

## СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ОБМЕЖЕННЯМ ПРИСКОРЕННЯ

Наведено результати досліджень системи обмеження прискорення екскаваторного електроприводу механізму повороту з використанням затриманого зворотного зв'язку за прискоренням.

The results of researches of the system of limitation of acceleration of power-shovel електроприводу of mechanism of turn are resulted with the use of the detained feed-back after acceleration.

**Постановка задачі.** Продуктивна і надійна робота одноківшових екскаваторів значною мірою залежить від роботи механізму обертання. Для продуктивної роботи на весь період проектної експлуатації система електроприводу цього механізму повинна працювати в граничних режимах, підтримуючи або момент  $M_d$  на максимально-допустимому рівні  $M_d = M_{доп}$ , або допустиме значення прискорення  $\varepsilon = \varepsilon_{доп}$ . Вибір режиму визначається факторами збурення, які діють на механізм. До основних факторів збурення можна зарахувати момент статичного опору  $M_c$ , (тертя в механічних передачах), момент інерції механізму  $J_m$ , вітрове навантаження  $M_v$ , наявність нахилу платформи, зміна опору якірного кола силової частини  $R_{як}$ . Зміна цих факторів або сприяє рухові, або протидіє. У пуско-гальмівних режимах, коли збурення сприяють рухові і є небезпека збільшення прискорення вище від допустимого значення  $\varepsilon = \varepsilon_{доп}$ , (пуск з мінімальними значеннями  $M_c$ ,  $J_m$  чи гальмування з їх максимальними значеннями тощо), система керування повинна обмежувати прискорення  $\varepsilon \leq \varepsilon_{доп}$ , захищаючи механічне обладнання від перевантажень. У режимах, коли момент навантаження  $M_c$ , момент інерції  $J_m$ , вітрове навантаження протидіють рухові, система електроприводу повинна підтримувати момент на допустимому рівні  $M_d = M_{доп}$ , забезпечуючи продуктивну роботу екскаватора і не допускаючи теплового перевантаження електричних машин.

**Аналіз останніх досягнень.** У більшості сучасних систем екскаваторних електроприводів контроль за моментом здійснюється за величиною струму якірного кола  $I_{я}$  при стабілізованому струмі збудження  $I_{зб} = I_{зб.н}$ . Що стосується контролю за прискоренням  $\varepsilon$ , то на діючих екскаваторах ця координата або зовсім не контролюється, або застосовують непрямі методи контролю [1]. Як відомо, непрямі методи вимірювання координат є низькоточними, що і стало основною причиною того, що вони не набули поширеного застосування на діючих екскаваторах.

**Задача досліджень.** У роботі [2] пропонується система керування електроприводом, в якій регулювання прискорення відбувається не постійно, а тільки тоді, коли значення координати  $\varepsilon$  перевищує допустиме значення  $\varepsilon_{доп}$ . Коли  $\varepsilon < \varepsilon_{доп}$ , система працює в режимі регулювання моменту (струму). Схема реалізована на базі двоконтурної системи підпорядкованого регулювання (СПР) електроприводом тиристорний перетворювач-двигун (ТП-Д) з введенням затриманого зв'язку за прискоренням в контур струму, як це зображено на рис. 1. Така схема дозволяє електроприводові працювати в граничних режимах, забезпечуючи максимальну швидкість в пуско-гальмівних режимах з одночасним обмеженням прискорення допустимими значеннями.

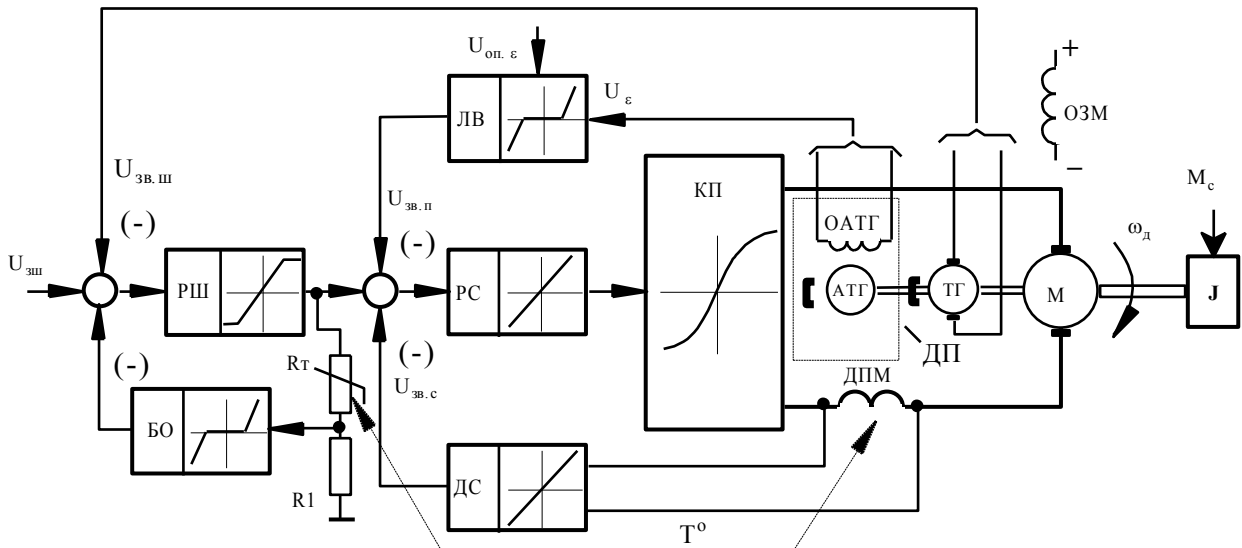


Рис. 1. Схема екскаваторного електроприводу з затриманим зворотним зв'язком за прискоренням

**Виклад основного матеріалу.** У роботі [3] проведений аналіз такої системи і визначений коефіцієнт затриманого зворотного зв'язку за прискоренням  $k_\varepsilon$ , враховуючи можливу варіацію моменту навантаження  $\pm \Delta M_c$  і моменту інерції механізму  $\pm \Delta J_m$ .

Доцільно здійснити аналіз динамічних властивостей системи в режимі роботи обмеження прискорення.

У схемі рис. 1 затриманий зворотний зв'язок за прискоренням реалізований за допомогою давача прискорення ДП і ланки "відсічка" ЛВ. Давачем прискорення можна використати універсальний акселотахогенератор, який дозволяє вимірювати як швидкість, так і прискорення [3]. Значення опорної напруги  $U_{оп. \varepsilon}$  ланки ЛВ приймається з умови, що затриманий зв'язок за прискоренням вступає в дію тоді, коли прискорення  $\varepsilon$  перевищує допустиме значення ( $\varepsilon > \varepsilon_{доп}$ ).

Оскільки пуско-гальмівні режими електроприводу механізму обертання формуються контуром струму, коли регулятор швидкості РШ знаходиться в насиченні з вихідним сигналом  $U_{зс. max}$ , то розглянемо тільки роботу контуру струму в режимі обмеження прискорення з урахуванням варіації тих параметрів, які суттєво впливають на роботу приводу. Для цього запишемо в операторній формі систему рівнянь, які описують роботу контуру струму на ділянці струмообмеження:

$$U_{i \text{ РС}}(p) = \frac{1}{pT_{ic}} (U_{зс. max}(p)(1 \pm \delta k_{зв.с}) - k_{зв.с} I_\alpha (1 \pm \delta k_{зв.с}) + U_{оп. \varepsilon} - k_\varepsilon \varepsilon(p));$$

$$U_{п \text{ РС}}(p) = U_{i \text{ РС}}(p) \frac{T_{oc}}{T_{ic}} (U_{зс}(p) (1 \pm \delta k_{зв.с}) - k_{зв.с} (1 \pm \delta k_{зв.с}) I_\alpha + U_{оп. \varepsilon} - k_\varepsilon \varepsilon(p));$$

$$U_{\text{РС}}(p) = U_{i \text{ РС}}(p) + U_{п \text{ РС}}(p);$$

$$E_{d\alpha}(p) = \frac{k_{тп}}{pT_\mu} (U_{\text{РС}}(p) - E_{d\alpha}(p)/k_{тп});$$

$$I_\alpha(p) = \frac{1/R_{як0}}{pT_{я0}} [E_{d\alpha}(p) - E_d(p) - R_{як0}(1 \pm \delta R_{як})I_\alpha(p)];$$



Враховуючи вирази (3) і (4), знайдемо розв'язок і відносно вихідної координати  $\varepsilon_d$

$$\varepsilon_d(p) = \frac{\{(k_{зв.с}/c)[M_{стоп} \mp M_{с0}(1 \pm \delta M_c)D_1(p)] + k_\varepsilon \varepsilon\}(pT_{як0} + 1)}{(k_{зв.с}/c)J_0(1 \pm \delta J)D_1(p) + k_\varepsilon(pT_{як0} + 1)}, \quad (5)$$

де

$$D_1 = pa_c T_\mu (pT_\mu + 1)(pT_{як0} + 1 \pm \delta R_{як}) + (pT_{як0} + 1). \quad (6)$$

Для визначення коефіцієнта передачі зворотного зв'язку за прискоренням  $k_\varepsilon$ , запишемо вираз усталеного значення прискорення

$$\varepsilon_{уст} = \frac{(k_{зв.с}/c)[M_{стоп} \mp M_{с0}(1 \pm \delta M_c)] + k_\varepsilon \varepsilon_{доп}}{(k_{зв.с}/c)J_0(1 \pm \delta J) + k_\varepsilon}. \quad (7)$$

Значення  $\varepsilon_{уст}$  можна розкласти на дві складові: допустиме або розрахункове значення –  $\varepsilon_{доп}$ , і перевищення прискорення над допустимим значенням –  $\Delta\varepsilon$

$$\varepsilon_{уст} = \varepsilon_{доп} + \Delta\varepsilon. \quad (8)$$

Допустиме прискорення  $\varepsilon_{доп}$  визначається розрахунковими (проектними) значеннями моменту навантаження  $M_{с0}$  і моменту інерції  $J_0$

$$\varepsilon_{доп} = (M_{стоп} - M_{с0})/J_0. \quad (9)$$

Сумісне розв'язання виразів (7), (8), (9) дає можливість визначити перевищення прискорення  $\Delta\varepsilon$  під дією зміни моменту  $\Delta M_c$  і моменту інерції  $\Delta J_M$

$$\Delta\varepsilon = \frac{(k_{зв.с}/c)(\varepsilon_{доп}\Delta J_M + \Delta M_c)}{(k_{зв.с}/c)J_{M0}(1 \pm \delta J_M) + k_\varepsilon}. \quad (10)$$

Оскільки для механізму обертання максимальне прискорення  $\varepsilon_{max}$  не повинно перевищувати проектно-допустимого значення  $\varepsilon_{доп}$  більше ніж на (10–20)%, або  $\Delta\varepsilon_{max} = (0,1 \div 0,2) \varepsilon_{доп}$ , то, задаючись цим значенням, знайдемо необхідний коефіцієнт зворотного зв'язку за прискоренням  $k_\varepsilon$

$$k_\varepsilon = \frac{k_{зв.с}}{c} J_{M0}(1 \pm \delta J) \left[ \frac{\delta J_M \pm \delta M_c}{\delta \varepsilon (1 \pm \delta J_M)} - 1 \right]. \quad (11)$$

Вираз (11) дозволяє визначити коефіцієнт зворотного зв'язку за прискоренням  $k_\varepsilon$ , враховуючи граничні варіації збурюючих факторів. Також вираз (11) показує, що зміна опору якірного кола  $\Delta R_{як}$  не впливає на усталене значення прискорення  $\varepsilon_{уст}$ .

Динаміку зміни прискорення можна визначити, скориставшись характеристичним рівнянням, яким є знаменник рівняння (5)

$$\begin{aligned} D_0(p) &= (k_{зв.с}/c)J_{M0}(1 \pm \delta J_M)D_1(p) + k_\varepsilon = \\ &= \frac{k_{зв.с}}{c} J_{M0}(1 \pm \delta J_M) [pa_c T_\mu (pT_\mu + 1)(pT_{як0} + 1 \pm \delta R_{як}) + (pT_{як0} + 1)] + k_\varepsilon (pT_{як0} + 1) \end{aligned} \quad (12)$$

Підставимо до (12) значення коефіцієнта зворотного зв'язку за прискоренням  $k_\varepsilon$  і введемо таке позначення:  $a_\varepsilon$  – коефіцієнт оптимізації контуру прискорення, який враховує коефіцієнт оптимізації  $a_c$  контуру струму

$$a_\varepsilon = a_c \frac{\delta \varepsilon_{доп} (1 \pm \delta J_M)}{\delta J_M \pm \delta M_c}. \quad (13)$$

З виразу (13) знайдемо

$$\frac{a_c}{a_\varepsilon} = \frac{\delta J_M \pm \delta M_c}{\delta \varepsilon_{\text{доп}} (1 \pm \delta J_M)}$$

Це дозволить визначити коефіцієнт зворотного зв'язку за прискоренням  $k_\varepsilon$  через коефіцієнти оптимізації контурів  $a_c$  і  $a_\varepsilon$ .

$$k_\varepsilon = \frac{k_{\text{зв.с}}}{c} J_{M0} (1 \pm \delta J_M) \left( \frac{a_c}{a_\varepsilon} - 1 \right). \quad (14)$$

Внаслідок цих перетворень вираз (12) має вигляд

$$D_0(p) = \left( \frac{k_{\text{зв.с}}}{c} J_{M0} (1 \pm \delta J_M) \frac{a_c}{a_\varepsilon} \right) \times \quad (15)$$

$$\times (p^3 a_\varepsilon v T_\mu^3 + p^2 a_\varepsilon T_\mu^2 (1 \pm \delta R_{\text{як}} + v) + p T_\mu [a_\varepsilon (1 \pm \delta R_{\text{як}}) + v] + 1)$$

де  $v = T_{\text{як0}}/T_\mu$  – відношення електромагнітної сталої часу якірного кола  $T_{\text{як0}}$  системи ТП-Д до некомпенсованої малої сталої електроприводу  $T_\mu$ . Реальні значення коефіцієнта  $v$  знаходяться в межах  $v = 3-10$ . Досвід показує, що при значеннях  $v \leq 2$  недоцільно здійснювати компенсацію  $T_{\text{як}}$ , а необхідно приймати  $T_\mu = T_{\text{тп}} + T_{\text{як}}$ .

Для визначення динамічних властивостей контуру прискорення приведемо вираз (15) до нормованого вигляду за Вишнеградським:

$$D_0(p) = p^3 a_3 + p^2 a_2 + p a_1 + a_0 = p_*^3 + p_*^2 A + p_* B + 1, \quad (16)$$

де  $a_0 = 1$ ;  $a_1 = T_\mu [a_\varepsilon (1 \pm \delta R_{\text{як}}) + v]$ ;  $a_2 = a_\varepsilon T_\mu^2 (1 \pm \delta R_{\text{як}} + v)$ ;  $a_3 = a_\varepsilon T_\mu^3 v$  – коефіцієнти виразу (15);

$A = \frac{a_2}{a_3} \cdot \frac{1}{\Omega_0} = (1 \pm \delta R_{\text{як}} + v) \sqrt[3]{\frac{a_\varepsilon}{v^2}}$ ;  $B = \frac{a_1}{a_3} \cdot \frac{1}{\Omega_0^2} = [a_\varepsilon (1 \pm \delta R_{\text{як}}) + v] \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{a_\varepsilon v}}$  – нормовані коефіцієнти

передавальної функції (16);  $\Omega_0 = \sqrt[3]{\frac{a_0}{a_3}}$  – усереднене значення частоти власних коливань контуру;

$p_* = p/\Omega_0$  – безрозмірний оператор нормованого рівняння;

Потрібно зауважити, що дії зворотних від'ємних зв'язків за струмом і затриманого за прискоренням протилежні. Задача контуру струму – здійснювати максимальне заповнення струмово-часової діаграми  $I_\varepsilon(t)$  в пуско-гальмівних режимах і по можливості наблизити струм  $I_\varepsilon$  до стопорного значення. Задача зворотного зв'язку за прискоренням зменшувати струм  $I_\varepsilon$  в режимах, коли прискорення  $\varepsilon$  перевищує допустимі значення. Для успішного виконання такої операції необхідно, щоби швидкодія контуру прискорення була вищою за швидкодію контуру струму. Це означає, що коефіцієнт оптимізації  $a_\varepsilon$  контуру, охопленого затриманим зв'язком за похідною  $\varepsilon$  повинний бути меншим за коефіцієнт оптимізації  $a_c$  контуру струму ( $a_\varepsilon < a_c$ ).

Досвід лабораторних та натурних випробовувань показав, що коефіцієнт  $a_\varepsilon$  треба приймати в межах  $a_\varepsilon = 0,5 - 1,5$ , що практично збігається з оптимізацією за [4].

Значення варіацій параметрів при збуреннях, які реально існують на діючих екскаваторах, знаходяться в межах  $\delta J_M = \pm(0,2-0,4)$ ;  $\delta M_c = \pm(0,1-0,2)$ ;  $\delta R_{\text{як}} = \pm 0,3$ . Допустиме значення перевищення прискорення знаходяться в межах  $\delta \varepsilon = \pm(0,1-0,2)$ , причому менше значення  $\delta \varepsilon$  має місце для крокуючих екскаваторів в вантовими стрілами. Враховуючи ці значення параметрів, нормовані значення коефіцієнтів виразу (16) знаходяться в межах  $A = (2 \div 3)$ ,  $B = (1,5 \div 3)$ . Такі значення коефіцієнтів відповідають порівняно високому запасу стійкості, а перерегулювання

координати прискорення  $\varepsilon$  не перевищує  $\sigma_{\varepsilon} \% \leq (10 \div 30) \%$  [4], що цілком допустимо для механізмів обертання екскаваторів.

На завершення розглянемо приклад визначення коефіцієнта зворотного зв'язку за прискоренням  $k_{\varepsilon}$  і параметрів нормованих коефіцієнтів для системи керування механізмом обертання кар'єрного екскаватора лопати ЕКГ-5А з такими параметрами: момент інерції, приведений до валу двигуна  $J_{M0}=28,54 \text{ кгм}^2$ , стопорний момент приводу  $M_{\text{стоп}}=1956 \text{ Нм}$ , статичний момент  $M_c=56 \text{ Нм}$ , стала двигунів  $c=2,33 \times 2=4,66 \text{ Вс/рад}$ ,  $R_{\text{як0}}=0,19 \text{ Ом}$ ,  $T_{\text{як}}=0,08 \text{ с}$ ,  $T_{\text{ц}}=0,015 \text{ с}$ ,  $I_n=197 \text{ А}$ , допустиме прискорення платформи  $\varepsilon_{\text{доп.пл.}}=0,15 \text{ 1/с}^2$ ,  $k_{\text{зв.с}}=0,05 \text{ В/А}$ , передавальне число редуктора  $i = 398,8$ . Варіації параметрів:  $\delta M_c = \pm 0,22$ ,  $\delta J_M = \pm 0,2$ ,  $\delta \varepsilon_{\text{доп}} = \pm 0,1$ ,  $\delta R_{\text{як}} = \pm 0,3$ .

Враховуючи варіації параметрів системи електроприводу і задане значення перевищення прискорення над допустимим  $\delta \varepsilon_{\text{доп}}$ , визначимо необхідний коефіцієнт оптимізації контуру прискорення  $a_{\varepsilon}$

$$a_{\varepsilon} = a_c \frac{\delta \varepsilon_{\text{доп}} (1 - \delta J_M)}{\delta J_M + \delta M_c} = 2 \cdot \frac{0,2(1 - 0,2)}{0,2 + 0,22} = 0,76,$$

де  $a_c = 2$  – коефіцієнт оптимізації контуру струму.

Далі визначимо коефіцієнт зворотного зв'язку за прискоренням  $k_{\varepsilon}$ , який повинен забезпечувати отримане вище значення коефіцієнта оптимізації  $a_{\varepsilon}$

$$k_{\varepsilon} = \frac{k_{\text{зв.с}}}{c} J_{M0} (1 - \delta J_M) \left[ \frac{a_c}{a_{\varepsilon}} - 1 \right] = \frac{0,05}{4,66} 28,54 (1 - 0,2) \left( \frac{2}{0,76} - 1 \right) = 0,4.$$

Отримане значення коефіцієнта  $k_{\varepsilon}$  і значення варіацій параметрів дозволяють визначити коефіцієнти нормованого рівняння

$$A = 1,73; \quad B = 3,6; \quad \Omega_0 = 4,3.$$

Під час розрахунків коефіцієнтів прийнято значення коефіцієнта  $v = 5$ . Таким значенням нормованих коефіцієнтів відповідає перехідна характеристика координати прискорення  $\Delta \varepsilon$  з такими показниками [4]:  $\sigma_{\text{max}} = 14 \%$  – максимальне перерегулювання;  $\tau_p = 8,3$  – нормоване значення перехідного процесу;

Реальне значення часу регулювання координати прискорення

$$t_p = \tau_p / \Omega_0 = 8,3 / 4,3 = 1,93 \text{ с}.$$

Відповідно до розрахункових значень визначимо прискорення  $\varepsilon_{\text{max.з}}$  і перебільшення прискорення  $\Delta \varepsilon$  над допустимим значенням в системі з затриманим зворотним зв'язком за прискоренням

$$\varepsilon_{\text{max}} = \frac{(k_{\text{зв.с}} / c) [M_{\text{стоп}} + M_{c0} (1 + \delta M_c)] + k_{\varepsilon} \cdot \varepsilon_{\text{доп.пл.}} \cdot i}{(k_{\text{зв.с}} / c) \cdot J_{M0} (1 - \delta J_M) + k_{\varepsilon}} =$$

$$\frac{(0,05 / 4,66) [1956 + 56 (1 + 0,22)] + 0,4 \cdot 0,175 \cdot 398,8}{(0,05 / 4,66) \cdot 28,54 \cdot (1 - 0,2) + 0,4} = 77 \text{ 1/с}^2;$$

$$\Delta \varepsilon_{\text{max.з}} = \varepsilon_{\text{max.з}} - \varepsilon_{\text{доп}} = 77 - 70,5 = 6,5 \text{ 1/с}^2.$$

Отже, перебільшення прискорення  $\Delta\varepsilon_{\max,z}$  над допустимим значенням  $\varepsilon_{\text{доп}}$  становить у відносному значенні

$$\delta\varepsilon_{\max,z} = \Delta\varepsilon_{\max,z} / \varepsilon_{\text{доп}} \cdot 100 \% = 6,5/70,5 \cdot 100 \% = 9,3 \%,$$

що менше від допустимого значення  $\delta\varepsilon_{\text{доп}} = 10 \%$ .

Для порівняння визначимо прискорення в системі без зворотного зв'язку за прискоренням

$$\varepsilon_{\text{устр}} = \frac{M_{\text{стоп}} + M_{\text{с0}}}{J_{\text{м0}}(1 - \delta J_{\text{м}})} = \frac{1956 + 56}{28,54 \cdot (1 - 0,2)} = 88,12 \text{ 1/c}^2;$$

$$\delta\varepsilon_{\max,p} = \Delta\varepsilon_{\max,p} / \varepsilon_{\text{доп}} \cdot 100 \% = 17,62/70,5 \cdot 100 \% = 24 \%,$$

**Висновки.** Введення зв'язку за прискоренням дозволяє значно зменшити  $\delta\varepsilon_{\max,z}$  (в нашому прикладі до 9,3 %). Теоретично можливо зменшити перевищення прискорення  $\delta\varepsilon_{\max,p}$  до будь-якого значення, але це пов'язано зі значним збільшенням коефіцієнта  $k_{\varepsilon}$ . Оскільки система статична за прискоренням, то значне збільшення  $k_{\varepsilon}$  приведе, по-перше, до коливності в динамічних режимах, а по-друге, при дуже жорсткому підтриманні прискорення на допустимому рівні не буде можливості параметричної адаптації системи, яка полягає в залежності  $\Delta\varepsilon_{\max,z} = f(\Delta J, \Delta M_{\text{с}})$ . Дійсно, як було досліджено в [2], в режимах роботи, коли порожній ківш знаходиться біля бази екскаватора, є можливість збільшити прискорення механізму обертання без значних збільшень динамічних навантажень у механічних передачах, прискорюючи тим самим пуско-гальмівні режими. У системі з невисоким коефіцієнтом  $k_{\varepsilon}$ , відповідно до виразу (7), це відбувається автоматично. Так, зменшення моменту інерції до величини  $\delta J = -0,6$ , що для більшості екскаваторів відповідає знаходженню пустого ковша біля бази платформи, дозволяє збільшити прискорення  $\varepsilon_{\max,z}$  до значення  $0,23 \text{ 1 c}^2$ , або на 24 %.

1. Вуль Ю.Я., Ключев В.И., Седаков Л.В. *Наладка електроприводов екскаваторов.* – 2 изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1975. – 312 с. 2. Лозинський О.Ю., Панченко Б.Я., Цяпа В.Б. *Екскаваторний електропривід з адаптацією до параметричних змін // Вест. ХГПУ “Проблеми автоматизованного електропривода” Теорія і практика.* – 2003. – С. 420–422. 3. Лозинський О.Ю., Панченко Б.Я., Цяпа В.Б. *Експериментальні дослідження електроприводу механізму повороту екскаватора з обмеженням прискорення // Вестн. ХГПУ “Проблеми автоматизованного електропривода” Теорія і практика.* – 2003. – № 45. – С. 229–230. 4. Яворский В.Н., Бессонов А.Н., Каратаев А.И., Потапов А.М. *проектирование инвариантных следящих приводов.* – М.: Высш. шк., 1963. – 475 с.