

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ ПРИВОДА РОТОРА РОТОРНОГО ЕКСКАВАТОРА ЕР-315

Запропонована методика розрахунку динамічних навантажень у електромашинобудівній та механічній системах привода ротора екскаватора. В методиці враховуються електромагнітні процеси у двигуні, податливість пружних ланок, коливання мас, демпфування у пружних ланках.

Наведені результати розрахунків перехідних процесів у електромашинобудівній та механічній системах.

Ключові слова: математична модель, екскаватор, привод ротора, механічна, електромашинобудівна системи, динамічні навантаження, податливість, коливальні явища.

Вступ

У дорожньо – будівельному виробництві, аграрному комплексі та гірничо – видобувній промисловості важливе місце займає використання роторних екскаваторів. Рациональне їх використання дає можливість значно підвищити ефективність виконуваних робіт.

У металургії важливе місце займає виробництво вогнетривких виробів. Для їх виготовлення необхідна сировина яка також видобувається із використанням роторних екскаваторів.

Створення рациональних і оригінальних конструкцій роторних екскаваторів в значній мірі залежить від уміння зіставляти уже відомі варіанти і вводити нові, що відповідають високому рівню сучасної техніки.

Удосконалення привода ротора роторного екскаватора також нерозривно пов'язано із вивченням питань динаміки і міцності привідних систем.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій

Створення нових типів машин, а також удосконалення існуючих постійно вимагають уточнення методів їх розрахунку, що також пов'язано із необхідністю вивчення питань динаміки.

Вперше на динаміку процесу роторних екскаваторів звернув увагу L. Rasper [4], який відмітив коливання роторних стріл, визваних «резонуванням». Серйозні динамічні проблеми виникли на початку 1960-х років з початком будівництва і широкого використання роторних екскаваторів на відкритих гірничих роботах в СРСР для екскавації порід, кам'яного і бурого вугілля в районах Сибіру, Далекого сходу і Казахстану.

Складні умови експлуатації і висока динамічність процесу приводили до вимушеного обмеження режиму роботи машини і, при цьому, до зниження продуктивності і економічних втрат [1,2,5].

Постала необхідність дослідження динаміки роторних екскаваторів і знаходження рациональних шляхів усунення коливань.

Великий вклад в вирішенні питань динаміки роторних екскаваторів вніс учений В.Ю.Чудновський [6 – 11]. Так в праці [6] ним розроблена схема робочих рухів і пружних коливань ротора у вибої та визначені під навантаженням додаткових шість віртуальних пружних переміщень.

У праці [7,8,9] приведені результати розроблення і впровадження ковшів ступінчастого різання місткістю 0,12 м³ з самозаточуючими зубами до роторних екскаваторів ЕР-315, ЕРП-315, які розроблені під його керівництвом. Нове ріжуче обладнання показало зниження сили різання, динамічності навантаження головних приводів і підвищення продуктивності машини.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

У даний час вивчення вимагає характер навантаження ротора екскаватора при перехідних процесах, особливо при пуску його привода.

При створенні адекватних фізичному процесу математичних моделей приводу ротора розглядаються відокремлено механічні і електромашинобудівні системи, що не дає можливості реально оцінити електромеханічний об'єкт і спільно розглянути механічні і електромагнітні коливальні явища.

У свій час В.Ю. Чудновський [10,11] дослідив динаміку головного привода ротора роторних екскаваторів з жорстко і пружно установленим редуктором.

Автором розроблена схема заміщення електромеханічної системи привода робочого органу (ротора) і складена система диференціальних рівнянь руху мас цієї системи. Наряду з позитивним рішенням поставленої задачі необхідно відмітити, що використана автором залежність:

$$M_{\Pi} = M_{\Pi}(t) + \mu_{\Pi}\varphi_2 = M_K i_{\Pi} \eta_{\Pi} (1 - \omega_B / \omega_0) + \mu_{\Pi}\varphi_2, \quad (1)$$

де M_K , ω_0 – момент короткого замикання і частота обертання холостого ходу електродвигуна;

ω_B – номінальна частота обертання електродвигуна;

i_{Π} , η_{Π} – передавальне число і ККД механізму привода;

μ_{Π} – коефіцієнт дисипативних втрат приводу;

φ_2 – кутова швидкість приводу, не дає можливості урахувати електромагнітні перехідні процеси в електроприводі (у привідному електродвигуні ротора) у тому числі – значення постійних і критичного моменту електродвигуна, а також – критичного ковзання ротора.

Дана робота і направлена на вирішення, з використанням застосунку MathCAD, питань динаміки привода ротора роторного екскаватора EP – 315 де б враховувались електромагнітні перехідні процеси в електроприводі (в привідному електродвигуні).

Постановка завдання

Метою цієї роботи є створення адекватної фізичному процесу моделі привода ротора роторного екскаватора, що являє собою електромеханічний об'єкт, на основі спільного розгляду механічних і електромагнітних коливальних явищ.

Виклад основного матеріалу

Роторні екскаватори являють собою складну механічну систему, яка дозволяє успішно виконувати землерийні роботи в кар'єрах і при виконанні різноманітних робіт в будівництві, в тому числі – у аграрному секторі.

Як уже відзначалось, у екскаваторах використовуються приводи двох типів: електропривід, а також двигуни внутрішнього згорання.

В роторному екскаваторі, який ми розглядаємо, використовується електропривід.

Можно константувати, що під час роботи роторного екскаватора виконується різання ґрунтів (сировини) і переміщення їх в відвал, або транспортний засіб.

Нами розглядається динаміка процесу різання ґрунтів (сировини) ковшами ротора роторного екскаватора.

Оскільки роторний екскаватор являє собою пружну систему, яка складається з металевих конструкцій і приводів, навантажувальні фактори котрої змінюються в часі й за напрямком, то при різанні ґрунтів (сировини) неминучі коливання, у результаті чого в ланках виникають додаткові динамічні навантаження.

Для значного спрощення процесу досліджень нами використане математичне моделювання.

Існуючі роторні екскаватори являють собою пружну багатомасову систему з нескінченним числом ступенів вільності. Маси, що входять у систему, мають зосереджені й розподілені параметри.

Враховуючи особливості конструкції роторних екскаваторів, їх динаміку розглядаємо при деяких допущеннях.

1. При приведенні мас обертючих елементів привода ротора екскаватора не беруться до уваги пружні властивості передач привода, оскільки їхні жорсткості в багато разів вищі за жорсткості конструкцій самого роторного екскаватора: враховується також відсутність проміжків у кінематичній схемі привода й синхронне переміщення мас, що приводяться.

2. У деяких випадках не враховується загасання коливальних від зовнішнього та внутрішнього тертя у зв'язку з тим, що у початковому періоді при невеликих значеннях сили опору вони майже не впливають на коливальні процеси.

3. Припускаємо, що у процесі коливальних існує лінійна залежність між зусиллями і деформаціями.

Перехідні процеси, що мають місце у роботі привідних механізмів роторів екскаваторів, значною мірою визначають динамічні навантаження в елементах розглянутих систем. На динаміку процесів пуску й зупинення механізму привода ротора екскаватора істотно впливають інерційні й жорсткісні параметри елементів системи. Пуск і зупинення приводу ротора виконується при завантажених ковшах.

При розгляді динамічних явищ, які виникають під час пуску привода екскаватора, за основний випадок умов навантаження приймемо поворот з завантаженими ковшами ротора при різанні ґрунтів.

Розрахункова схема представлена на рисунку 1, де J_{pd} – момент інерції ротора електродвигуна приведений до вісі обертання ротора екскаватора з урахуванням мас механізмів, що обертаються; J_{pe} – сумарний момент інерції ротора з завантаженими

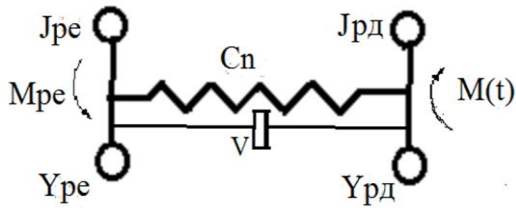


Рис. 1. Розрахункова схема навантаження механізму привода ротора екскаватора під час пуску привідного механізму

ковшами відносно вісі обертання ротора екскаватора; Y_{pd} , Y_{pe} – координати руху зосереджених мас (кути відліку); C_n – приведена жорсткість привідної частини ротора екскаватора.

Приведення всіх мас системи, жорсткостей пружних ланок, а також сил робимо до вісі обертання ротора екскаватора.

Рівняння руху запишемо в такому вигляді:

$$J_{pd} \cdot Y_{pd}'' + C_n(Y_{pd} - Y_{pe}) + v(Y_{pd}' - Y_{pe}') = M(t), \quad (2)$$

$$J_{pe} \cdot Y_{pe}'' - C_n(Y_{pd} - Y_{pe}) - v(Y_{pd}' - Y_{pe}') = -M_{pe}, \quad (3)$$

Момент привідного електродвигуна виразимо диференціальною залежністю [3]

$$M(t) = A_0 u + A_1 M'(t) + A_2 u^2 Y_{pd}'(t), \quad (4)$$

де Y_{pd} , Y_{pe} , Y_{pd}' , Y_{pe}' – кутове переміщення і кутова швидкість мас J_{pd} і J_{pe} у напрямку повороту ротора;

v – коефіцієнт, що характеризує загасання;

M_{pe} – момент опору, який створюють сили різання і вага ротора з ґрунтом (сировиною). $M_{pe} = 55,12$ кНм [11];

C_n – приведена жорсткість механізму привода ротора екскаватора, $C_n = 1,1 \cdot 10^8$ Н/м [11];

u – передавальне число привода ротора, $u = 4,5$;

A_0 , A_1 , A_2 – постійні електродвигуна.

Значення постійних визначаються виразами:

$$A_0 = \frac{2M_k}{S_k}; \quad A_1 = \frac{1}{\omega_0 S_k}; \quad A_2 = \frac{2M_k}{\omega_0 S_k}, \quad (5)$$

де M_k – критичний момент електродвигуна;

S_k – критичне ковзання ротора електродвигуна;

ω_0 – синхронна кутова швидкість електродвигуна;
 t – час.

Межі використання рівняння (4) обмежуються значеннями моменту [3]

$$-0,8M_k \leq M \leq 0,8M_k.$$

Початкові умови представимо у вигляді ($t = 0$)

$$Y_{pdo} = 0, \quad Y_{peo} = 0, \quad Y_{pdo}' = 0, \quad Y_{peo}' = 0, \quad M_0 = 0. \quad (6)$$

Для зручності рішення на ЕОМ системи рівнянь з використанням застосунку MathCAD приводимо її до такого вигляду:

$$J_{pd}(t) \cdot Y_{pd}''(t) + C_n[Y_{pd}(t) - Y_{pe}(t)] + v[Y_{pd}'(t) - Y_{pe}'(t)] = M(t);$$

$$J_{pe}(t) \cdot Y_{pe}''(t) - C_n[Y_{pd}(t) - Y_{pe}(t)] - v[Y_{pd}'(t) - Y_{pe}'(t)] = -M_{pe};$$

$$M(t) = A_0 u + A_1 M'(t) + A_2 u^2 Y_{pd}'(t).$$

$$z'(t) = d(t);$$

$$d'(t) = -\frac{C_n}{J_{pd}(t)} z(t) - \frac{v}{J_{pd}(t)} d(t) + \frac{C_n}{J_{pd}(t)} q(t) + \frac{v}{J_{pd}(t)} n(t) + \frac{u}{J_{pd}} M(t);$$

$$q'(t) = n(t);$$

$$n'(t) = \frac{C_n}{J_{pe}(t)} z(t) + \frac{v}{J_{pe}(t)} d(t) - \frac{C_n}{J_{pe}(t)} q(t) - \frac{v}{J_{pe}(t)} n(t) - \frac{M_{pe}}{J_{pe}(t)}; \quad (7)$$

$$M'(t) = -\frac{A_2 u^2}{A_1} z(t) + \frac{1}{A_1} M(t) - \frac{A_0 u}{A_1};$$

$$k(t) = \frac{uM(t)}{J_{pd}(t)} - \frac{Y_{pd}(t)C_n}{J_{pd}(t)} + \frac{Y_{pe}(t)C_n}{J_{pd}(t)};$$

$$w(t) = -\frac{M_{pe}}{J_{pe}(t)} + \frac{Y_{pd}(t)C_n}{J_{pe}(t)} - \frac{Y_{pe}(t)C_n}{J_{pe}(t)},$$

де $k(t)$, $w(t)$ кутове прискорення відповідно приводу ротора і самого ротора.

Після підстановки даних взятих із таблиці 1 отримаємо

$$z'(t) = d(t);$$

$$d'(t) = 0,084M(t) - 2065728z(t) - 8d(t) + 2065728q(t) + 8n(t);$$

$$q'(t) = n(t);$$

$$n'(t) = 18490z(t) + 8d(t) - 18490q(t) - 8n(t) - 9,265;$$

$$n'(t) = 18490z(t) + 8d(t) - 18490q(t) - 8n(t) - 9,265; \quad (8)$$

$$M'(t) = -1,047M(t) - 31966d(t) + 558000;$$

$$k(t) = 0,019M(t) - 2065728z(t) - 8d(t) + 2065728q(t) + 8n(t);$$

$$w(t) = -9,265 + 18490z(t) + 8d(t) - 18490q(t) - 8n(t).$$

Початкові умови мають вигляд ($t = 0$),
 $Y_{pdo} = 0, Y_{peo} = 0, Y'_{pdo} = 0, Y'_{peo} = 0,$
 $M_0 = 0, k_0 = 0, w_0 = 0.$ (9)

Розв'язання системи рівнянь (7) робимо для механізму приводу ротора екскаватора з електроприводом, що мають параметри, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Параметри приводу ротора екскаватора

Параметри	Одиниці вимірювання	Числові значення	Параметри	Одиниці вимірювання	Числові значення
J_{pd}	кг·м ²	53,25	u	–	4,5
J_{pe}	кг·м ²	5949	v	–	911152
M_{pe}	кНм	55,12	C_n	Н/м	$1,1 \cdot 10^8$

Значення постійних A_0, A_1, A_2 для робочої характеристика електродвигуна наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Обчислені значення постійних електродвигуна приводу ротора

Тип електродвигуна	Режим роботи електродвигуна	Кутова швидкість ротора електродвигуна, рад/с	Постійні електродвигуна		
			A_0	A_1	A_2
МА-36-72-6 N = 90 кВт n = 70 об/хв	робоча характеристика	5,93	118420	- 0,955	- 1507,52

Для визначення прискорень в системі диференційних рівнянь (7) записані два рівняння прискорень $K(t)$ маси $Z(t) = Y_{pd}(t)$, та $W(t)$ маси $Q(t) = Y_{pe}(t)$.

В результаті розв'язання одержуємо значення моменту електродвигуна механізму приводу ротора, кутові переміщення і швидкості приводу та ротора, а

також їх кутові прискорення.

Побудований за виконаними розрахунками графік зміни моменту електродвигуна приводу ротора у функції часу (рис. 4, 5) показує, що розгін приводу ротора триває близько 6 с від моменту його включення. Максимального значення момент досягає при $t = 1$ с від початку пуску.

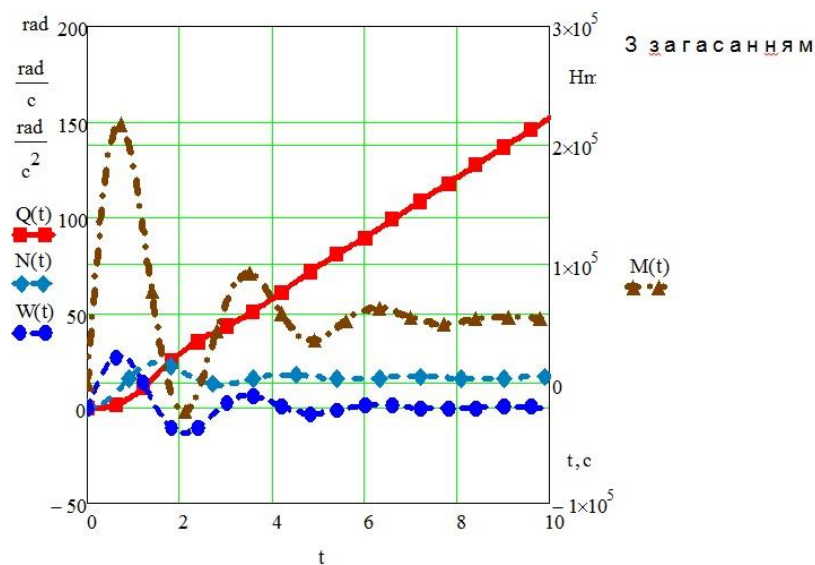


Рис. 2. Зміна кутового переміщення маси $Q(t) = Y_{pe}$, кутової швидкості $N(t) = Q'(t) = Y'_{pe}$, кутового прискорення ротора екскаватора $W(t) = Y''_{pe}(t) = N'(t) = Q''(t)$ та моменту електродвигуна приводу ротора $M(t)$ (з загасанням)

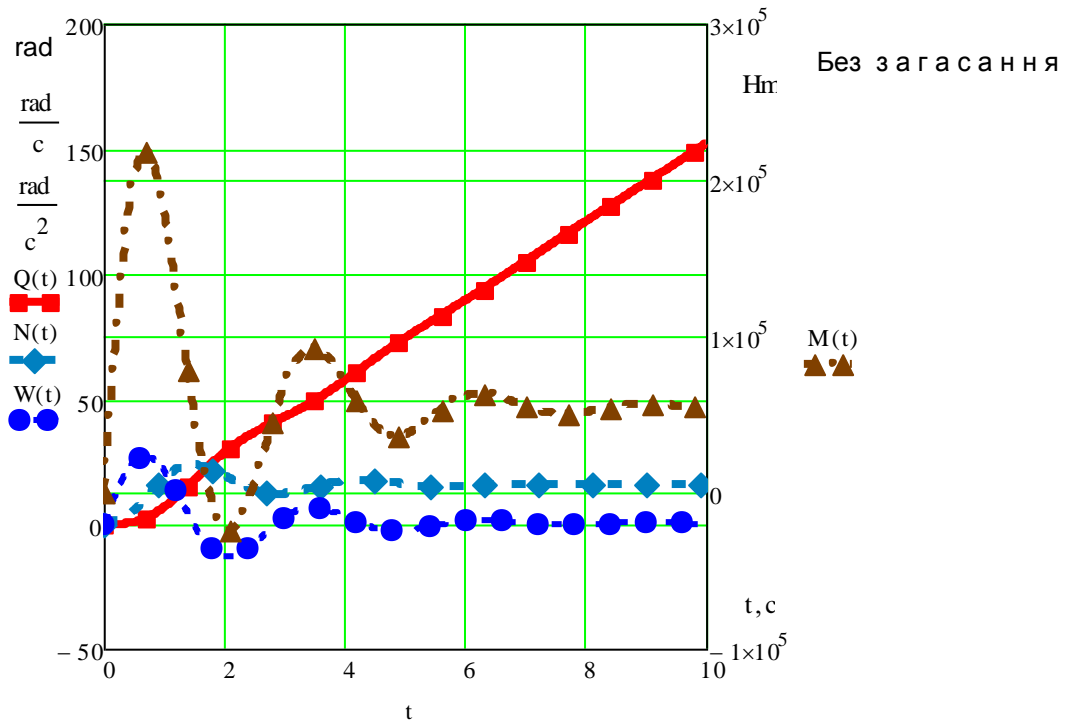


Рис. 3. Зміна кутового переміщення маси $Q(t) = Y_{pe}$, кутової швидкості $N(t) = Q'(t) = Y'_{pe}$, кутового прискорення ротора екскаватора $W(t) = Y''_{pe}(t) = N'(t) = Q''(t)$ та моменту електродвигуна привода ротора $M(t)$ (без загасання)

З загасанням

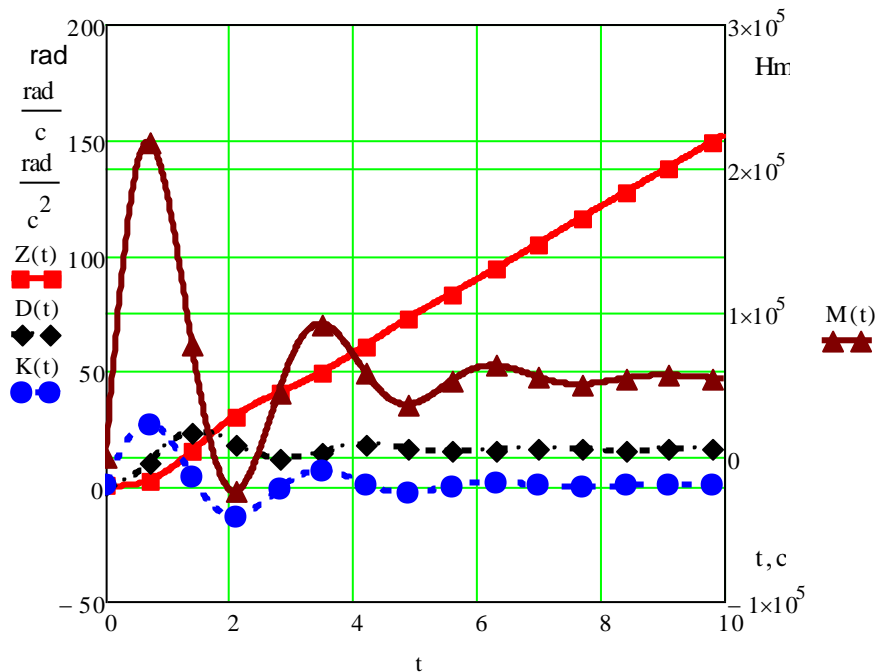


Рис. 4. Зміна кутового переміщення маси $Z(t) = Y_{pd}$, кутової швидкості $D(t) = Z'(t) = Y'_{pd}$, кутового прискорення ротора електродвигуна $K(t) = Y''_{pd}(t) = D'(t) = Z''(t)$ та моменту електродвигуна привода ротора $M(t)$ (з загасанням)

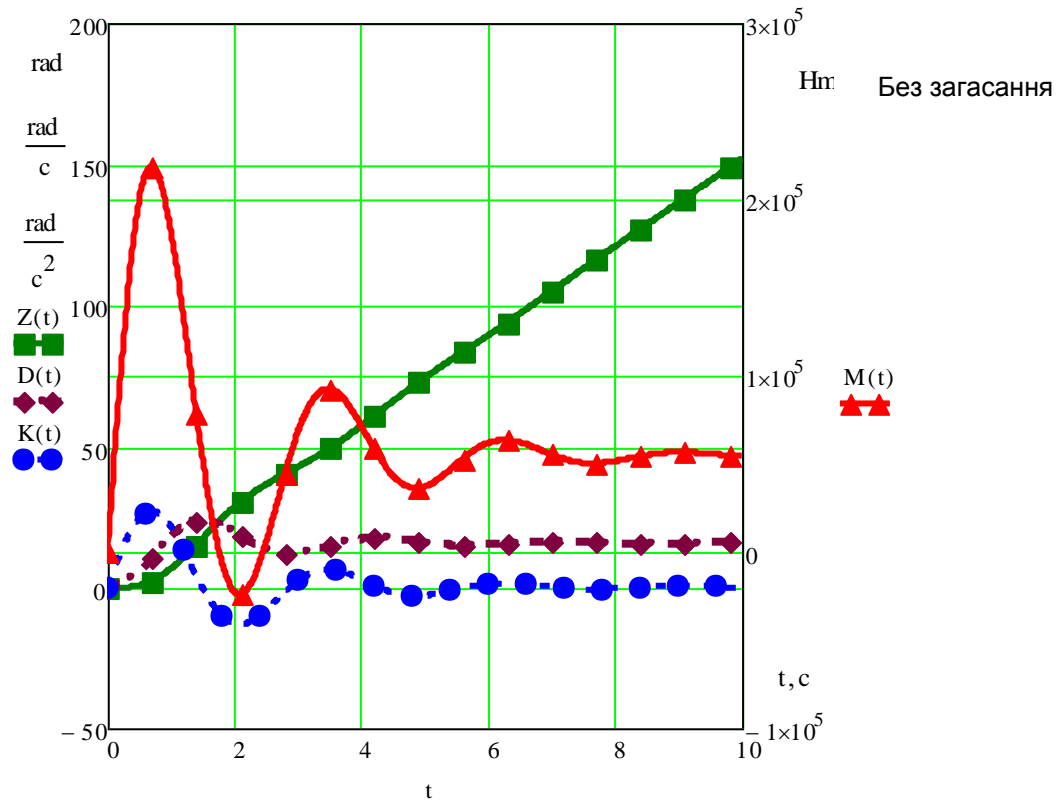


Рис. 5. Зміна кутового переміщення маси $Z(t) = Y_{pd}$, кутової швидкості $D(t) = Z'(t) = Y'_{pd}$, кутового прискорення ротора електродвигуна $K(t) = Y''_{pd}(t) = D'(t) = Z''(t)$ та моменту електродвигуна привода ротора $M(t)$ (без загасання)

Розв'язуючи, з використанням застосунку MathCAD, систему рівнянь (8) з добавленими рівняннями прискорень $K(t)$ маси $Z(t) = Y_{pd}(t)$ та $W(t)$ маси $Q(t) = Y_{pe}(t)$ нами отримано значення прискорень електродвигуна ротора екскаватора $K(t)$ та самого ротора $W(t)$ (рис. 2 – 5).

Побудований за виконаними розрахунками графік зміни прискорень ротора екскаватора $W(t)$ (рис. 2 – 3) показує, що прискорення має коливальний характер мас. Графіки (рис. 2– 3) також показують, що після 6–7 с прискорення практично дорівнює нулю і рух набуває рівномірного характеру, як видно із графіка зміни моменту електродвигуна привода ротора $M(t)$.

Порівнюючи побудовані графіки, як з урахуванням загасання v так і без нього, можна зробити висновок, що значення відрізняються несуттєво і визначені параметри мають більш точні значення при урахуванні загасання v .

Для перехідних процесів, показаних на рис. 2, 3, 4 і 5, характерне інтенсивне колювання електромагнітного моменту, кутової швидкості і прискорень електродвигуна, а також ротора

екскаватора. Тому розрахунок робочих режимів роторних екскаваторів необхідно виконувати на основі рівнянь електромагнітного стану системи.

Використання числових методів інтегрування диференціальних рівнянь руху і електромагнітного стану дозволяє використовувати запропоновану методику для розрахунку динамічних навантажень у електромашинній та механічній системах роторних екскаваторів.

Висновки

1. В роботі на основі аналізу тенденцій розвитку землерийних машин та існуючих технічних рішень роторних екскаваторів, а також з використанням математичного застосунку MathCAD досліджено механізм привода ротора роторного екскаватора EP – 315.

2. В роботі визначені сили різання, а також теоретично досліджено, з використанням математичного програмного середовища MathCAD, динаміку механізму привода ротора роторного екскаватора.

3. Застосування числових методів інтегрування диференціальних рівнянь руху і електромагнітного

стану дозволяє використовувати запропоновану методику для розрахунку динамічних навантажень у електромашинній і механічній системах роторних екскаваторів.

4. Результати дослідження механізму привода ротора роторного екскаватора EP-315, з використанням математичного програмного середовища MathCAD, можуть бути використані при проектуванні, розрахунку та визначенні динамічних навантажень подібних землерийних машин.

Список літератури

1. Рабочие органы роторного экскаватора. Ю.И. Беляков, В.М. Владимиров. Москва «Машиностроение», 1967. – 372 с.
2. Совершенствование экскаваторных работ на карьерах. Ю.И. Беляков В.М.Владимиров. Москва «Недра», 1974.– 356 с.
3. Ключев В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода / В.И. Ключев. – М.: Энергия, 1976. – 320 с.
4. Rasper L. Die Entwicklung der Schaufelradbagger in Deutschland// Braunkohle, 1955. Heft 19/20. St. 429 – 441.
5. Владимиров В.М., Трофимов В.К. Повышение производительности карьерных многоковшовых экскаваторов. М.: Недра, 1980. –312 с.
6. Чудновский В.Ю. Динамические проблемы карьерных роторных экскаваторов и их решение // Горное оборудование и электромеханика. 2008. № 12. С. 33– 37.
7. Чудновский В.Ю. Механика роторных экскаваторов. Иерусалим: Изд-во МИКА К.А., 2002. – 329 с.

. Чудновский В.Ю. Основы рационального конструирования ковшей роторных экскаваторов // Горное оборудование и электромеханика. 2008. № 6. С. 2– 6.

9. Чудновский В.Ю. Принципы конструирования самозатачивающегося режущегося инструмента роторных экскаваторов // Уголь. 2006. № 2. С. 16– 20.

10. Чудновский В.Ю. Исследование динамики и устойчивости главного привода роторных экскаваторов с упругой подвеской редуктора // Горное оборудование и электромеханика. 2009. № 4. С. 46 – 49.

11. Чудновский В.Ю. Динамика главного привода роторных экскаваторов с жестко установленным редуктором // Горное оборудование и электромеханика. 2010. № 3. С. 44– 49.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.Л. Винников, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава.

Автори: ЛЮТЕНКО Василь Єгорович

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, кандидат технічних наук, с.н.с.
Дом. тел. 68-64-05, моб. тел. 0661796246, E-mail vlutik@ukr.net;

ЯКОВЕНКО Андрій Михайлович

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, студент 3 курсу Навчально-наукового інституту інформаційних технологій і мехатроніки.
Моб. тел. 0500589504, E-mail andrij.yakovenko95@gmail.com/

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМА ПРИВОДА РОТОРА РОТОРНОГО ЭКСКАВАТОРА ЭР-315

В.Е. Лютенко, А.М. Яковенко

Предложена методика расчета динамических нагрузок в электромашинной и механической системах привода ротора экскаватора. В методике учитываются электромагнитные процессы в двигателе, податливость упругих звеньев, колебания масс, демпфирование в упругих связях.

Приведены результаты расчетов переходных процессов в электромашинной и механической системах.

Ключевые слова: математическая модель, экскаватор, привод ротора, механическая, электромашинная системы, динамические нагрузки, податливость, колебательные явления.

A MATHEMATICAL MODEL FOR INVESTIGATING THE MECHANISM OF DRIVING F ROTARY EXCAVATOR ER-315

V.Ye. Liutenko, A.M. Yakovenko

The proposed method for calculating dynamic loads in electric and mechanical systems is a technique for calculating dynamic loads in electric and mechanical drives of an excavator rotor. The technique takes into account the electromagnetic processes in the engine, the elasticity of the elastic parts, the damping in the masses, and damping in the elastic links.

The results of calculations of transients in electric and mechanical systems are presented.

Keywords: Math model, excavator, transmission of rotary table, mechanical, systems of electrical machine, dynamical strain, pliability, vibration phenomena.