

В.Є. Лютенко, А.М. Яковенко

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

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

Запропонована методика розрахунку динамічних навантажень у електромашиинній 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 електромашиинній та механічній системах.

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

Вступ

У дорожньо-будівельному виробництві, аграрному комплексі та гірничо-видобувній промисловості важливе місце займає використання роторних екскаваторів. Раціональне 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 раціональних 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. Raspeg [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 економічним втратам [1, 2, 5].

Постала необхідність дослідження динаміки роторних екскаваторів і знаходження раціональних 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 – 9] приведені результати розроблення і впровадження ковзів 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 привода ротора розглядаються відокремлено механічні і електромашиинна 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:

$$M_{\Pi} = M_{\Pi}(t) + \mu_{\Pi} \phi_2 = M_{K i_{\Pi} \eta_{\Pi}} (1 - \omega_{\text{в}} / \omega_0) + \mu_{\Pi} \phi_2, \quad (1)$$

де M_K , ω_0 – момент короткого замикання і частота обертання холостого ходу електродвигуна; $\omega_{\text{в}}$ – номінальна частота обертання електродвигуна; i_{Π} , η_{Π} – передавальне число і ККД механізму привода;

μ_n – коефіцієнт дисипативних втрат приводу; ϕ_2 – кутова швидкість приводу, не дає можливості ураховувати 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 приводу 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 приводу 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 констатувати, 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 обертових елементів приводу ротора екскаватора не беруться до уваги пружні властивості передач приводу, оскільки їхні

жорсткості в багато разів вищі за жорсткості конструкцій самого роторного екскаватора: враховується також відсутність проміжків у кінематичній схемі приводу й синхронне переміщення мас, що приводяться.

2. У деяких випадках не враховується загасання коливань 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 коливань 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 приводу 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 приводу екскаватора, за основний випадок умов навантаження прийемо поворот з завантаженими ковшами ротора при різанні ґрунтів.

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

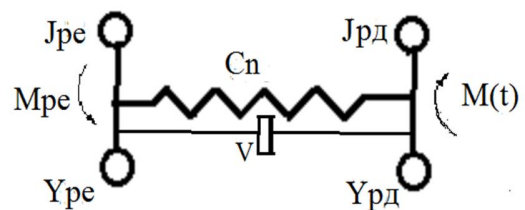


Рис. 1. Розрахункова схема навантаження механізму приводу ротора екскаватора під час пуску привідного механізму

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 застосунок MathCAD привоимо її до такого вигляду:

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

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

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

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

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

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

$$n'(t) = \frac{C_n}{J_{pe}(t)} z(t) + \frac{v}{J_{pe}(t)} d(t) -$$

$$-\frac{C_n}{J_{pe}(t)} q(t) - \frac{v}{J_{pe}(t)} n(t) - \frac{M_{pe}}{J_{pe}(t)};$$

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

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

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

де $k(t), w(t)$ кутове прискорення відповідно приво-ду 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 ($t = 0$),

$$Y_{pdo} = 0, \quad Y_{peo} = 0, \quad Y'_{pdo} = 0, \quad Y'_{peo} = 0,$$

$$M_0 = 0, \quad k_0 = 0, \quad w_0 = 0. \quad (9)$$

Розв'язання системи рівнянь (7) робимо для механізму приво-ду ротора екскаватора з електроприводом, що мають параметри, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри привода ротора екскаватора

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

Значення постійних A_0, A_1, A_2 для робочої характеристики електродвигуна (тип – МА-36-72-6, $N = 90$ кВт, $n = 70$ об/хв.; кутова швидкість ротора – 5,93 рад/с):

$$A_0 = 118420, \quad A_1 = 0,955, \quad A_2 = 1507,52.$$

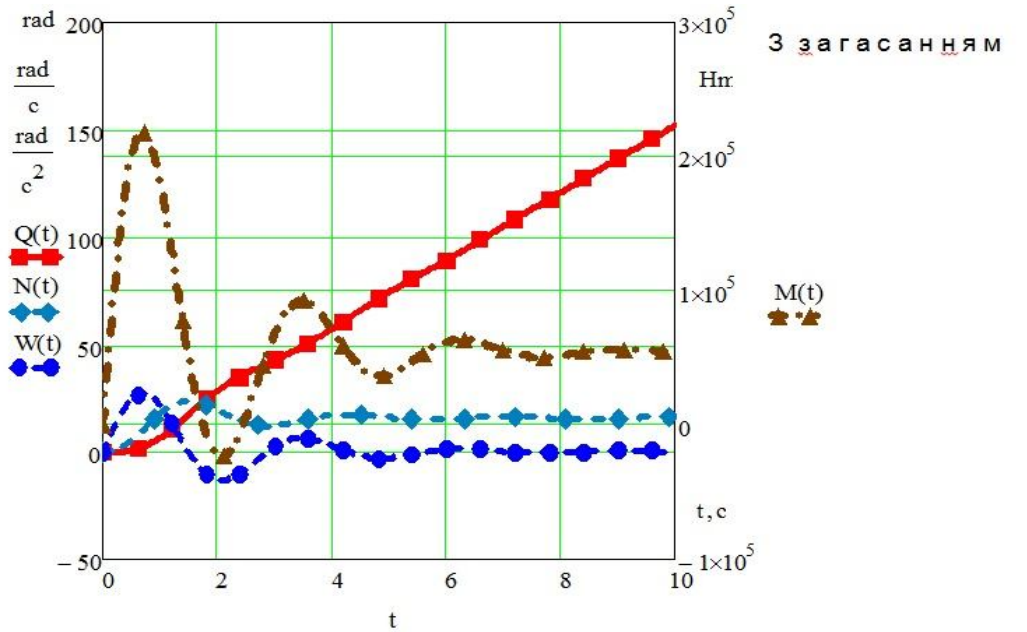
Для визначення прискорень в системі диференційних рівнянь (7) записані два рівняння прискорень $K(t)$ маси $Z(t) = Y_{pd}(t)$, та $W(t)$ маси $Q(t) = Y_{pe}(t)$. В результаті розв'язання одержуємо значення моменту електродвигуна механізму приво-ду ротора, кутові переміщення і швидкості приво-да та ротора, а також їх кутові прискорення.

Побудований за виконаними розрахунками графік зміни моменту електродвигуна привода ротора у функції часу (рис. 3) показує, що розгін привода ротора триває близько 6 с від моменту його включення. Максимального значення момент досягає при $t = 1$ с від початку пуску.

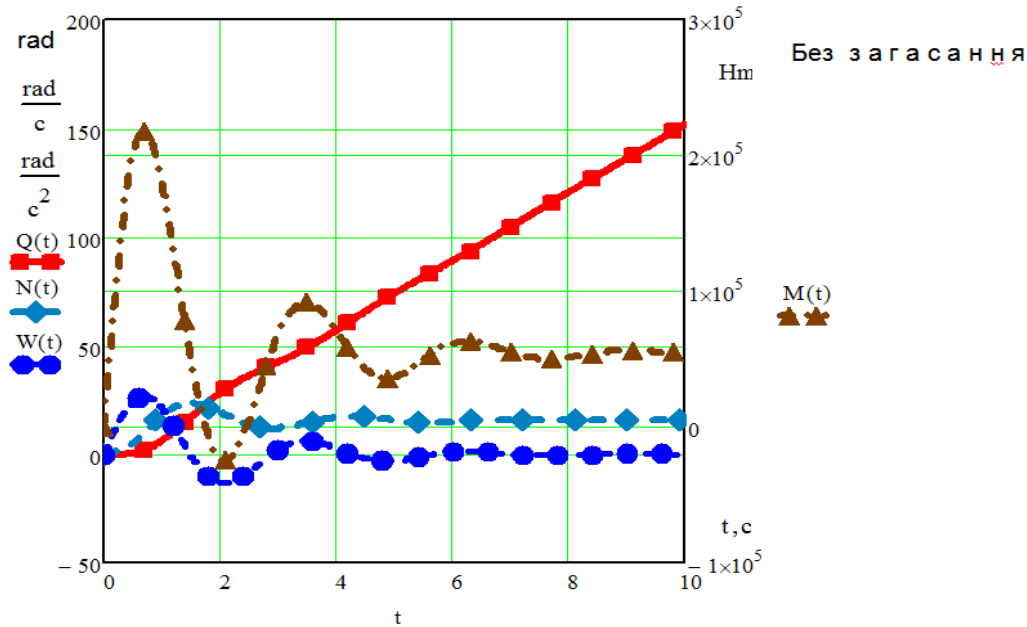
Розв'язуючи, з використанням застосунок MathCAD, систему рівнянь (8) з доданими рівняннями прискорень $K(t)$ маси $Z(t) = Y_{pd}(t)$ та $W(t)$ маси $Q(t) = Y_{pe}(t)$ нами отримано значення

прискорень електродвигуна ротора екскаватора $K(t)$ та самого ротора $W(t)$ (рис. 2, а та 3, б).

Побудований за виконаними розрахунками графік зміни прискорень ротора екскаватора $W(t)$ (рис. 2) показує, що прискорення має коливальний характер мас. Графіки (рис. 2) 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 $M(t)$.



а



б

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 привода ротора $M(t)$: а – із загасанням; б – без загасання

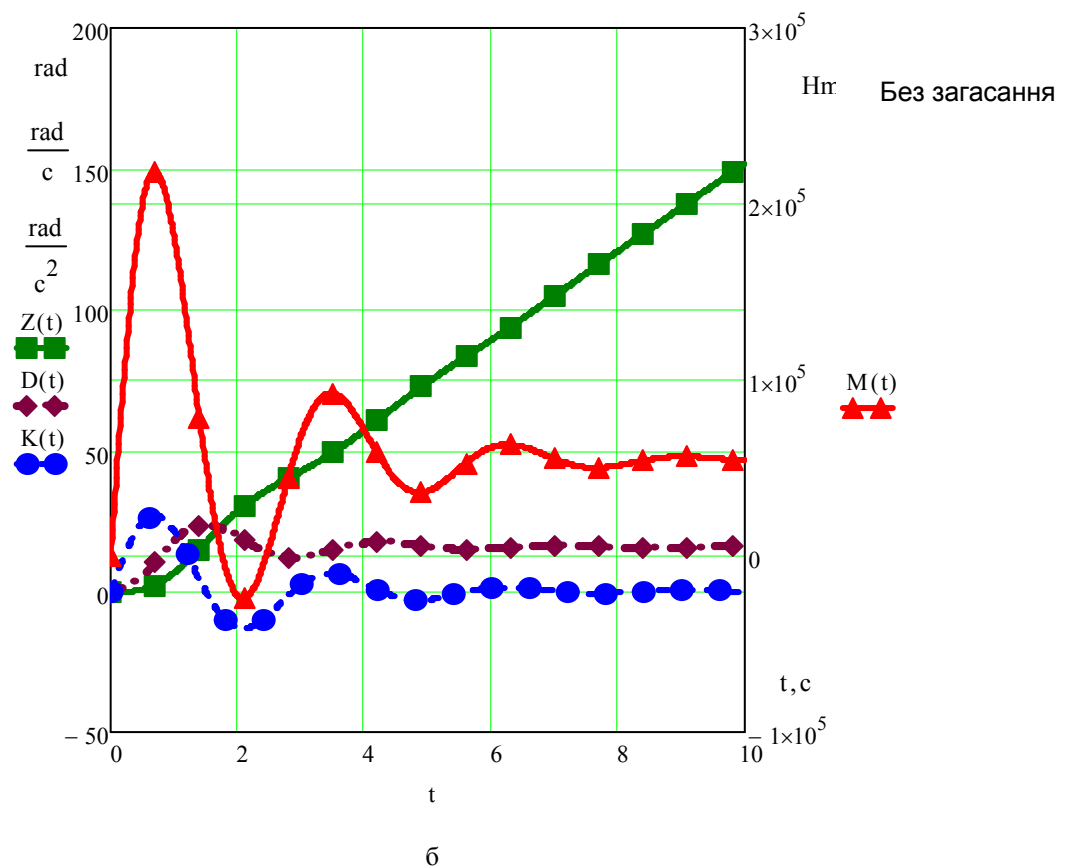
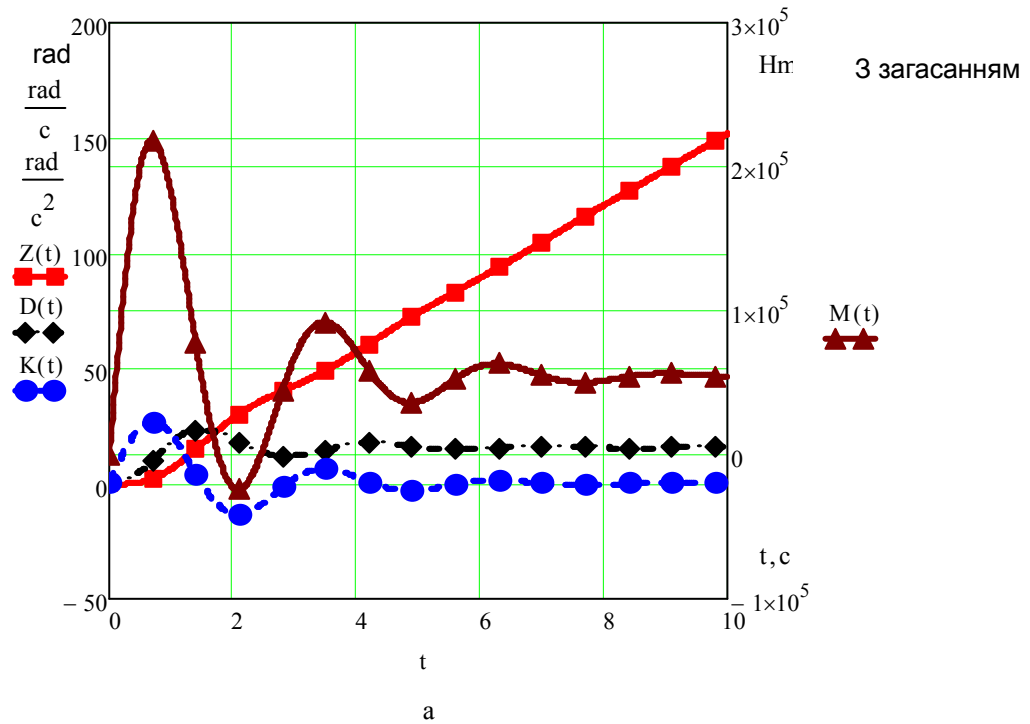


Рис. 3. Зміна кутового переміщення маси $Z(t) = Y_{pd}$, кутової швидкості $D(t) = Z'(t) = Y'_{pd}$, кутового прискорення ротора електродвигуна $K(t) = Y''_{pd}(t) = D'(t) = Z''(t)$ та моменту електродвигуна привода ротора $M(t)$: а – із загасанням; б – без загасання

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 та 3, характерне інтенсивне коливання електромагнітного моменту, кутової швидкості і прискорень електродвигуна, а також ротора екскаватора. Тому розрахунок робочих режимів роторних екскаваторів необхідно виконувати на основі рівнянь електромеханічного стану системи.

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

4. Результати дослідження механізму привода ротора роторного екскаватора EP–315, з вико рис-

танням 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.
8. 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.

Надійшла до редколегії 12.12.2017

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

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