

УДК 622.233.6:-83:68.3

В.С. Хілов, д-р. техн. наук, проф.

Державний вищий навчальний заклад „Національний гірничий університет“, м. Дніпропетровськ, Україна, e-mail: khilov53@ukr.net

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ПРИ НЕЛІНІЙНІЙ КОРЕКЦІЇ ЗА ЗАВДАННЯМ ПОТУЖНОСТІ

V.S. Khilov, Dr. Sci. (Tech.), Professor

State Higher Educational Institution "National Mining University", Dnipropetrovsk, Ukraine, khilov53@ukr.net

STUDY OF INFORMATION-ANALYTICAL PROPERTIES OF ELECTROMECHANICAL SYSTEM BY UNLIEAR CORRECTION AS TO POWER ASSIGNMENT

Мета. Визначення якісних і кількісних показників системи керування потужністю на шарошковому долоті.

Методи. В основу досліджень покладено апробовані методи: частотного аналізу, диференціального аналізу, операційного числення, теорії матриць і матричних перетворень, теорії автоматичного керування багатоконтурними системами, декомпозиції.

Результати. Запропоновано й проаналізовано систему керування потоком потужності в зоні вибою, в якій застосована корекція сигналу з виходу задавача інтенсивності на вхід регулятора частоти обертання сигналом пропорційним моменту опору. Встановлено, що така корекція впливає на демпфуючу здатність електромеханічної системи. Зроблено частотний аналіз характеристик динамічних ланок об'єкта управління контуру потужності електромеханічного привода обертання бурового постава шарошкового верстата. Враховано динамічні властивості замкненого оптимізованого контуру струму двигуна за відсутності впливу обертової електрорушійної сили. У привідній системі враховано динамічні властивості швидкодіючого регульованого електропривода за системою перетворювач частоти-асинхронний двигун зі смугою пропускання контуру частоти обертання до ста радіан за секунду. Знайдено, що замкнений контур потужності за нелінійною корекцією описується передатною функцією з характеристичним рівнянням третього порядку зі змінними коефіцієнтами. Це дозволяє безпосередньо використати параметри діаграми Вишнеградського для оцінки якості керування. Досліджено вплив на коефіцієнти Вишнеградського параметрів системи керування, що дозволило виділити області монотонного, аперіодичного, періодично-збіжного та розбіжного перехідних процесів. Встановлено розташування на діаграмі Вишнеградського зон перехідних процесів системи керування, що контролює потужність руйнування породи. Знайдено розташування ліній однакових значень ступенів стійкості та реакція замкненого контуру потужності за збуренням при настроюванні контуру частоти обертання на модульний та симетричний оптимуми за нелінійною корекцією потужності. Знайдено значення дискримінанту залежно від сполучення величин завдання на потужність руйнування та моменту опору на шарошковому долоті, що дозволяють отримати стійкі перехідні процеси. Встановлено, що запропонована корекція збільшує демпфуючу здатність усієї системи керування. Доведено, що при замиканні у привідній системі обертання постава зовнішнього контуру регулювання за потужністю реалізується алгоритм керування процесом шарошкового буріння, при якому забезпечуються параболічні механічні характеристики на долоті при руйнуванні міцних гірських порід. Це призводить до роботи шарошкового долота в режимі ресурсозбереження.

Наукова новизна. Уперше досліджено вплив нелінійної корекції електромеханічної системи обертання бурового постава на якість керування контуру швидкості шарошкового долота.

Практична значимість. Отримані результати дозволяють за початковими даними об'єкта керування розраховувати настроювання регулятора зовнішнього контуру та оцінити показники якості контуру керування потужністю електромеханічної системи обертання бурового постава.

Ключові слова: електромеханічна система, обертання долота, стійкість контуру керування

Постановка проблеми та її зв'язок із прикладними задачами. Буріння вибухових свердловин шарошковими долотами – найбільш енерго- та матеріалоемний процес в існуючій технології видобутку корисних копалин відкритим способом. Вартість бурових робіт на кар'єрах складає від 16 до 36% загальних витрат, що припадають на видобуток тонни

корисних копалин. Підвищення ефективності руйнування гірської породи шарошковим долотом безпосередньо пов'язане з рівнем досконалості привідних систем. Розроблений Ново-Краматорським машинобудівним заводом верстат для буріння підривних свердловин оснащено плавно регульованою привідною системою обертання бурового постава. Шарошкове долото обертається регульованим електроприводом за системою „перетворювач частоти-асинхронний двигун“ [1, 2].

Аналіз досліджень і публікацій. Введення постійно увімкненого зовнішнього контуру контролювання потужності [3, 4] дозволяє ефективно підтримувати на заданому рівні потужність привідної системи при проходці у міцних породах, але ускладнює реалізацію жорстких механічних характеристик при бурінні по м'яким і зруйнованим гірським породам. Для усунення такого недоліку запропонуємо та дослідимо систему керування потужністю з використанням регулятора, що забезпечує роботу привода з автоматичним переходом як на жорсткі, так і на м'які механічні характеристики на шарошковому долоті.

Для цієї мети сигнал, що задає на вході регулятора ектрорушійну силу (ЕРС) (частоти обертання), поділимо на сигнал, пропорційний моменту опору на шарошковому долоті. Цей сигнал може бути ідентифікований астатичним спостерігачем, тоді він буде відповідати в точності моменту опору на долоті в зоні вибою. Для спрощення припускаємо, що поточні значення частоти обертання та ЕРС, а також поперечна складова струму статора асинхронного двигуна й момент опору – пропорційні один одному. На першому етапі досліджень впливом оборотної ЕРС і крутильними коливаннями бурової колони на контури керування зневажаємо. За таких припущень функціональна схема привідної системи за каналом керування приводиться до вигляду, що наведено на рис. 1.

Постановка задачі дослідження. Оцінимо особливості інформаційно-аналітичних властивостей електромеханічної системи з нелінійною корекцією потужності на валу двигуна, що дозволить реалізувати параболічні механічні характеристики на шарошковому долоті.

Основний матеріал і результати дослідження. Для дослідження динаміки системи регулювання визначаємо сигнал на вході замкненого контуру частоти обертання

$$\frac{P_3(p)}{\omega(p) \cdot T_{EM} \cdot p^2 \cdot K_M} = \frac{\omega(p)}{W_{ЗКШ}(p)},$$

звідки квадрат зображення частоти обертання має вигляд

$$\begin{aligned} \omega^2(p) &= \frac{W_{ЗКШ}(p) \cdot P_3(p)}{K_M \cdot T_{EM} \cdot p^2} = \\ &= \frac{P_3(p)}{K_{Ш} \cdot K_M \cdot T_{EM} \cdot p^2 \cdot a_{ш} \cdot \sigma_{ш} \cdot (p+1/a_{ш} / \sigma_{ш})} \end{aligned}$$

і власне зображення частоти обертання дорівнює

$$\omega(p) = \sqrt{\frac{P_3(p)}{K_{Ш} \cdot K_M \cdot T_{EM} \cdot a_{ш} \cdot \sigma_{ш}}} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{\sqrt{p+1/a_{ш} / \sigma_{ш}}},$$

де $\omega(p)$ – зображення частоти обертання; $W_{ЗКШ}(p)$ – передатна функція замкненого оптимізованого контуру швидкості; $P_3(p)$ – сигнал задання;

$a_{ш}, \sigma_{ш}$ – коефіцієнт налаштування контуру швидкості та мала некомпенсуєма контуру швидкості.

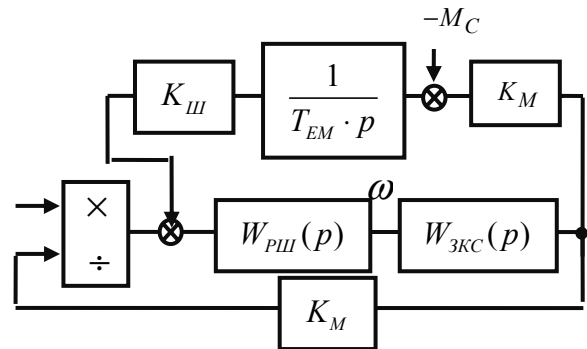


Рис. 1. Функціональна схема системи електропривода за каналом керування з контролюванням потужності на вихідному валу: $K_{Ш}$ – передатний коефіцієнт давача швидкості; T_{EM} – електромеханічна стала часу; p – оператор Лапласа; K_M – передатний коефіцієнт електромеханічної ланки; $W_{ЗКШ}(p)$ – передатна функція замкненого оптимізованого контуру струму; $W_{РШ}(p)$ – передатна функція регулятора швидкості

Оригінали множників визначаємо з табличних функцій

$$\frac{1}{p} \rightarrow 1; \frac{1}{\sqrt{p}} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot t}}; \frac{1}{\sqrt{p+1/a_{ш} / \sigma_{ш}}} \rightarrow \frac{e^{-\frac{1}{a_{ш} \cdot \sigma_{ш}} t}}{\sqrt{\pi \cdot t}},$$

де t – поточний час.

Для знаходження оригіналу частоти обертання використовуємо операцію згортки двох функцій в області дійсного змінного

$$\omega(t) = 1 * \frac{e^{-\frac{t}{a_{ш} \cdot \sigma_{ш}}}}{\sqrt{\pi \cdot t}} = \int_0^t \frac{e^{-\frac{\tau}{a_{ш} \cdot \sigma_{ш}}}}{\sqrt{\pi \cdot \tau}} \cdot d\tau,$$

де τ – параметр інтегрування.

Після підстановки $\tau / (a_{ш} \cdot \sigma_{ш}) = x$, $d\tau = a_{ш} \cdot \sigma_{ш} \cdot dx$ оригінал частоти обертання знаходиться як інтегральне співвідношення виду

$$\begin{aligned} \omega(t) &= \int_0^{\frac{t}{a_{ш} \cdot \sigma_{ш}}} \frac{e^{-x}}{\sqrt{\pi \cdot a_{ш} \cdot \sigma_{ш} \cdot x}} \cdot a_{ш} \cdot \sigma_{ш} \cdot dx = \\ &= \sqrt{\frac{a_{ш} \cdot \sigma_{ш}}{\pi}} \cdot \int_0^{\frac{t}{a_{ш} \cdot \sigma_{ш}}} \frac{e^{-x}}{\sqrt{x}} \cdot dx \end{aligned}$$

Далі застосовуємо неповну гама-функцію

$$\gamma(a, x) = \int_0^x e^{-t} \cdot t^{a-1} \cdot dt.$$

У розглянутому випадку $a = 1/2$, тобто

$$\gamma\left(\frac{1}{2}, x\right) = \int_0^x \frac{e^{-x}}{\sqrt{x}} \cdot dx.$$

Остаточню оригінал частоти обертання за каналом керування приймас вигляд

$$\omega(t) = \sqrt{\frac{a_u \cdot \sigma_u}{\pi}} \cdot \gamma\left(\frac{1}{2}, \frac{t}{a_u \cdot \sigma_u}\right).$$

Передатна функція за каналом збурення без нелінійної корекції потужності з ПІ-регулятором частоти обертання (контур струму – аперіодична ланка) має вигляд

$$\frac{M(p)}{M_C(p)} = \frac{p \cdot a_u \cdot b_u \cdot T_C + 1}{p \cdot a_u \cdot b_u \cdot T_C \cdot [a_u \cdot T_C \cdot p \cdot (T_C \cdot p + 1) + 1] + 1},$$

де $M(p)$ – крутний момент; $M_C(p)$ – момент опору на долоті; T_C – стала часу контуру струму.

Корекція за завданням потужності змінює передатну функцію системи керування за каналом збурення (рис. 2), причому вона буде залежати від динамічної характеристики регулятора частоти обертання

$$\frac{M(p)}{M_C(p)} = \frac{W_{РОКШ}(p)}{1 + W_{РОКШ}(p) \cdot \frac{P_3(p)}{M(p)} \cdot \frac{T_{EM}}{K_{Ш}}},$$

де $W_{РОКШ}$ – передатна функція розімкненого оптимізованого контуру швидкості.

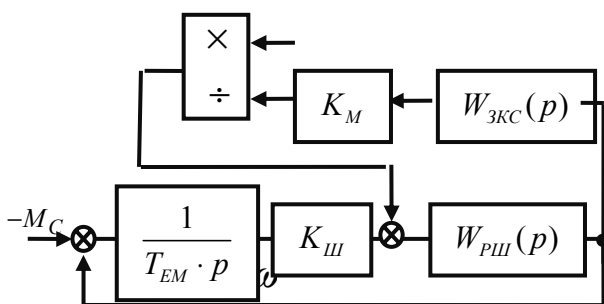


Рис. 2. Функціональна схема системи електропривода за каналом збурення з контролюванням потужності на вихідному валу

Для системи керування з ПІ-регулятором частоти обертання

$$\frac{M(p)}{M_C(p)} = \frac{1}{a_u \cdot T_C^2 \cdot p^2 + \left(a_u \cdot T_C + \frac{P_3(p)}{M(p)} \cdot \frac{T_{EM}}{K_{Ш}}\right) \cdot p + 1}$$

і при використанні ПІ-регулятора

$$\begin{aligned} \frac{M(p)}{M_C(p)} &= \frac{p \cdot a_u \cdot b_u \cdot T_T + 1}{p \cdot a_u \cdot b_u \cdot T_C \cdot [p \cdot a_u \cdot T_C \cdot (T_C \cdot p + 1) + 1] + 1} = \\ &+ (p \cdot a_u \cdot b_u \cdot T_C + 1) \cdot \frac{P_3(p)}{M(p)} \cdot \frac{T_{EM}}{K_{Ш}} \\ &= \frac{p \cdot a_u \cdot b_u \cdot T_C + 1}{p^3 \cdot a_u^2 \cdot b_u \cdot T_C^3 + p^2 \cdot \left(a_u^2 \cdot b_u \cdot T_C^2 + a_u \cdot b_u \cdot T_C \cdot \frac{P_3(p)}{M(p)} \cdot \frac{T_{EM}}{K_{Ш}}\right) +} \\ &+ p \cdot \left(a_u \cdot b_u \cdot T_C + \frac{P_3(p)}{M(p)} \cdot \frac{T_{EM}}{K_{Ш}}\right) + 1. \end{aligned}$$

Характеристичне рівняння передатної функції за каналом збурення, із застосуванням ПІ-регулятора частоти обертання, описується поліномом третього порядку

$$\begin{aligned} p^3 \cdot a_u^2 \cdot b_u \cdot T_C^3 + p^2 \cdot \left(a_u^2 \cdot b_u \cdot T_C^2 + a_u \cdot b_u \cdot T_C \cdot \frac{P_3(p)}{M(p)} \cdot \frac{T_{EM}}{K_{Ш}}\right) + \\ + p \cdot \left(a_u \cdot b_u \cdot T_C + \frac{P_3(p)}{M(p)} \cdot \frac{T_{EM}}{K_{Ш}}\right) + 1 = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

У характеристичне рівняння вводимо нову змінну

$$p = q \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{a_u^2 \cdot b_u \cdot T_C^3}},$$

що дозволяє привести рівняння (1) до нормованого виду

$$q^3 + A \cdot q^2 + B \cdot q + 1 = 0, \quad (2)$$

де коефіцієнти

$$A = \frac{a_u^2 \cdot b_u \cdot T_C^2 + a_u \cdot b_u \cdot T_C \cdot \frac{P_3(p)}{M(p)} \cdot \frac{T_{EM}}{K_{Ш}}}{\sqrt[3]{(a_u^2 \cdot b_u \cdot T_C^3)^2}},$$

$$B = \frac{a_u \cdot b_u \cdot T_C + \frac{P_3(p)}{M(p)} \cdot \frac{T_{EM}}{K_{Ш}}}{\sqrt[3]{a_u^2 \cdot b_u \cdot T_C^3}}$$

є параметрами Вишеградського.

Необхідні умови від'ємності дійсних частин коренів характеристичного рівняння наступні: $A > 0$, $B > 0$ і $A \cdot B > 1$. Якщо перші дві умови наявні, то третю необхідно перевірити

$$A \cdot B = \frac{\left(a_u^2 \cdot b_u \cdot T_C^2 + a_u \cdot b_u \cdot T_C \cdot \frac{P_3(p)}{M(p)} \cdot \frac{T_{EM}}{K_{III}} \right) \cdot \left(a_u \cdot b_u \cdot T_C + \frac{P_3(p)}{M(p)} \cdot \frac{T_{EM}}{K_{III}} \right)}{a_u^2 \cdot b_u \cdot T_C^3} > 1;$$

$$\left(\frac{P_3(p)}{M(p)} \cdot \frac{T_{EM}}{K_{III}} \right)^2 + a_u \cdot T_C \cdot (b_u + 1) \cdot \frac{P_3(p)}{M(p)} \cdot \frac{T_{EM}}{K_{III}} + a_u \cdot T_C^2 \cdot (a_u \cdot b_u - 1) > 0,$$

звідки корінь квадратного тричлена

$$\frac{P_3(p)}{M(p)} \cdot \frac{T_{EM}}{K_{III}} = -0,5 \cdot a_u \cdot T_C \cdot (b_u + 1) \cdot \left(1 \mp \sqrt{1 - \frac{4 \cdot (a_u \cdot b_u - 1)}{a_u \cdot (b_u + 1)^2}} \right).$$

Оскільки мінімальне значення коефіцієнтів налаштування a_u, b_u не може бути менше одиниці, то, відповідно, і добуток цих коефіцієнтів не може бути менше одиниці, тобто $a_u \cdot b_u > 1$, при цьому виконується умова

$$\sqrt{1 - \frac{4 \cdot (a_u \cdot b_u - 1)}{a_u \cdot (b_u + 1)^2}} < 1,$$

тобто обидва корені квадратного тричлена лежать у від'ємній області дійсних значень $P_3(p) \cdot T_{EM} / (M(p) \cdot K_{III})$ комплексної площини.

Звідси виходить, що завдання на потужність буріння з контролем поточного моменту опору на шарошковому долоті $P_3(p) \cdot T_{EM} / (M(p) \cdot K_{III})$ повинні бути додатними величинами.

Враховуючи, що завдання на потужність руйнування має завжди додатне значення, і реактивний момент опору на шарошковому долоті знакопостійний, то умова $A \cdot B > 1$ виконується завжди. Таким чином, введення корегувального зв'язку за моментом опору на вхід регулятора частоти обертання не порушує стійкості системи керування.

Залежно від дискримінанту рівняння (2)

$$D = A^2 \cdot B^2 - 4 \cdot (A^3 + B^3) + 18 \cdot A \cdot B - 27 =$$

$$= \frac{b_u}{T_C^2 \cdot \sqrt[3]{a_u^2 \cdot b_u}} \cdot \left(\frac{P_3(p)}{M(p)} \cdot \frac{T_{EM}}{K_{III}} \right)^4 + \left(\frac{1 + b_u}{T_C^2 \cdot \sqrt[3]{a_u^2 \cdot b_u}} - 4 \cdot \frac{a_u^3 \cdot b_u^3 \cdot T_C^3 + 1}{a_u^2 \cdot b_u \cdot T_C^3} \right).$$

$$\left(\frac{P_3(p)}{M(p)} \cdot \frac{T_{EM}}{K_{III}} \right)^3 + \left(\frac{P_3(p)}{M(p)} \cdot \frac{T_{EM}}{K_{III}} \right)^2 \cdot \left(\frac{1 + b_u + 2 \cdot a_u^2 \cdot b_u^2 \cdot T_C^2}{T_C^2 \cdot \sqrt[3]{a_u^2 \cdot b_u}} - 4 \cdot \frac{3 \cdot a_u^3 \cdot b_u^2 \cdot T_C^3 + 3}{a_u \cdot T_C^2} + 18 \cdot \frac{1}{a_u \cdot T_C^3 \cdot \sqrt[3]{a_u^2 \cdot b_u}} \right) + \left(\frac{2 \cdot a_u^3 \cdot b_u^2 \cdot T_C \cdot (1 + b_u)}{\sqrt[3]{a_u^2 \cdot b_u}} - 4 \cdot \frac{3 \cdot a_u^2 \cdot b_u \cdot T_C + 3 \cdot b_u}{T_C} + 18 \cdot \frac{1 + b_u}{T_C^2 \cdot \sqrt[3]{a_u^2 \cdot b_u}} \right) \cdot \frac{P_3(p)}{M(p)} \cdot \frac{T_{EM}}{K_{III}} + \frac{b_u \cdot (a_u \cdot T_C^2 + 1)}{T_C^2 \cdot \sqrt[3]{a_u^2 \cdot b_u}} - 4 \cdot a_u^4 \cdot b_u^2 \cdot T_C^3 + 18 \cdot \frac{a_u \cdot b_u}{T_C \cdot \sqrt[3]{a_u^2 \cdot b_u}} - 27$$

корені характеристичного рівняння можуть бути дійсними і різними ($D > 0$, аперіодичний перехідний процес), дійсними, два з яких кратні ($D = 0$, граничний аперіодичний перехідний процес), один корінь дійсний і два комплексно-сполучених ($D < 0$, коливальний перехідний процес).

Для початкових значень коефіцієнтів

$$a_u = b_u = 2; T_C = 2 \cdot 10^{-4} c; T_{EM} = 0,12c; K_{III} = 1$$

сигналу завдання на потужність руйнування породи та моменту опору на долоті граничне значення дискримінанта ($D = 0$) визначає чисельне значення

$$\frac{P_3(p)}{M(p)} \cdot \frac{T_{EM}}{K_{III}} = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ або } P_3(p) = 1,5 \cdot 10^{-2} \cdot M(p),$$

тобто для одного дійсного та двох комплексно-сполучених ($D < 0$) коренів необхідна й достатня умова $P_3(p) < 1,5 \cdot 10^{-2} \cdot M(p)$, а для трьох різних дійсних коренів ($D > 0$) $P_3(p) > 1,5 \cdot 10^{-2} \cdot M(p)$.

Розподіл коренів на площині $P_3(p)(M_c(p))$ показано на рис. 3. З умови того, що момент неробочого ходу привода обертання не перевищує 10% від номінального моменту двигуна, то вже при завданні

$P_3 \geq 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot P_{3H}$ (P_{3H} – завдання на номінальну потужність руйнування породи) остання нерівність буде справедливою. Це означає, що практично у всьому діапазоні зміни моменту опору на шарошковому долоті і завданні на потужність руйнування породи перехідні процеси за збуренням у системі керування з ПІ-регулятором частоти обертання і корекцією за потужністю будуть мати монотонний аперіодичний характер, тобто

$$A \cdot B = a_u \cdot b_u + \left(\frac{1}{T_C} + \frac{1}{b_u \cdot T_C} \right) \cdot \frac{P_3(p)}{M(p)} \cdot \frac{T_{EM}}{K_{III}} + \frac{1}{a_u \cdot T_C^2} \cdot \left(\frac{P_3(p)}{M(p)} \cdot \frac{T_{EM}}{K_{III}} \right)^2 > 1.$$

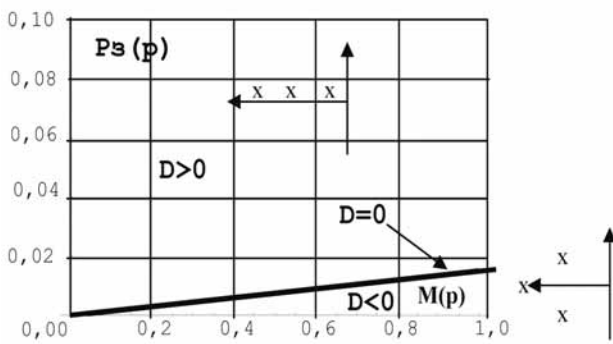


Рис. 3. Значення дискримінанту залежно від сполучення величин завдання на потужність руйнування і моменту опору на шарошковому долоті

Мінімальні значення коефіцієнтів Вишеградського (рис. 4)

$$A_{\min} = \frac{a_u^2 \cdot b_u \cdot T_C^2}{\sqrt[3]{(a_u^2 \cdot b_u \cdot T_C^3)^2}} = \sqrt[3]{a_u^2 \cdot b_u};$$

$$B_{\min} = \frac{a_u \cdot b_u \cdot T_C}{\sqrt[3]{a_u^2 \cdot b_u \cdot T_C^3}} = \sqrt[3]{a_u \cdot b_u^2}$$

визначаються з початкових значень при нульовому сигналі, що є завданням на вході системи керування, тобто лінія GH при коефіцієнтах налаштування $a_u = b_u = 1$ починається на межі стійкості, а при $a_u = b_u = 2$ лежить в області стійкого перехідного процесу. Тобто, необхідна й достатня умова збереження стійкості системи керування не порушується при введенні нелінійного регулятора потужності. Лінія GH – це геометричне місце точок вершин парабол, що належать параболом, при поточних значеннях завдання на потужність руйнування породи P_3 і моменту опору на долоті, що дорівнює у статиці крутному моменту двигуна M .

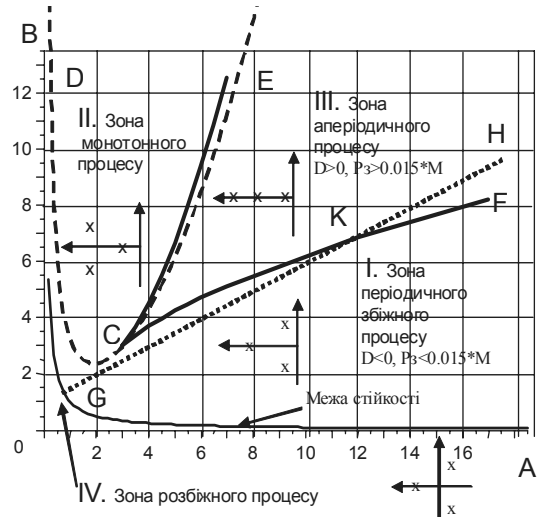


Рис. 4. Розташування на діаграмі Вишеградського зон перехідних процесів системи керування, що контролює потужність руйнування породи

Для визначення ліній рівних ступенів стійкості припускаємо, що $q = -\eta_0$ – найближчий до нуля корінь (ступінь стійкості), тоді зміщене нормоване характеристичне рівняння приймає вигляд

$$q^3 + A \cdot q^2 + B \cdot q + 1 = (q + \eta_0) \cdot P_2(q),$$

де $P_2(q) = q^2 + (A - \eta_0) \cdot q + [B - \eta_0 \cdot (A - \eta_0)]$.

Після виділення $P_2(q)$ отримуємо залишок $1 - [B - \eta_0 \cdot (A - \eta_0)] \cdot \eta_0$, що повинен дорівнювати нулю, а саме

$$1 - \left[\frac{a_u \cdot b_u \cdot T_C + \frac{P_3(p)}{M(p)} \cdot \frac{T_{EM}}{K_{III}}}{\sqrt[3]{a_u^2 \cdot b_u \cdot T_C^3}} - \frac{\left(a_u^2 \cdot b_u \cdot T_C^2 + a_u \cdot b_u \cdot T_C \cdot \frac{P_3(p)}{M(p)} \cdot \frac{T_{EM}}{K_{III}} \right)}{\sqrt[3]{(a_u^2 \cdot b_u \cdot T_C^3)^2}} \right] \cdot \eta_0 = 0.$$

Звідки й одержуємо рівняння ліній з однаковими значеннями стійкості

$$\frac{P_3(p)}{M(p)} \cdot \frac{T_{EM}}{K_{III}} = \frac{(\eta_0^3 - \eta_0^2 \cdot \sqrt[3]{a_u^2 \cdot b_u} + \sqrt[3]{a_u \cdot b_u^2} \cdot \eta_0 - 1)}{\left(\eta_0 \cdot \frac{1}{T_C} \sqrt[3]{\frac{b_u}{a_u}} - \frac{1}{T_C \cdot \sqrt[3]{a_u^2 \cdot b_u}} \right)}$$

На підставі останніх рівнянь, задаючи різні значення $\eta_0 = const$, побудовані лінії з однаковими значеннями нормованого ступеня стійкості (рис. 5). Лінія $\eta_0 = 0$ збігається з межею стійкості.

Як виходить із розташування ліній з однаковими значеннями ступеня стійкості, практично при всіх сполученнях значень $P_3(p)$ і $M_c(p)$ система керування з корекцією за моментом опору на шарошковому долоті є стійкою. В області нестійкості сполучення значень $P_3(p)$ і $M_c(p)$ у реально працюючій привідній системі не зустрічаються.

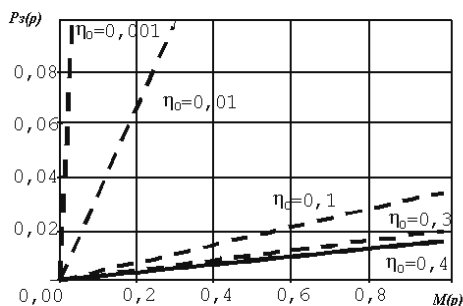


Рис. 5. Розташування ліній однакових значень ступенів стійкості

Моделювання динаміки роботи системи керування з нелінійною корекцією за завданням потужності підтвердило правильність прийнятих рішень, рис. 6. Перехідний процес у системі керування з нелінійною корекцією став більш монотонним, ніж у системі, замкненій за каналом електромагнітної потужності, і в системі з динамічною корекцією регулятора потужності.

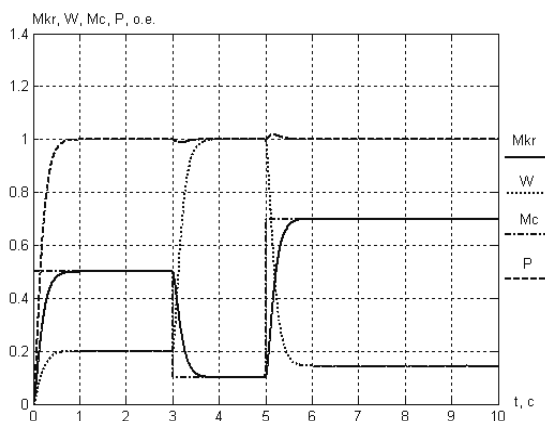


Рис. 6. Осцилограми зміни статичного моменту M_c , крутного моменту $M_{кр}$, частоти обертання ω , потужності привідної системи P у системі з нелінійною корекцією

Висновки та напрям подальших досліджень.

Запропоновано та проаналізовано систему керування потоком потужності в зоні вибою, в якій застосована корекція сигналу з виходу задавача інтенсивності на вхід регулятора частоти обертання сигналом, пропорційним моменту опору. Така корекція збільшує демпфуючу здатність усієї системи керування. Система керування дозволяє автоматично переходити від режиму керування з підтримкою частоти обертання постава до режиму з підтримкою потоку механічної потужності на шарошковому долоті в зоні вибою в залежності від міцності гірської породи, що буриться.

При замиканні у привідній системі обертання постава зовнішнього контуру регулювання за потужністю реалізується алгоритм керування процесом шарошкового буріння, при якому забезпечуються параболічні механічні характеристики на долоті при руйнуванні міцних гірських порід. Це призводить до роботи шарошкового долота в режимі ресурсозбереження.

Подальші дослідження будуть спрямовані на вивчення впливу піддатливості бурового постава на динамічні процеси контурів потужності, частоти обертання постава.

Список літератури / References

1. Півняк Г.Г. Управление приводом вращения става шарошечного бурения на основе асимптотического идентификатора состояния / Г.Г. Півняк, А.С. Бешта, В.С. Хілов. // *Електротехніка*. – 2004. – №6. – С. 23–26.
Pivnyak, G.G., Beshta, A.S. and Khilov, V.S. (2004), “Control of the rotation drive of the roller bit boring rod on basis of the asymptotic identifier of the state”, *Electrotechnika*, no.6, pp. 23–26.
2. Півняк Г.Г. Принципи побудови системи керування електроприводом обертання става верстата шарошечного буріння / Г.Г. Півняк, О.С. Бешта, В.С. Хілов. // *Вісник НТУ „ХПІ“*. – 2003. – №10. – Т.1. – С. 141–143.
Pivnyak, G.G., Beshta, A.S. and Khilov, V.S. (2003), “The principles of construction of the control system of rotation electric drive of the roller-bit”, *Visnyk NTU “KhPI”*, no.10, vol.1, pp. 141–143.
3. Хілов В.С. Опыт применения частотно-управляемых приводов в буровых станках карьеров Украины / В.С. Хілов, А.С. Бешта, В.Т. Заика. // *Горн. інфор.-аналит. бюл.* – 2004. – №10. – С. 285–289.
Khilov, V.S., Beshta, A.S. and Zaika, V.T. (2004), “The experience of frequency-controlled drives application in the roller-bits in the Ukrainian open-cast mines”, *Mining infor.-analyt. Bulletin*, no.10, pp. 285–289.
4. Хілов В.С. Використання принципів модального керування з естиматором для регулювання приводом обертання бурового верстата / В.С. Хілов. // *Наук. вісник НГУ*. – Дніпропетровськ, 2004. – №1. – С. 84–88.
Khilov, V.S. (2004), “The use of the of modal control principles with estimator for regulation of the rotation drive of the roller bit”, *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, no.1, pp. 84–88.

Цель. Определение качественных и количественных показателей системы управления мощностью на шарошечном долоте.

Методы. В основу исследований положены апробированные методы: частотного анализа, дифференциального анализа, операционного исчисления, теории матриц и матричных преобразований, теории автоматического регулирования многоконтурными системами, декомпозиции.

Результаты. Предложена и проанализирована система управления потоком мощности в зоне забоя, в которой применена коррекция сигнала с выхода датчика интенсивности на вход регулятора частоты вращения сигналом, пропорциональным моменту сопротивления.

Установлено, что такая коррекция влияет на демпфирующую способность электромеханической системы. Произведен частотный анализ характеристик динамических звеньев объекта управления контура мощности электрогидромеханического привода вращения бурового става шарошечного станка. Учтены динамические свойства замкнутого оптимизированного контура тока двигателя при отсутствии влияния обратной электродвижущей силы. В приводной системе учтены динамические свойства быстродействующего регулируемого электропривода по системе преобразователь частоты-асинхронный двигатель с частотой пропускания контура частоты вращения до ста радиан в секунду. Найдено, что замкнутый контур мощности при нелинейной коррекции описывается передаточной функцией с характеристическим уравнением третьего порядка с нелинейными коэффициентами. Это позволяет непосредственно использовать параметры диаграммы Вышнеградского для оценки качества управления. Исследовано влияние на коэффициенты Вышнеградского параметров системы управления, что позволило выделить области монотонного, аperiodического, периодического сходящегося и расходящегося переходных процессов. Установлено размещение на диаграмме Вышнеградского зон переходных процессов системы управления с контролем мощности разрушения породы. Найдено размещение линий одинаковых значений степеней устойчивости и реакция замкнутого контура мощности при возмущении и настройке контура частоты вращения на модульный и симметричный оптимумы при нелинейной коррекции мощности. Найдены значения дискриминанта в зависимости от соотношения величин задания на мощность разрушения и момента сопротивления на шарошечном долоте, которые позволяют получить устойчивые переходные процессы. Установлено, что предложенная коррекция увеличивает демпфирующую способность всей системы управления. Доказано, что при замыкании в приводной системе вращения става внешнего контура регулирования по мощности реализуется алгоритм управления процессом шарошечного бурения, при котором обеспечиваются параболические механические характеристики на долоте при разрушении крепких горных пород. Это приводит к работе шарошечного долота в режиме ресурсосбережения.

Научная новизна. Впервые исследовано влияние нелинейной коррекции электромеханической системы вращения бурового става на качество управления контура скорости шарошечного долота.

Практическая значимость. Полученные результаты позволяют по исходным данным объекта управления рассчитать настройки регулятора внешнего контура и оценить показатели качества контура управления мощностью электромеханической системы вращения бурового става.

Ключевые слова: *электромеханическая система, вращение долота, устойчивость контура управления*

Purpose. To study the qualitative and quantitative characteristics of the exterior contour of drilling line movement electromechanical regulation system.

Methodology. The system of power flow control in the face zone has been suggested. In the system the signal sent from the intensity control device output to input of the rotation frequency regulator is corrected by means of the signal proportional to the moment of resistance. We found out that such a correction affects the damping capacity of the electromechanical system. The frequency analysis of the characteristics of the dynamic links of the power contour control object of the electromechanical rotational movement drive of the roller cutter drilling tool has been carried out. Dynamic properties of the optimized closed current loop of the engine in conditions of absence of the reverse electromotive force influence have been taken into consideration. In the drive system the dynamic properties of the fast-acting handled electro drive have been taken into account as to the system 'frequency converter – asynchronous engine' with transmission frequency of the rotation frequency loop up to 100 radian per second. It was found out, that the closed loop of power affected by the nonlinear correction can be described by transfer function with the defining equation of the third order with nonlinear coefficients. This enables us to use parameters of Vyshnegradsky diagram for the control quality assessment. The influence of the parameters of control system on the coefficients of Vyshnegradsky has been studied and this allows us to distinguish ranges of monotonous, noncyclic, periodical convergent and divergent transient processes. The location of zones of transient processes of control system with the control of the power of rock destruction has been identified on the chart of Vyshnegradsky. Location of the lines of the similar values of the stability degrees has been found out and the reaction of the closed loop of power during disturbance and adjustment of the contour of rotation frequency on modular and symmetrical optimum during nonlinear correction of power. The values of discriminant have been figured out depending on the correlation of the values of the power of destruction and the moment of resistance on the rolling cutter bit resulting in the stable transient processes. The suggested correction raises the damping capacity of the control system in toto. We have proven that the closure outer contour of power regulation in the rotational movement drive of the roller cutter drilling tool provides such an algorithm of control by the process of drilling when parabolic mechanical characteristic of the drill bit appear in the process of destruction of hard rock. This makes the rolling cutter bit work in resource saving regime.

Originality. For the first time the influence of the nonlinear correction of the electromechanical rotation system of the roller cutter drilling tool on the quality of the control of speed loop of rolling cutter bit has been studied.

Practical value. The results let us figure out the right settings of the outer contour regulator by basic data of the object of control and to estimate the quality of the power contour control of electromechanical system of rotation of roller cutter drilling tool.

Keywords: *electromechanical system, bit rotation, stability of control loop*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Корсунем. Дата находження рукопису 25.06.12.