

© В.С. Хілов¹, С.І. Федоров¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

БЕЗСЕНСОРНЕ ВИМІРЮВАННЯ МОМЕНТУ ОПОРУ ТА ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРОПРИВОДІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

© V. Khilov¹, S. Fedorov¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

SENSORLESS TORQUE AND POWER MEASUREMENT IN DC ELECTRIC DRIVE

Мета. Розглянути особливості побудови та функціонування специфічних технологічних механізмів для яких потрібно визначення моменту опору та потужності на робочому органі виконавчого механізму. Дослідити можливості безсенсорного вимірювання механічних параметрів привідних системах постійного струму. За такого підходу збільшується працездатність робочого органу за рахунок підтримки та стабілізації на сталому рівні потоку механічної потужності на валу двигуна. Досягти підтримання потужності на незмінному рівні дозволяє реалізувати “м’які” механічні характеристики на робочому органі приводу, що за певних умов дозволяє враховувати технологічні особливості роботи та підвищити працездатність технологічного інструменту.

Методика. Дослідження здійснено на підставі використання ідей модального синтезу спостерегаючого пристрою. За цією методикою знайдена оцінка для вектору стану системи спостереження. Оцінка стану проведена на базі інформації про вхідні й вихідні величини системи і її структури, що апріорно відомі. Використання матричного математичного апарату надало можливості знайти вихідні рівняння, що описують динамічні процеси в об’єкті керування.

Результати. На підставі прямих вимірів діючих значень напруги та струму привідного двигуна постійного струму визначені механічні параметри технологічного процесу такі як механічний момент опору та активна потужність на робочому органі за якими синтезована система керування та здійснюється стабілізація потоку потужності в робочій зоні.

Наукова новизна. Встановлені динамічні параметри системи керування, які дозволяють за визначеним моментом опору контролювати потік механічної потужності на робочому органі привідного двигуна.

Практична значимість. Використання синтезованої системи керування дозволяє достовірно визначати механічні параметри технологічного процесу, стабілізувати їх на припустимому рівні, що збільшить працездатність робочого органу. Визначивши механічні параметри технологічного процесу можливо синтезувати систему керування з регуляторами моменту та потужності, що призведе до отримання м’яких механічних характеристик.

Ключові слова: *напруга та струм двигуна, момент опору робочого механізму, потік потужності, механічні характеристики, асимптотичний ідентифікатор стану, система спостереження.*

Вступ. Існує великий клас технологічних механізмів для яких потрібно підтримувати потужність на сталому рівні при зміні зовнішніх факторів [1, 2], у яких використовуються сучасні цифрові або аналогові приводи постійного або змінного струмів. Такі електромеханічні системи є цілком керованими і розширюють

можливості автоматизації та механізації технологічних процесів, чого неможливо досягти при використанні нерегульованих приводів. Підтримання потужності на незмінному рівні дозволяє реалізувати “м’які” механічні характеристики на робочому органі приводу, що за певних умов дозволяє враховувати технологічні особливості роботи та підвищити працездатність технологічного інструменту.

Такий підхід має важливе практичне застосування, наприклад, при руйнуванні гірничих порід буровими верстатами [3, 4]. Для рівномірного спрацювання долота в часі необхідно, щоб потік енергії, який генерується за каналом частота обертання поставу – потужність руйнування породи, лінійно зростає у функції часу, тобто швидкість витрати енергії по цьому каналу повинна мати постійну величину. Тобто, для підтримки швидкості накопичення руйнувань від втоми матеріалу на постійному рівні необхідно регулювати швидкість уведення енергії в зону вибою. Необхідно змінювати частоту обертання поставу зворотно-пропорційно моменту опору на долоті. Це можливо здійснити шляхом підтримки на постійному рівні потужності, що надходить за каналом частота обертання – потужність руйнування породи.

Таким чином, виходячи з енергетичного критерію стійкості долота одержимо найбільшу стійкість долота при рівномірному енергетичному навантаженні, тобто при підтримці лінійного зростання енергії руйнування породи або при підтримці на постійному рівні потужності, яка виділяється в зоні контакту долото–вибій. Запропонований критерій працездатності долота узагальнює раніше запропоновані критерії (проходка на долото, моторесурс долота, умовне спрацювання долота), тому що автоматично враховує міцність і абразивність породи, яка руйнується долотом [5].

Для реалізації такого способу руйнування гірської породи необхідно вимірювати момент опору на шарошковому долоті, що безпосередньо неможливо із-за агресивного середовища в зоні вибою. Тому поставимо та розв’яжемо задачу виміру моменту опору без використання давача опору на шарошковому долоті, що дозволить підтримувати постійний потік потужності на долоті.

Основна частина. При використанні привода обертання без давачів моменту опору на шарошковому долоті доступними для виміру координатами є напруга й струм якоря привідного двигуна. Синтезуємо систему керування, яка контролює частоту обертання двигуна, моменту опору та потужність на долоті, що використовує інформацію про поведінку об’єкта керування на основі асимптотического ідентифікатора стану.

При вирішенні поставленої задачі за приводну систему приймаємо систему на постійному струмі (керований статичний випрямляч-двигун постійного струму). Розрахунок ведемо за діючими значеннями струму й напруги, нехтуючи пульсаціями на виході випрямляча. Не враховуємо хвильові процеси в буровому поставі. Механічну частину приводної системи враховуємо як зведений момент інерції поставу до валу двигуна.

Функціональна схема (рис. 1) містить систему регулювання потужністю руйнування шарошковим долотом гірської породи, що впливає на вхідну

напругу тиристорного перетворювача й контролює струм якоря двигуна. Частота обертання долота, момент опору і потужність руйнування породи не доступні для прямого виміру, тому що на двигуні обертання відсутній датчик частоти обертання, а момент опору на шарощці й потужність руйнування породи за технічних обставин в принципі не можливо виміряти. Вихідною величиною об'єкта керування є тільки струм двигуна.

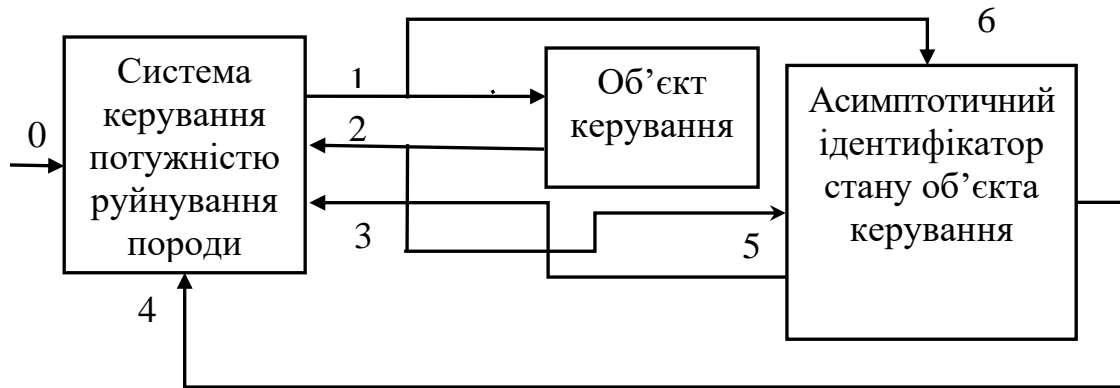


Рис. 1. Функціональна схема регулювання

Синтез системи керування робимо за методикою, що наведена в [6].

Щоб скористатися перевагами модального керування, необхідно знайти оцінку (заміну) для вектору стану системи. Для оцінки стану скористаємося інформацією про вхідні й вихідні величини системи і її структурі, що апріорно відомі. Вихідні рівняння, що описують динамічні процеси в об'єкті керування (двигун постійного струму з механізмом (див. рис. 1) представляємо в матричному виді, використовуючи поняття простору станів

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{X}}{dt} &= A\bar{X} + BU + FM_C \\ \bar{Y} &= C\bar{X}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де A, B, C, F – матриці коефіцієнтів; X – вектор стану; Y – вектор величин, що спостерігаються:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_A} & -\frac{C_E \cdot \Phi_H}{R_A \cdot T_A} \\ \frac{C_M \cdot \Phi_H}{J} & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_A \cdot T_A} \\ 0 \end{bmatrix}; C = [1 \quad 0]; F = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix};$$

$$\bar{Y} = C \cdot \bar{X} = I.$$

Напруга U на якорі двигуна є вхідною керованою величиною, а струм I – величиною, що спостерігається. Момент опору M_C на шарошковому долоті не доступний для безпосереднього виміру.

Спочатку перевіряємо умови, яким повинен задовольняти об'єкт керування, щоб задача оцінки його стану мала рішення. Для цього перевіряємо ранг матриці спостереження, що не повинен бути дорівнювати нулю

$$Q = \begin{bmatrix} CA^0 \\ CA^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{T_A} & -\frac{C_E \cdot \Phi_H}{R_A \cdot T_A} \end{bmatrix} = -\frac{C_E \cdot \Phi_H}{R_A \cdot T_A} \neq 0; \quad \text{rank}Q = 2.$$

Ранг матриці спостереження дорівнює двом, тобто досліджуваний об'єкт спостереження повністю ідентифікований й описується незалежними лінійними рівняннями.

Математична модель об'єкта керування описується системою диференціальних рівнянь ідентичної для об'єкта управління

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\hat{X}}{dt} &= A \cdot \hat{X} + B \cdot U + L \cdot (\bar{Y} - \hat{Y}); \\ \hat{Y} &= C \cdot \hat{X}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де \hat{X} , \hat{Y} – розраховані на математичній моделі вектори стану й контрольованих величин; U – вхідне збурення, що надходить на реальний об'єкт керування й на математичну модель; $L \cdot (\bar{Y} - \hat{Y})$ – вектор помилки керування.

Тому що момент опору прикладається тільки до об'єкта управління, а в математичній моделі він дорівнює нулю, то для точного відтворення координат керування на моделі об'єкта вводиться вектор помилки відновлення вимірюваних змінних $L \cdot (\bar{Y} - \hat{Y})$, котрий має розмірність, що відповідає розмірності вектору стану

$$L = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix}.$$

Із системи рівнянь (1), одержуємо

$$\frac{d\hat{X}}{dt} = (A - LC) \cdot \hat{X} + B \cdot U + L \cdot \bar{Y}.$$

Вибір елементів матриці означає вибір виду характеристичного рівняння ідентифікатора, тобто

$$\det[\lambda \cdot E - (A - L \cdot C)] = 0,$$

де λ – корінь характеристичного рівняння; E – одинична матриця.

Для вибору розподілу коренів зручно скористатися однією із численних стандартних форм.

Визначаємо корінь характеристичного рівняння об'єкта ідентифікації

$$\det[\lambda \cdot E - A] = \lambda^2 + \lambda \cdot \frac{1}{T_A} + \frac{C_E \cdot C_M \cdot \Phi_H^2}{J \cdot R_A \cdot T_A} = 0.$$

Звідки корінь характеристичного рівняння знаходиться у наступному вигляді:

$$\lambda_{1,2} = -\frac{1}{2 \cdot T_A} \cdot \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4 \cdot C_E \cdot C_M \cdot \Phi_H^2 \cdot T_A}{J \cdot R_A}} \right),$$

тобто залежно від чисельного значення параметрів об'єкта ідентифікації корені можуть бути різними.

Якщо корені комплексно-спряжені або дійсна та рівні, то дійсна частина кореня визначається співвідношенням:

$$\text{Real}(\lambda_{1,2}) = -\frac{1}{2 \cdot T_A}. \quad (3)$$

Надалі будемо орієнтуватися на останнє значення коренів, тому що в цьому випадку можливо одержати компактні аналітичні вирази. Випадок з дійсними різними коріннями не представляє принципової складності, але рівняння виходять значно більше громіздкими.

Знаходимо характеристичне рівняння спостерігача

$$\det[\lambda \cdot E - (A - L \cdot C)] = \lambda^2 + \lambda \cdot \left(\frac{1}{T_A} + L_1 \right) - \frac{C_E \cdot \Phi_H}{R_A \cdot T_A} \cdot \left(L_2 - \frac{C_M \cdot \Phi_H}{J} \right). \quad (4)$$

Приймаємо біноміальне розподіл коренів характеристичного рівняння

$$(\lambda + p)^2 = \lambda^2 + 2\lambda p + p^2. \quad (5)$$

Дорівнюючи коефіцієнти при однакових ступенях рівнянь (4) і (5), одержимо

$$L_1 = 2p - \frac{1}{T_A}; L_2 = \frac{C_M \Phi_H}{J} - \frac{R_A T_A p^2}{C_E \Phi_H},$$

де прийнято відповідно до рівняння (3)

$$p = (3...4) \text{Re al}(\lambda_{1,2}) \quad (6)$$

Вибір параметра p , що визначає швидкодію ідентифікатора, у загальному випадку представляє нетривіальну задачу. Якби структура та параметри об'єкта керування були точно відтворені в ідентифікаторі, а момент опору, що прикладений до шарошкового долота, діяв би й на ідентифікатор, замикання системи керування по розрахованих координатах \hat{X} було еквівалентно замиканню по реальних координатах X (за умови що вони доступні для виміру). Власна динаміка ідентифікатора при цьому не впливала на динаміку об'єкта керування, замкнуту через нього. У цьому випадку зв'язок через матрицю L не працює.

Невідповідність між математичним описом об'єкта й ідентифікатором виражається у тому, що на об'єкт діють збурювання, які не можна виміряти та увести в спостерігач. Тому бажано мати високу швидкодію ідентифікатора, при цьому розходження між реальними й відновленими координатами буде в загальному випадку тим менше, чим вище значення p .

З іншого боку, на вимірювані координати об'єкта накладений шум через вібрації поставу в процесі буріння у вигляді високочастотних пульсацій, тому збільшення може привести до неприпустимого збільшення рівня шуму на виходах ідентифікатора.

За цих обставин прийнято швидкодію ідентифікатора трохи вище швидкодії об'єкта керування, що через нього буде замкнута. При розрахунку це виражається в тому, що в рівнянні (3.6) прийнятий коефіцієнт пропорційності в діапазоні від 3 до 4.

На підставі систем рівнянь (1), (2) будуємо структурну схему ідентифікатора моменту опору, частоти обертання й потужності на шарошці, рис. 2. Об'єкт керування (рис. 3) містить аперіодичну ланку (якірне коло двигуна) і інтегратор (механічна ланка привода). Двигун охоплений від'ємним внутрішнім зворотним зв'язком за проти-ЕРС. На вході аперіодичної ланки порівнюються вхідна напруга (керований сигнал) і проти-ЕРС двигуна. На вході інтегратора порівнюються крутний момент двигуна з моментом опору. Момент опору є неспостережуваний і некерований сигнал. Крутний момент оцінюється за повним струмом приводної системи.

Синтезований пристрій ідентифікації містить два інтегратори (рис. 2). Його основна частина повторює структуру об'єкта керування. Відмінність полягає у відсутності сигналу пропорційного моменту опору. Крім того, ідентифікатор містить три пропорційних ланки й пристрій множення. Пропорційні ланки коректують динаміку ідентифікатора – приводять у відповідність спостережувані координати з координатами, які розраховані на математичній моделі об'єкта керування.

Визначення моменту опору на шарошковому долоті дозволяє побудувати систему керування (рис. 4) з підтримкою потоку потужності на шарошковому долоті в заданих межах, що дозволяє.

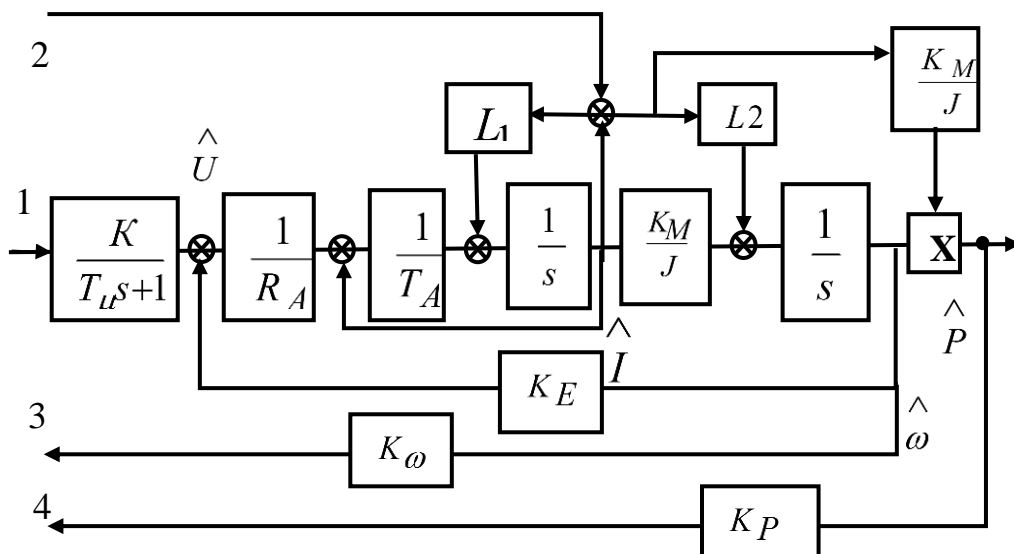


Рис. 2. Асимптотичний ідентифікатор моменту опору та потужності об'єкта керування

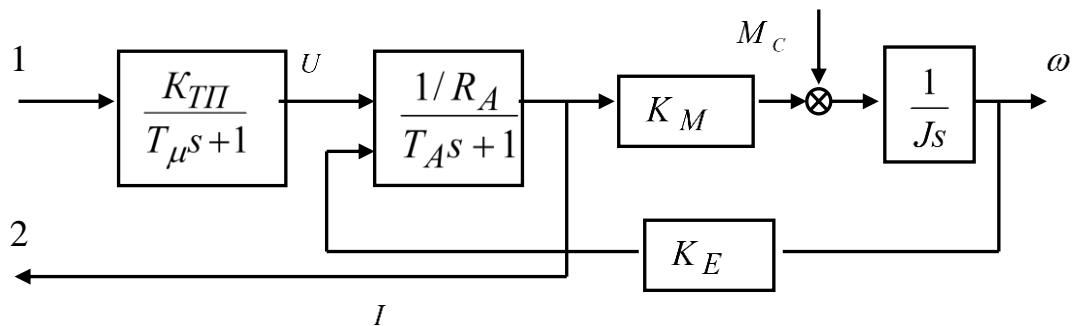


Рис. 3. Об'єкт керування

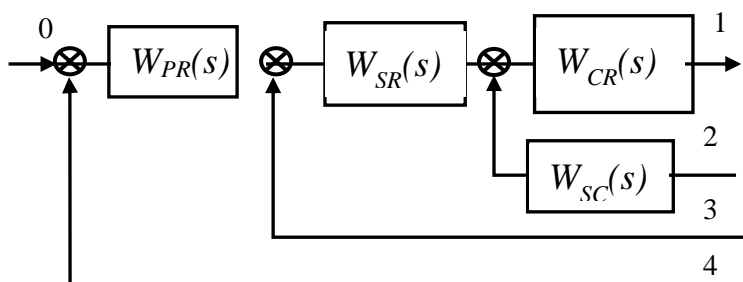


Рис. 4. Система керування потужністю руйнування породи

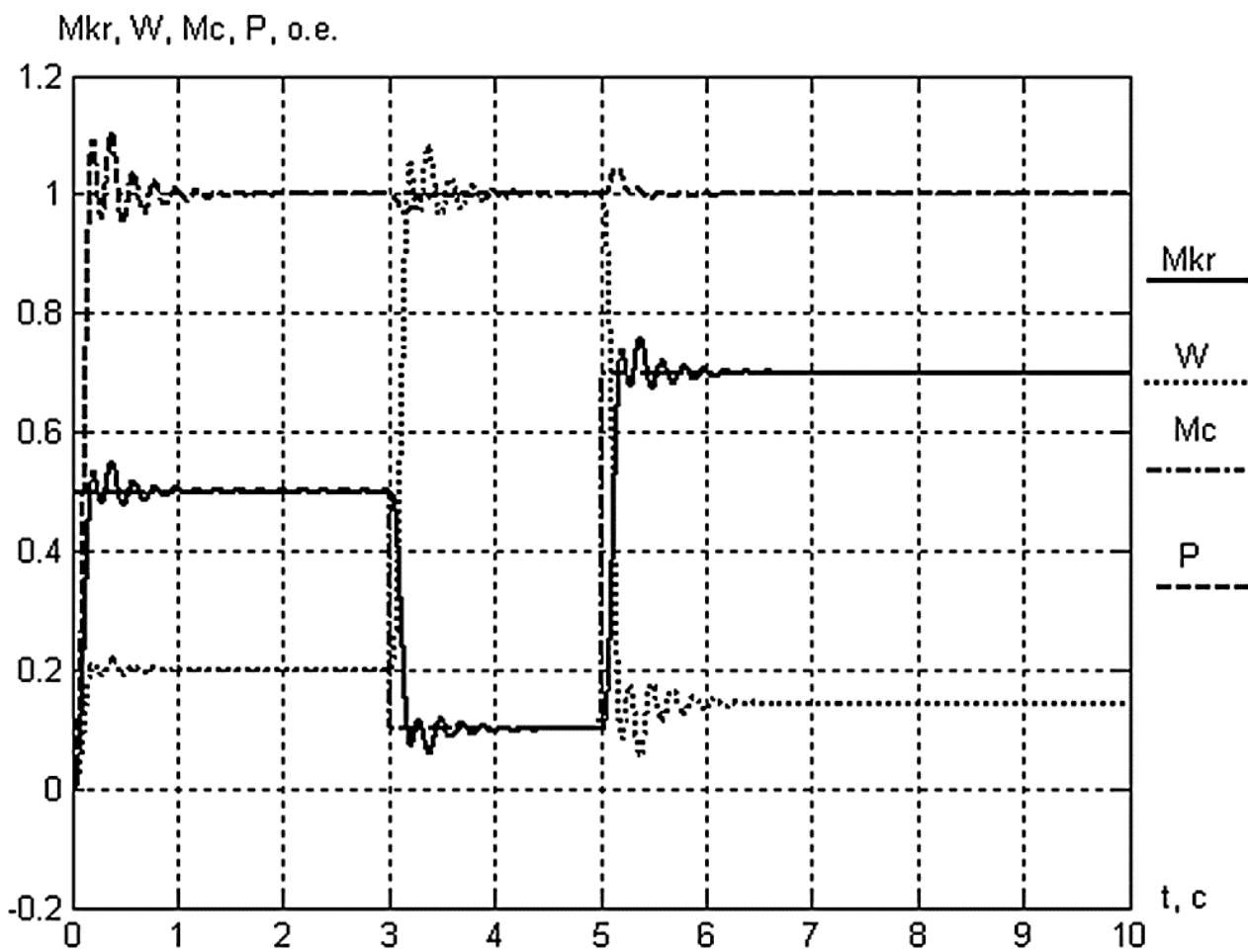


Рис. 5. Осцилограми зміни статичного моменту M_c , крутного моменту M_{kr} , частоти обертання W , потужності приводної системи P



Рис. 6. Осцилограми зміни статичного моменту M_C , крутного моменту M_{KP} , частоти обертання ω і потужності приводної системи P при динамічній корекції

Для перевірки працездатності синтезованої системи регулювання потужності зроблено математичне моделювання для параметрів бурового шарошечного верстата СБШ-250МН32, на якому встановлено тиристорний перетворювач ТЕ-250/460-У2 з двигуном Д-812.

За вихідними даними тиристорного перетворювача і двигуна, а також наведеному моменту інерції зібраного бурового става до швидкості обертання двигуна – 4,1 кг м², розраховані параметри об'єкта управління та за розробленою методикою синтезовано передавальні функції регуляторів струму, електрорушійної сили та потужності триконтурної системи управління, яка описується нелінійними диференціальними рівняннями. Нелінійними елементами є: обмеження вихідних сигналів регуляторів, блоки множення та множно-ділильний пристрій, що визначають потужність по вхідному струмі й електрорушійній силі, а також динамічну корекцію контуру регулювання потужності буріння. Розраховані осцилограми перехідних процесів в електроприводі без динамічної корекції й з нею, наведені на рис. 5 і рис. 6, відповідно. Як виходить з виду графіків струму, електрорушійної сили й потужності динамічна корекція ефективно згладжує коливальний процес у моменти істотних змін моменту опору на шарошковому долоті.

Висновки. Використання асимптотичного ідентифікатора дозволяє достовірно визначати недоступні для прямого вимірювання моменту опору на шарошечному долоті і потужності руйнування породи, за якими будується система управління приводом.

Перелік посилань

1. Khilov, V., Hlukhova, N., Somin, A., & Kiiko, V. (2019). Drive systems of the drilling rigs for open pits in Ukraine: state and ways for improvement. *E3S Web of Conferences*, 123, 01042. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301042>
2. Khilov, V., Tryputen, M., Kuznetsov, V., Babyak, M., Maksim, K., & Gorodny, O. (2020). Effect of The Types of Drive Systems of Drilling Rigs on The Rock Breaking Dynamics. 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 315–319. <https://doi.org/10.1109/ess50319.2020.9160265>
3. Khilov, V.S. (2013). A Solution to the Problem of Frequency Compatibility Between Drive System and Dynamic Parameters of Drill Rings. *Energy Efficiency Impotent of Geotechnical Systems*, 103–114. <https://doi.org/10.1201/b16355-14>
4. Півняк, Г. Г., Бешта, А.С., & Хілов, В.С. (2009). Розробка методу послідовної корекції з використанням нечіткого керування електроприводом обертання бурового верстата *Техн. Електродинаміка*, 3, 59–64.
5. Хілов, В.С. (2003). *Спосіб керування процесом буріння* (Patent No. 61548).
6. Pivnyak, G.G., Beshta, A.S., & Khilov, V.S. (2004). Upravlenie privodom vrashcheniya stava sharoshechnogo bureniya na osnove asimptoticheskogo identifikatora sostoyaniya. *Elektrotekhnik*, 6, 23–26.

ABSTRACT

Purpose. Determination of the resistance torque and power on the working body of the executive mechanism of the DC electric drive in order to increase the efficiency of the working body by maintaining and stabilizing the flow of mechanical power on the motor shaft at a constant level. the features of the construction and operation of specific technological mechanisms for which it is necessary to determine the torque of resistance and power on the working body of the executive mechanism. The possibilities of sensorless measurement of mechanical parameters of direct current drive systems are investigated. The resistance torque and power on the working body of the executive mechanism of the DC electric drive in order to increase the efficiency of the working body by maintaining and stabilizing the flow of mechanical power on the motor shaft at a constant level are determination. With this approach, the working capacity of the working body increases due to the maintenance and stabilization at a constant level of the flow of mechanical power on the engine shaft. Achieving the maintenance of power at a constant level allows one to implement "soft" mechanical characteristics on the working body of the drive, which under certain conditions allows one to take into account the technological features of work and increase the efficiency of the technological tool.

The methods. The study was carried out on the basis of the ideas of modal synthesis of the observing device. According to this technique, an estimate for the state vector of the surveillance system is found. The state assessment was carried out on the basis of information about the input and output values of the system and its structure, which are known a priori. The use of a matrix mathematical apparatus made it possible to find the initial equations describing the dynamic processes in the control object.

Findings. On the basis of direct measurements of the operating values of the voltage and current of the DC drive motor, the mechanical parameters of the technological process, such as the mechanical

moment of resistance and active power on the working body, are determined, according to which the control system is synthesized and the power flow is stabilized in the working area.

The originality. The dynamic parameters of the control system are set, which allow controlling the flow of mechanical power on the working body of the drive engine based on the specified torque of resistance.

Practical implementation. The use of a synthesized control system allows you to reliably determine the mechanical parameters of the technological process, stabilize them at an acceptable level, which will increase the efficiency of the working body. Having determined the mechanical parameters of the technological process, it is possible to synthesize a control system with torque and power regulators, which will lead to soft mechanical characteristics.

Keywords: *motor voltage and current, resistance torque of the working mechanism, power flow, mechanical characteristics, asymptotic state identifier, control system.*