

## СИСТЕМА ПАРАМЕТРИЧНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ ЕКСКАВАТОРНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

**Постановка проблеми.** Надійна і продуктивна робота однокишкєвих екскаваторів у значній мірі залежить від стабільності статичних та динамічних характеристик електроприводів головних робочих механізмів, які знаходяться під дією факторів збурення. Дослідження показали [1], що найбільш активно впливає на зміну параметрів електроприводів зміна температури нагріву електричних машин та навколишнього середовища. В робочому діапазоні температур, активні опори електричних машин можуть змінюватися в межах  $\delta R_s = (0,3+0,4) R_{св}$ . Відповідно змінюються електромагнітні та електромеханічні сталі електричних машин, а також коефіцієнти передач перетворювачів. Дії інших факторів збурення, таких як зміна напруги та частоти мережі живлення, впливають значно менше на зміну характеристик електроприводу.

Оскільки температура електромеханічного обладнання екскаватора змінюється не тільки при переході від періоду експлуатації з зимового на літній, а може суттєво змінюватися протягом однієї зміни роботи екскаватора, то система керування повинна бути адаптивною і змінювати стан системи керування в залежності від температур нагріву електричних машин та навколишнього середовища. Але, враховуючи те, що основним вимогами до екскаваторних електроприводів є надійність, максимальна безвідмовність та простота налагодження і експлуатації, на більшості сучасних однокишкєвих екскаваторах застосовують прості та надійні системи стабілізації вихідних координат електроприводу, таких як напруга та струм якорного кола (швидкість, момент), струм збудження двигуна, прискорення механізму, тощо. Системи стабілізації зменшують вплив факторів збурення на зміну параметрів прямого каналу регулювання електроприводу, що здійснюється відповідним вибором коефіцієнтів передач контурів регулювання вихідних координат. Стосовно каналів зворотних зв'язків, то достовірна інформація у більшості таких систем досягається точністю вимірювання регульованих координат. Це здійснюється за допомогою вимірювальних шунтів у якорному колі та колі збудження двигуна, термозалежних дільників для вимірювання струму та напруги, давачів е.р.с. тощо. Такі системи забезпечують стабільність механічних характеристик тільки в ustalених режимах [2].

Що стосується характеристик електроприводу в пуско-гальмівних режимах та режимах дії навантаження, то зміна температури суттєво впливає на динамічні показники системи, такі як запас стійкості, перерегулювання і коливність вихідних координат контурів регулювання, зміна коефіцієнта наближення динамічних характеристик до статичних. Як наслідок, також змінюються час проходження пуско-гальмівних режимів, а, відповідно, і продуктивність роботи екскаватора.

**Аналіз останніх досліджень.** З метою зменшення впливу зміни температури на роботу системи електроприводу в динамічних режимах, на діючих екскаваторах впроваджена система керування [1-3], яка побудована за принципом параметричної стабілізації контуру струму якорного кола з нестабілізованим зворотним зв'язком за струмом. В даній системі керування стабілізація механічних характеристик здійснюється зміною сигналу задання на вході контуру струму або коефіцієнта передачі регулятора струму у функції температури нагріву електричних машин. Це дозволило здійснити температурну стабілізацію як статичних так і динамічних характеристик та одночасно підвищити надійність системи електроприводу в цілому, бо така система не вимагає складних та точних вимірювальних пристроїв у каналі зворотного зв'язку за струмом.

**Постановка задач досліджень.** В роботах [1,2] приведено аналіз системи електроприводу з контуром параметричної адаптації в режимі штучного короткого замикання. В цьому режимі дія внутрішнього зв'язку за е.р.с. двигуна не враховується. Як відомо [4-6], дослідження на такій моделі дає достовірну інформацію про роботу системи при співвідношенні електромеханічної  $T_{ем}$  та електромагнітної  $T_{ек}$  сталей часу  $m = T_{ем}/T_{ек} \geq 2$ . Так у випадку  $m = 2$  логарифмічний декремент коливності дорівнює

$$\lambda = 2\pi\alpha/\Omega_p = 2\pi m \frac{1}{\sqrt{m(4-m)}} = 6,28,$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт коливання;  $\Omega_p$  – резонансна частота коливань.

Це означає, що при  $m=2$  коливання затухають практично за один період, а перехідна характеристика струму має перерегулювання  $\delta\% \leq 5\%$ . При  $m < 2$  затухання коливань погіршується, а перерегулювання збільшується, і отримання достовірної інформації вимагає врахування дії внутрішньої е.р.с. двигуна.

Така необхідність виникла у зв'язку з тенденцією застосування в екскаваторному електроприводі безредукторних приводів, що вимагає використання низькошвидкісних двигунів. В цьому випадку, як правило, коефіцієнт  $m < 2$ , і коливність вихідних координат зростає, змінюються і інші показники динаміки.

**Виклад основного матеріалу.** Виходячи з цього, проведемо аналіз роботи системи електроприводу з контуром параметричної температура-турної стабілізації в динамічних (пуско-гальмівних) режимах з врахуванням дії внутрішнього зв'язку за е.р.с. двигуна. Дослідження проведемо для різних співвідношень сталей  $T_{\mu}$  і  $T_{em}$  ( $m < 2$  та  $m > 2$ ). Враховуючи те, що електроприводи головних механізмів екскаватора в основному працюють у режимах струмообмеження, то проведемо аналіз тільки контура струму, якість роботи якого і визначає продуктивність екскаватора.

На рис.1. приведена структурна схема контуру струму, налагодженого за умови компенсації електромагнітної інерції силового кола (стала  $T_{\mu}$ ) і оптимізації контура за швидкістю та перерегулюванням. Структурна схема контура приведена з врахуванням зміни параметрів якірної кола системи КП-Д і зворотного зв'язку за струмом при варіації температури нагріву електричних машин.

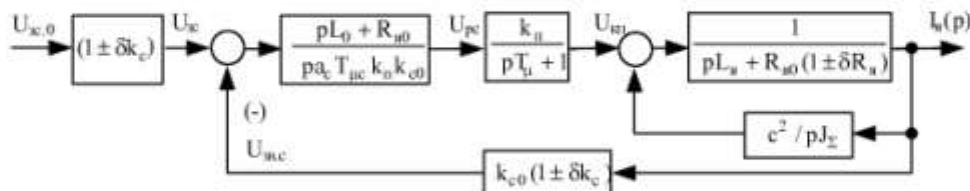


Рис.1. Структурна схема контуру струму.

На схемі позначено параметри силового кола системи КП-Д:  $L_{\mu}$  – індуктивність якірної кола;  $R_{\mu 0}$  – розрахункова величина опору;  $k_{\mu}$  – коефіцієнт передачі перетворювача КП;  $c = k\Phi_{\mu}$  – стала двигуна;  $k$  – конструктивна стала двигуна;  $\Phi_{\mu}$  – номінальне значення потоку збудження двигуна;  $J_{\Sigma}$  – момент інерції;  $k_{c0} = k_{\mu c} \cdot R_{\mu 0}$  – розрахункове значення коефіцієнту зворотного зв'язку за струмом;  $k_{\mu c}$  – коефіцієнт передачі давача струму в ролі якого можна використати давач напруги з коефіцієнтом передачі рівним приблизно одиниці;  $R_{\mu 0}$  – розрахункове значення активного опору додаткових полюсів двигуна;  $\delta R_{\mu} = \Delta R_{\mu} / R_{\mu 0}$  – відносне значення змін активного опору силового кола;  $a$  – коефіцієнт оптимізації контуру струму;  $T_{\mu c}$  – некомпенсована мала стала часу контура;  $U_{\mu c} = U_{\mu 0} (1 \pm \delta k_c)$  – сигнал завдання на вході контуру струму з урахуванням температурних змін двигуна.

Вважаючи, що температура силового кола відповідає температурі додаткових полюсів приймаємо  $\delta R_{\mu} = \delta k_c$ . Передавальна функція розімкненого контуру струму

$$W_{\text{роз}}^c(p) = \frac{U_{\mu c}(p)}{U_{\mu 0}(p)} = \frac{T_{em}(1 \pm \delta k_c)}{a_c T_{\mu c}} \cdot \frac{pT_{\mu 0} + 1}{(pT_{\mu c} + 1) \left[ (pT_{\mu 0} \frac{1}{1 \pm \delta R_{\mu}} + 1) pT_{em}(1 \pm \delta R_{\mu}) + 1 \right]} \quad (1)$$

де  $T_{\mu 0} = L_{\mu} / R_{\mu 0}$  – розрахункова електромагнітна стала силового кола;  $T_{em} = J_{\Sigma} R_{\mu 0} / c^2$  – електромеханічна стала системи КП-Д;

Приведемо вираз (1) до нормованого вигляду

$$W_{\text{роз}}^c(p) = \frac{mT_{\mu 0}(1 \pm \delta k_c)}{a_c T_{\mu c}} \cdot \frac{pT_{\mu 0} + 1}{(pT_{\mu c} + 1)(p^2 T_{\mu 0}^2 + p2\xi T_{\mu 0} + 1)} \quad (2)$$

де  $T_{\mu 0} = \sqrt{T_{\mu 0} T_{em}}$ ;  $\xi = \frac{1}{2}(1 \pm \delta R_{\mu})\sqrt{m}$  – коефіцієнт згасання.

Відповідно до (2) запишемо вираз частотної характеристики розімкненої системи

$$W_{\text{роз}}^c(j\omega) = \frac{mT_{\mu 0}(1 \pm \delta k_c)}{a_c T_{\mu c}} \cdot \frac{j\omega T_{\mu 0} + 1}{(j\omega T_{\mu c} + 1)((j\omega)^2 T_{\mu 0}^2 + j\omega 2\xi T_{\mu 0} + 1)} \quad (3)$$

Враховуючи, що  $T_{\mu 0} = T_{\mu 0} \sqrt{m} > a_c T_{\mu}$  і  $T_{\mu 0} > a_c T_{\mu}$  знайдемо частоту зрізу асимптотичної ЛАЧХ  $\omega_{\text{зр}} \cong \frac{mT_{\mu 0}^2}{2T_{\mu} T_{\mu 0}^2} = \frac{1}{2T_{\mu}}$ , що відповідає частоті зрізу розімкненого контуру струму в режимі штучного "короткого замикання".

Аналітичні дослідження виразу (3) показують, що при застосуванні контура параметричної стабілізації зміна температури електричних машин навіть при несприятливому коефіцієнті  $m < 2$  мало впливає на запас стійкості системи. Так, при найбільшому практичному максимальному відхиленні температури електричних машин ( $\delta R_{\mu} = \pm 0,3$ ) зміна кута запасу за стійкістю для електропривода механізму піднімання екскаватора ЕВГ 35/65 ( $n_{\text{дв.н}} = 26$  об/хв,  $P_{\text{дв.н}} = 3000$  кВт,  $T_{\mu} = 0,05$  с,  $T_{em} = 0,041$  с) збільшується на  $\Delta\varphi = 17,8^\circ$  при холодних і зменшується на  $\Delta\varphi = 6,35^\circ$  на нагрітих машинах для значення кута  $\varphi_{\text{шт.н}} = 58,6^\circ$  при налагоджувальних параметрах. Перерегулювання перехідної характеристики струму складає відповідно  $\delta I_{\mu} = 12\%$  при холодних та  $\delta I_{\mu} = 25\%$  при нагрітих машинах. Виходячи з цього для зменшення перерегулювання за струмом для електроприводів з тихохідними

двигунами доцільно відходити від технічної оптимізації контура струму збільшуючи коефіцієнт оптимізації  $a_c > 2$ .

Представляє інтерес, як впливає контур параметричної стабілізації на коефіцієнт наближення значення динамічного струму під час пуску після затухання перехідної складової  $I_{a, \text{дин}}$  до стопорного струму  $I_{a, \text{стоп}}$   $\chi = I_{a, \text{дин}} / I_{a, \text{стоп}}$  [4,5].

Запишемо передавальну функцію замкненого контуру

$$W_1^c(p) = \frac{I_a(p)}{U_{ac}(p)} = \frac{pb_1 + b_0}{p^3 a_3 + p^2 a_2 + pa_1 + a_0}, \quad (4)$$

де  $b_1 = m T_{a0}^2 / k_{c0}$ ;  $b_0 = m T_{a0} / k_{c0}$ ;  $a_3 = a_c m T_{\mu}^2 T_{a0}^2$ ;  $a_2 = a_c m T_{\mu} T_{a0} (T_{\mu}(1 \pm \delta R_s) + T_{a0})$ ;  $a_1 = m T_{a0} (1 \pm \delta R_s)(a_c T_{\mu} + T_{a0}) + a_c T_{\mu}^2$ ;

$$a_0 = m T_{a0} (1 \pm \delta R_s) + a_c T_{\mu};$$

Розв'язок відносно  $I_a(p)$  при початкових умовах

$$I_a(p) = \frac{pb_1 + b_0}{p^3 a_3 + p^2 a_2 + pa_1 + a_0} U_{ac}(p)(1 \pm \delta k_c).$$

Усталене значення струму в режимі пуску без навантаження

$$I_a(p)_{p \rightarrow \infty} = \frac{b_0}{a_0} U_{ac}(1 \pm \delta k_c) = \frac{m T_{a0}}{a_c T_{\mu} + m T_{a0}(1 \pm \delta R_s)} \cdot \frac{U_{ac0}}{k_{c0}} \cdot U_{ac}(p)(1 \pm \delta k_c).$$

Коефіцієнт наближення динамічного значення струму до статичного під час пуску електроприводу з контуром параметричної температурної стабілізації

$$\chi = I_{a, \text{дин}} / I_{a, \text{стоп}} = \frac{m T_{a0}}{a_c T_{\mu} + m T_{a0}(1 \pm \delta R_s)}, \quad (5)$$

де  $I_{a, \text{стоп}} = \frac{U_{ac0}^{\max}}{k_{c0}}$  – стопорний (максимальний) струм двигуна.

У відповідності до виразу (5) зміна температури електричних машин незначно впливає на коефіцієнт наближення динамічних характеристик до статичних завдяки наявності в чисельнику складової  $(1 \pm \delta k_c)$ , що відповідає контуру параметричної температурної стабілізації. Так, для вище приведеного електроприводу механізму піднімання екскаватора ЕВГ 35/65 коефіцієнт  $\chi = 0,67$  при роботі приводу з налагоджувальними параметрами. При підвищенні температури до максимального робочого значення, що відповідає зміні  $\delta R_s = 0,3$  коефіцієнт приймає значення  $\chi = 0,73$ , а при зменшенні температури -  $\chi = 0,59$ . Зменшення коефіцієнта  $\chi$  при зниженні температури нагріву електричних машин відповідає зменшенню навантажень на механічну частину приводу, що сприяє продовженню терміну безаварійної роботи приводу при врахуванні холодноламокості металу [3].

**Висновки.** Запропонована система екскаваторного електроприводу з контуром параметричної температурної стабілізації забезпечує необхідну стабілізацію не тільки статичних, а і динамічних характеристик для специфічних безредукторних екскаваторних електроприводів при використанні тихохідних двигунів з співвідношенням електромагнітних та електромеханічних сталей  $m = T_{\mu} / T_{em} < 1$ .

Формування динамічних характеристик такою системою електроприводу відповідає умовам підвищення надійності роботи механізму при роботі в екстремальних умовах (при зниженні температури навколишнього середовища нижче критичної  $\theta_{\text{серед.}} < -30^\circ\text{C}$ ).

#### Література.

1. Лозинський О.Ю., Панченко Б.Я., Цяпа В.Б. Екскаваторний електропривід з адаптацією до параметричних змін // Вестник ХГПУ "Проблеми автоматизованого електропривода" Теорія і практика, 2003, С.420-422.
2. Лозинський О.Ю., Панченко Б.Я., Цяпа В.Б. Системи адаптивного керування екскаваторними електроприводами // Вестник ХГПУ "Проблеми автоматизованого електропривода" Теорія і практика, 1999, С.157-159.
3. Лозинський О.Ю., Цяпа В.Б., Панченко Б.Я., Карплюк Л.Ф. Адаптивне керування екскаваторними електроприводами під час екстремальних температурних впливів // Вісн. ДУ "Львівська політехніка". 1998. № 347, с.53-63.
4. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М.Г.Попович, О.Ю.Лозинський, В.Б.Клепиков та ін.; за ред. М.Г.Поповича, О.Ю.Лозинського. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.
5. Лебедев Е.Д. и др. Управление вентилями электроприводами постоянного тока. М. "Энергия" 1970.
6. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат. 1985.-560 с.