на покращення функціонування електрообладнання. Доведено, що механізми відмови і відновлення працездатності основних елементів електроприводних бурильних установок підпорядковані закону Вейбулла-Гнеденка. Враховано вплив температури бурильного розчину в свердловині на опори струмовідводу електробура. Встановлено, що спектр струму занурювального електродвигуна електробура не містить недопустимого рівня вищих гармонік, однак наявні несиметрія струмів та зниження напруги на зажимах електробура в робочих режимах буріння. Створені математичні моделі дають змогу прогнозувати значення основних показників енергоефективності та експлуатаційної надійності електротехнічних комплексів з метою вибору оптимального режиму роботи бурильних установок за технологічними та енергетичними параметрами.

Ключові слова: надійність, енергоефективність, електрообладнання, вимірювання, віртуальні прилади, електротехнічний комплекс.

При разработке математической модели функционирования электротехнического комплекса буровой установки учтено влияние технологических факторов на надежность и энергоэффективность в процессе бурения скважин электробуром. Построены математические модели надежности и энергоэффективности системы электроснабжения и электрооборудования буровой установки в среде программирования виртуальных приборов LabVIEW. С помощью информационно-измерительной системы контроля энергетических параметров экспериментально получены энергетические параметры электроприводных буровых установок. Определено влияние технологических и энергетических параметров на надежность и энергоэффективность электробурового оборудования. Доказана необходимость разработки организационных и технических мероприятий, направленных на улучшение функционирования электробурового оборудования. Установлено, что механизмы формирования отказов и восстановления работоспособности основных элементов электроприводных буровых установок описываются законом Вейбулла-Гнеденко. Учтено влияние температуры бурового раствора в скважине на сопротивления токоподвода электробура. Установлено, что спектр тока погружного электродвигателя электробура не имеет недопустимого уровня высших гармоник, однако присутствуют несимметрия токов и снижение напряжения на зажимах электробура в рабочих режимах бурения. Созданные математические модели позволяют прогнозировать значение основных показателей энергоэффективности и эксплуатационной надежности электротехнических комплексов буровых установок с целью выбора оптимального режима работы по технологическим и энергетическим параметрам.

Ключевые слова: надежность, энергоэффективность, электрооборудование, измерения, виртуальные приборы, электротехнический комплекс.

While designing the mathematical model of an electrotechnical complex functioning of a drilling rig, the influence of technological factors on reliability and energy efficiency in the process of downhole electrical motor drilling is taken into account. The mathematical models of reliability and energy efficiency of power supply system and electric equipment of a drilling rig are constructed in LabVIEW. The power parameters of the electric drilling rigs are received by means of the information-measuring and monitoring system of power parameters. The influence of technological and power parameters on reliability and energy efficiency of the electric drilling equipment is defined. The administrative and technical measures should be elaborated which are directed at improving the electric drilling equipment operation. It is defined, that mechanisms of functional failures and performance restoration of the basic elements of the electric drilling units are subjected to Weibull-Hnedenko law. The influence of drilling mud temperature in a well on the resistance of the electric drill conductor is taken into account. It is defined, that the array of a current of the submersible electric motor has no inadmissible level of the higher harmonics, but there is asymmetry of currents and voltage decrease on clips of electric downhole motor during in-service drilling operation. The designed mathematical models allow to predict the value of the basic indicators of energy efficiency and operation reliability of electrotechnical complexes on the basis of technological and power parameters for the purpose of choosing an optimal operation mode.

Keywords: reliability, energy efficiency, electric equipment, measurement, virtual devices, electrotechnical complex.

Вступ

Системи електропостачання електротехнічних комплексів нафтогазової промисловості, вже не відповідають значенню встановленої потужності споживачів та неузгоджені за електромагнітною та режимною сумісністю, що обумовлює зростання втрат електроенергії та погіршення її якості. Аналіз сучасного стану проблеми підвищення надійності та енергоефективності свідчить, що більшість підприємств, установ та організацій оснащені фізично застарілим технологічним обладнанням, яке працює неефективно, володіє низьким ККД. Відсутність систем технічного обліку електроенергії та моніторингу показників її якості часто унеможливує аналіз електроспоживання підрозділами підприємств. Зростання рівня напруги в електромережах понад допустиме значення та неправильний вибір електрообладнання суттєво знижують ресурс споживачів. Регульований електричний привод, яким оснащені бурові установки, обладнаний тиристорними перетворювачами, які спотворюють форму кривої струму у фазних провідниках електромережі. Система електропостачання електробура (СЕЕ) “два проводи-труба” спричинює несиметрію струмів і напруг електродвигуна, внаслідок чого збільшується електроспоживання і зменшується надійність системи загалом. Цей факт збільшує втрати активної електроенергії.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Дослідження надійності та енергоефективності систем електропостачання та електрообладнання висвітлені в роботах Дж. Эндрени, І. І. Суда, С. Г. Блантера, Б. Г. Меньшова, Я-В. І. Костирика, С. П. Шевчука, Ю. О. Фокіна [1, 2]. Розв'язання даної проблеми започатковано в працях авторів, результати досліджень представлені в публікаціях [3-6].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Проблему підвищення надійності та енергоефективності електричного обладнання нафтогазових комплексів доцільно вирішити шляхом розроблення математичної моделі надійності та енергоефективності бурильних установок в середовищі LABview, дослідження впливу технологічних та енергетичних параметрів на енергоефективність та надійність електричного обладнання, проведення експериментальних енергетичних обстежень електричної частини бурильних установок як технічної системи з логічно послідовним, з точки зору надійності, з'єднанням елементів.

Постановка задачі

Створення науково-методологічної бази для розроблення організаційних та технічних заходів з підвищення рівня показників надійності та енергоефективності систем електропостачання та електрообладнання бурильних установок нафтогазової промисловості.

Результати

Аналіз статистичних даних, отриманих на бурових підприємствах Прикарпаття, свідчить, що механізми формування відмов основного електричного обладнання описуються законом Вейбула-Гнеденка, що свідчить про наявність як миттєвих, так і поступових відмов. Під час математичної обробки статистичної інформації її перевіряли на аномальність з використанням критерію Смірнова, далі здійснювалася перевірка на однорідність виборок за допомогою критеріїв Фішера та Стьюдента, а перевірка гіпотези про закон розподілу здійснювалася за допомогою критеріїв Колмогорова та Пірсона. Щільність розподілу визначається за формулою:

$$f_i(t) = \left(\frac{t}{a}\right) \left(\frac{b}{a}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b}, \quad (1)$$

де a – параметр форми розподілу для i -го вузла електробура,

b – параметр масштабу розподілу для i -го вузла електробура [3].

Параметри розподілу для окремих елементів системи електропостачання електробура наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Параметри розподілу Вейбула – Гнеденко

Назва елемента	Параметр a	Параметр b
Буровий трансформатор	19729	1,33
Станція керування	1039	1,17
Струмоприймач	263,5	1,05
Пристрій контролю ізоляції	168,7	1,35
Телеметрична система	115	1,25
Електробур	132	1,55
Кабельні секції	151,8	1,72

Найбільш пошкоджуваними є такі занурювальні елементи ЕБО, як кабельні секції, пристрій контролю ізоляції, телеметрична система, електродвигун електробура. Це зумовлено надзвичайно складними умовами їх роботи у агресивному середовищі бурового розчину, тобто високими температурами і тисками (до 150 °С і до 100 МПа відповідно), значною вібрацією (амплітудою до 5 мм), наявності дрібного абразиву великої твердості, а для з'єднувальних муфт струмопідведення систематичні з'єднання-роз'єднання. Циклічний режим роботи ЕБО при бурінні свердловин також знижує ресурс інших занурювальних елементів.

В таблиці 2 наведено основні кількісні показники надійності елементів СЕЕ, які визначалися як відповідні до встановленого раніше закону розподілу, зокрема середнє напрацювання на відмову, інтенсивність (параметр потоку) відмов та середній час відновлення працездатності.

Таблиця 2 – Кількісні показники надійності системи електропостачання електробурів

Назва елемента	Середнє напрацювання на відмову, год.	Параметр потоку відмов, $\times 10^{-4}$	Середній час ремонту, год.
Струмоприймач	186	1,4	23,6
Телеметрична система	244,7	1,2	20,4
Пристрій контролю ізоляції	106,2	1,6	13,9
Кабельна секція	149,9	1,3	18,8
Станція управління електробуром	988,4	0,96	16,4
Повітряна ЛЕП 6 кВ	16723,2	0,46	20,3
Буровий трансформатор	17914,1	0,5	70,2

Для проведення досліджень електротехнічного комплексу для електробуріння в середовищі віртуального програмування LabVIEW компанії National Instruments створено модель системи електропостачання електробура.

Хоча програмне забезпечення LabVIEW призначене переважно для автоматизації методологічної частини активних експериментів та задач керування, але воно містить бібліотеки підпрограм стандартних алгоритмів обробки інформації та математичних функцій. Перевагою математичного моделювання в LabVIEW є можливість об'єднання комп'ютерних програм математичної моделі та вимірювання і реєстрації даних експериментальних досліджень функціонування електротехнічних комплексів у реальному масштабі часу.

Вихідними даними для розрахунку є параметри бурового трансформатора (БТ) та електродвигуна електробура, які вводяться на початку розрахунку. На рисунку 1 зображено вікно для безпосереднього введення параметрів БТ: номінальна вторинна напруга обмоток БТ; номінальний вторинний струм; напруга короткого замикання і втрати потужності короткого замикання. Перелічені параметри отримуються з каталожних даних бурового електрообладнання.

Для електробура вводимо: значення номінальної напруги електродвигуна; номінальний струм фази статора; активні та індуктивні опори фази статора та ротора; активний та індуктивні опори намагнічувального контура; синхронна та номінальна швидкості обертання. Значення активних та індуктивних опорів електродвигуна, які використовуються в схемі заміщення, отримуються шляхом перерахунку паспортних даних.

Математична модель дає змогу досліджувати функціонування електробура [4], тобто обчислювати значення фазних напруг на затискачах електродвигуна, струмів у його фазах, активну потужність та механічну потужність на валі електродвигуна.

Комплексний опір фази електродвигуна:

$$Z(s) = Z_1 + \frac{Z_m \cdot Z_2(s)}{Z_m + Z_2(s)}, \quad (2)$$

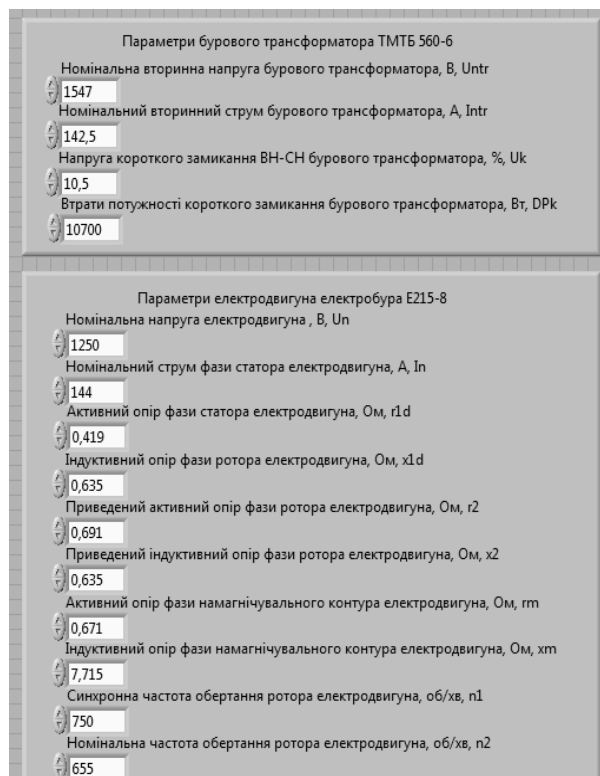


Рисунок 1 – Панель введення даних для розрахунку параметрів схеми заміщення бурового трансформатора та електробура

де Z_1 – комплексний опір фази статора, Z_m – комплексний опір вітки намагнічування, $Z_2(s)$ – опір фази ротора, який залежить від ковзання.

Питомі активні опори труби та жил кабелю струмопідводу системи “два проводи – труба” з врахуванням температури бурового розчину:

$$R_t = r_{t20} (1 + 0,006T_{br}); \quad (3)$$

$$R_g = r_{g20} (1 + 0,004T_{br}), \quad (4)$$

де r_{t20} , r_{g20} – питомі активні опори труби та жили кабелю за температури 20 °С, T_{br} – температура бурового розчину.

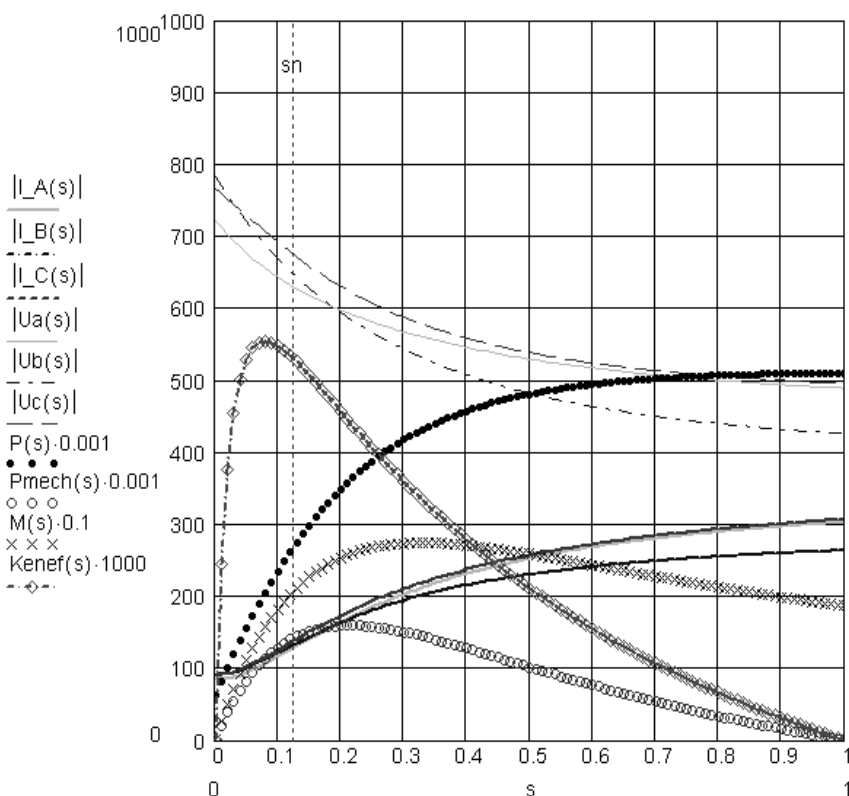


Рисунок 2 – Зміна енергетичних параметрів електробура E240-8М в процесі буріння свердловини на глибині 2 км

Комплексний опір бурильної труби та жил кабелю враховує складові індуктивних опорів, які отримані апроксимацією їх табличних значень, наведених в інструкції для електробуріння:

$$Z_t(s) = R_t(s) + X_t(s) \cdot i, \quad (5)$$

$$Z_g(s) = R_g(s) + X_g \cdot i. \quad (6)$$

Комплексні опори фаз *a, b, c* системи електропостачання електродвигуна електробура залежать від ковзання:

$$Z_a(s) = Z(s) + Z_t(s) + Z_{tr}; \quad (7)$$

$$Z_b(s) = Z_c(s) = Z(s) + Z_g(s) + Z_{tr}, \quad (8)$$

де Z_{tr} – комплексний опір бурового трансформатора, обчислений з врахуванням фактичної напруги вторинної обмотки, що змінюється залежно від глибини буріння;

$Z_t(s)$, $Z_g(s)$ – комплексні опори бурильної труби та жил кабелю з врахуванням індуктивних опорів, які отримані апроксимацією їх табличних значень.

Послідовність обчислення струмів у фазах струмопідводу, напруг на затискачах електробура та обертового моменту на його валі наведена у [4].

Активна потужність, яка споживається на початку струмопідводу:

$$P(s) = P_a(s) + P_b(s) + P_c(s). \quad (9)$$

Втрати потужності у струмовідводі:

$$\Delta P(s) = I_a^2(s)R_t(s) + I_b^2(s)R_g(s) + I_c^2(s)R_g(s). \quad (10)$$

Розраховуємо активну потужність, яка споживається електробуром:

$$P_{elb}(s) = P(s) - \Delta P(s). \quad (11)$$

Залежність механічної потужності на валу двигуна від ковзання:

$$P_{mech}(s) = \omega \cdot M(s), \quad (12)$$

де ω – кутова швидкість обертання валу, c^{-1} ,

$M(s)$ – обертовий момент на валу двигуна, Н·м.

Результатами моделювання є активна потужність споживання СЕЕ, активна потужність на валу електробура та втрати потужності. За їх значеннями визначається коефіцієнт енергетичної ефективності перетворення електричної потужності на початку струмопідводу в механічну потужність долота:

$$K_{enef}(s) = \frac{P_{mech}(s)}{P(s)}. \quad (13)$$

В результаті обчислень отримуємо залежність енергетичних параметрів електробура від навантаження, які ілюстровані на рисунку 2. Зокрема, показані залежності струмів у жилах кабелю та бурильній трубі, фазні напруги на затискачах електродвигуна, обертовий момент на його валу, активна потужність на початку струмопідводу та механічна потужність на валу електродвигуна.

Перелічені енергетичні параметри отримані для електробура марки E240-8М в процесі похило скерованого буріння газової експлуатаційної свердловини на глибині 2 км.

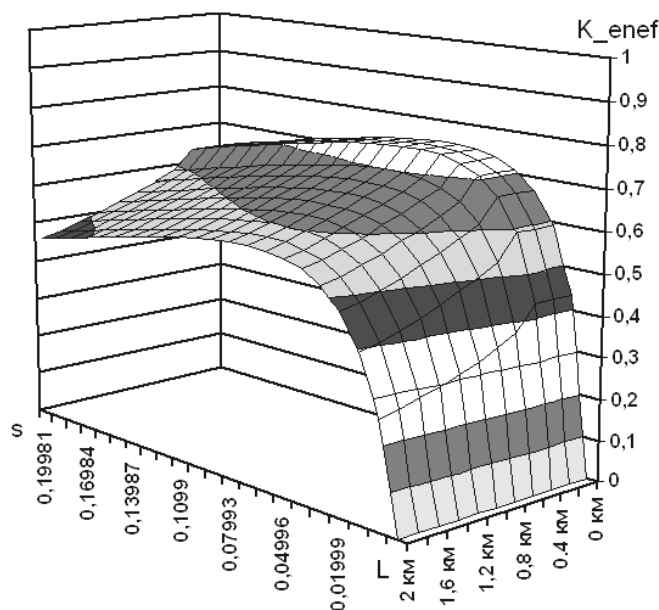


Рисунок 3 – Зміна коефіцієнта енергоефективності буріння свердловини при різних глибини та навантаженні

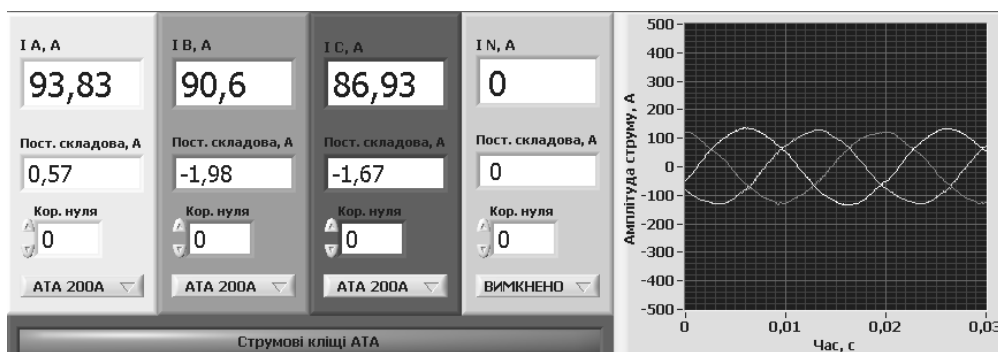


Рисунок 4 – Фрагмент передньої панелі віртуального приладу

При бурінні гірських порід, які залягають на глибині від поверхні до 2 км, і діапазоні зміни навантаження електродвигуна електробура від неробочого ходу до критичного ковзання отримали коефіцієнт енергоефективності буріння свердловини, наведений на рисунку 3.

Отже, максимальну ефективність буріння нижніх інтервалів свердловин можливо забезпечити при навантаженні електродвигуна, дещо меншому від номінального.

Розроблена модель є передумовою до створення інформаційно-вимірювального комплексу для дослідження енергетичних показників електричного обладнання та показників якості електричної енергії.

Комплекс є універсальною портативною комп'ютерною інформаційно-вимірювальною системою, яка призначена для проведення експериментальних наукових досліджень функціонування електротехнічних комплексів.

В основу його роботи покладена технологія віртуальних приладів, яка базується на методах цифрової обробки сигналів і графічному програмуванні алгоритмів прикладних програм.

До складу інформаційно-вимірювального комплексу входять багатодіапазонні гнучкі

струмовимірювальні котушки Роговського типу Fluke i3000 Flex; перетворювачі напруги компенсаційного типу марки CV3-1000; 4-канальний 16-розрядний аналого-цифровий перетворювач (АЦП) з USB-інтерфейсом NI-6210 та ноутбук з розробленим програмним забезпеченням.

Котушки Роговського монтуються навколо провідника із струмом чи шини без розриву електричного кола, конструктивно складаються з власне вимірювальної обмотки, розміщеної всередині гнучкого електроізоляційного каркасу, що замикається в кільце спеціальним замком, і електронного підсилювача-нормалізатора сигналу з коаксіальним затискачем для під'єднання до осцилографів чи АЦП. Верхня межа діапазону вимірювання змінного струму становить 30А, 300А та 3000А в частотному діапазоні від 20 до 10000 Гц. Клас точності вимірювання напруги становить 0,5, струму – 2, потужності – 2,5.

Спочатку здійснюється запис початкових вимірних миттєвих значень напруг і струмів у файл (рисунок 4), після чого запускається програма їх математичного опрацювання.

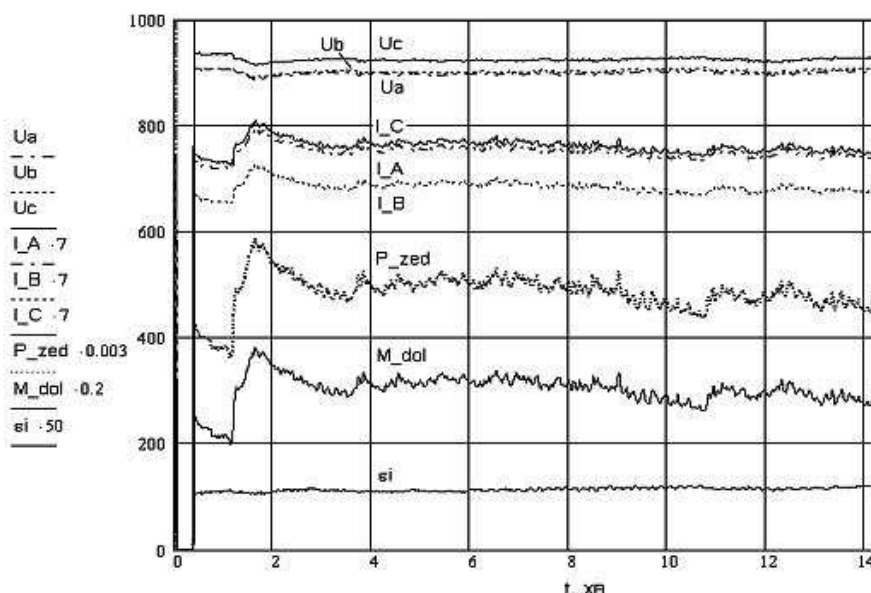


Рисунок 5 – Динаміка зміни фазних напруг, струмів, потужностей та коефіцієнта несиметрії струмів електробура в процесі буріння свердловини

Методом інтегрування квадратів миттєвих значень визначаються діючі значення фазних напруг і струмів на початку струмопідводу:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt}; \quad (14)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt}; \quad (15)$$

де $u(t)$, $i(t)$ – миттєві значення напруги і струму,

T – період інтегрування.

Активна потужність на початку струмопідводу обчислюється шляхом усереднення за період значення миттєвої потужності:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt. \quad (16)$$

Використання системи контролю також уможливило визначення малонадійних елементів шляхом фіксації відхилення їх технологічних параметрів за допустимі межі.

За допомогою вимірювального комплексу проведено збір експериментальних даних на буровій “Сибівка” № 111 Прикарпатського УБР у с. Ясеновець, Рожнятівський район, Івано-Франківська область. Під час проведення експерименту було отримано такі дані: гармоніки струмів та напруг під час пуску електродвигуна, споживання активної, реактивної та повної потужностей, коефіцієнт потужності $\cos\phi$, фазний струм та напруга на глибині забою свердловини 2300 м (рисунок 5).

В ході подальшої обробки експериментальних даних здійснено спектральний аналіз кривих напруги та струму з метою визначення коефіцієнту гармонік, який показаний на рисунку 6.

Проведені експериментальні дослідження на діючих бурових установках та результати математичного моделювання свідчать, що значення коефіцієнта енергоефективності буріння свердловин електробуром знаходиться в межах від 40% до 60%, коефіцієнт гармонічних спотворень струму електробура не перевищує 3%, а коефіцієнт несиметрії струмів перебуває в межах від 3% до 7%. Низька енергоефективність обумовлена значними втратами активної потужності в струмовідводі системи “два проводи-труба”. Кількісні показники надійності занурювального обладнання є низькими.

Необхідно зауважити, що існуюче електробурове обладнання є морально і фізично застарілим, має низькі показники енергоефективності та надійності, що обумовлює необхідність підвищення енергоефективності функціонування і модернізації та реконструкції.

Для забезпечення високої енергоефективності буріння при використанні системи “два проводи-труба” необхідно впровадити плавне регулювання напруги при зміні глибини буріння та застосувати частотне регулювання швидкості електробура. Кардинальне підвищення надійності та енергоефективності електробуріння можливе тільки при використанні системи струмовідводу постійного струму “один провід-труба” і занурювального частотного перетворювача. Це рішення також полегшить керування процесом буріння свердловини.

Висновки

1. Проведено аналіз сучасного стану надійності і ефективності роботи та існуючих методів енергозбереження, проаналізовано статистичні дані бурильних установок Прикарпатського УБР.

2. В результаті математичної обробки статистики відмов основного електричного обладнання бурильних установок встановлено ме-

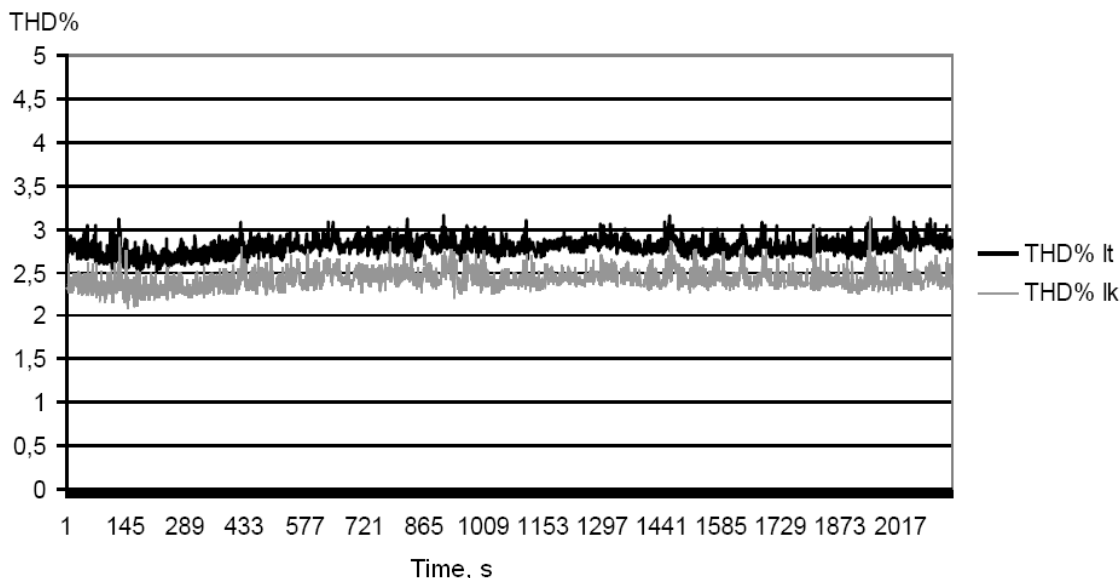


Рисунок 6 – Залежність коефіцієнта гармонік струму жили кабелю і труби в часі

ханізми формування відмов. В основному відмови і відновлення працездатності підпорядковані закону Вейбула-Гнеденка. Виявлено найбільш пошкодзовані елементи системи електропостачання електробура, ідентифіковано ймовірні причини відмов.

3. Використовуючи математичну модель системи електропостачання електробура розрахунково-експериментальним методом, визначено енергетичні показники функціонування та вказано на їх недостатню енергоефективність.

4. За допомогою розробленої інформаційно-виміральної системи здійснено моніторинг енергетичних параметрів системи електропривода бурового долота, який показав значну нерівномірність навантаження електробура в процесі активного буріння, несиметрію струмів та відсутність вищих гармонік.

5. Розроблено заходи з підвищення надійності та енергоефективності електробуріння, які передбачають впровадження системи струмовідведення постійного струму “один провід – труба” і занурювального частотного перетворювача.

Література

1 Фокин Ю. А. Надежность и эффективность сетей электрических систем / Ю.А. Фокин. – М.: Высш. шк., 1989. – 151с.

2 Эндрени Дж. Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах: пер. с англ. / Дж. Эндрени. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 336 с.

3 Федорів М.Й. Дослідження комплексних показників надійності електрообладнання системи електропостачання електробура / М.Й.Федорів, А.І.Поточний, У.М.Николин, А.В.Чуйко // Нафтогазова енергетика. – 2010. – № 1(12). – С. 80-85.

4 Федорів М. Й. Математична модель функціонування системи електропостачання електробура [Текст] / [Федорів М. Й., Николин У. М., Поточний А. І.] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 5. – С. 55-62.

5 Федорів М.Й. Дослідження впливу відмов елементів ситеми електропостачання електробура на величину загальних капіталовкладень / М.Й. Федорів, У.М. Николин // Вісник Кременчуцького державного університету ім. М.Остроградського. – 2010. – № 3/2010(62). – С. 112-114.

6. Федорів М.Й. Математичні моделі надійності функціонування основного електричного обладнання технологічних комплексів для електробуріння / М.Й. Федорів, А. І. Поточний, С. І. Курта // Науковий вісник ДонНТУ. – 2011. – Випуск 11 (186). – С. 401-405.

Стаття надійшла до редакційної колегії
30.08.16

Рекомендована до друку
професором **Костишиним В.С.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором **Николайчуком Я.М.**
(Карпатський державний центр інформаційних засобів і технологій Технічного центру НАН України, м. Івано-Франківськ)