

elektroenergetyce: III Sympozjum. – Zakopane, Polska. – 1993. – P. 17–20. 6. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / В.В. Ершевич, А.Н. Зейлигер, Г.А. Илларионов и др.; Под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 352 с. 7. Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.

УДК62-83:621.314.624:621.879

О.Ю. Лозинський, БЯ. Панченко, В.Б. Цяпа, Л.Ф. Карплюк
 Національний університет “Львівська політехніка”,
 кафедра ЕАП

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЕКСКАВАТОРНИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В РЕЖИМАХ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ

© Лозинський О.Ю., Панченко БЯ., Цяпа В.Б., Карплюк Л.Ф., 2009

Описано та наведено результати досліджень роботи системи екстремного захисту електромеханічного обладнання екскаватора.

The results of researches of work of the system of ekstrennogo defence of electromechanics equipment of power-shovel are described and resulted.

Постановка проблеми. Для забезпечення максимальної продуктивності копаючих механізмів одноківшевих екскаваторів, які працюють у повторно-короткочасному режимі, необхідно підтримувати їх роботу у зоні з максимально-допустимим моментом $M_{\text{відс}}$ (точка A_0 з координатами $M_{\text{відс}}$, $\omega_{\text{відс}}$ на рис. 1). Якщо навантаження M_c відрізняється від значення $M_{\text{відс}}$, при якому вступає в дію обмежувальний зворотний зв'язок, двигун і механізм виявляються недовикористаними за продуктивністю. Природно, може виникнути протилежний варіант, коли середнє значення навантаження може перевищувати допустиме.

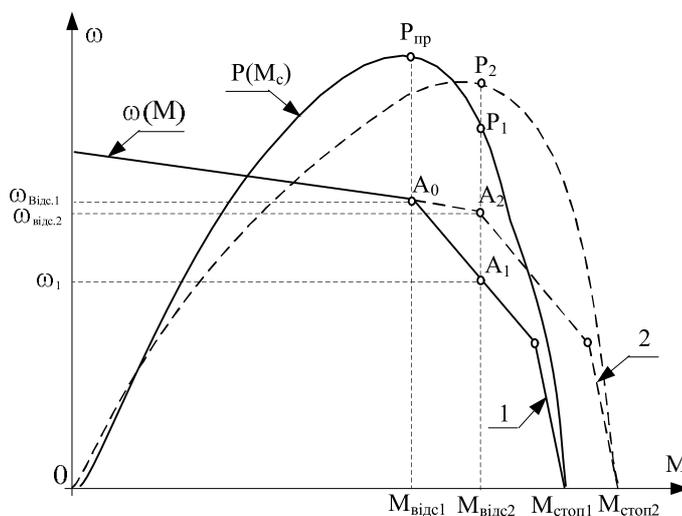


Рис. 1. Графіки залежності швидкості $\omega(M)$ та потужності $P(M)$ від моменту на валу двигуна

В роботах [1–3] запропоновано доцільність здійснювати біжучу корекцію систем керування електроприводами копаючих механізмів, які працюють в режимах нестационарних навантажень. Змінюючи рівень обмеження моменту $M_{\text{відс}}$, або форму механічної характеристики $\omega(M)$ можна підтримувати продуктивність електроприводу на рівні проектних значень. Для цього необхідно вимірювати середню потужність $P_{\text{сер}}$ за певний проміжок часу і якщо вона відрізняється від проектного значення режиму копання $P_{\text{пр}}$, змінювати уставку моменту $M_{\text{відс}}$.

Для ілюстрації розглянемо систему зі зміною уставки відсічки $M_{\text{відс}}$ у випадку зменшення потужності $P_{\text{сер}} < P_{\text{о.сер}}$. Вихідна механічна характеристика електроприводу приведена на рис.1 і позначена цифрою 1. Вона має подвійний злом на відрізку обмеження моменту, що дозволяє забезпечити кращі робочі показники [2]. На рисунку приведена також залежність потужності від моменту двигуна $P(M_c)$. Робоча точка A_0 механічної характеристики 1, яка реалізує номінальну потужність P_n , має координати $(\omega_0 \text{ відс}, M_0 \text{ відс})$. Зі збільшенням моменту навантаження до значення M_{c1} робоча точка зміщується по характеристиці 1 в положення $A1$ $(\omega_1 \text{ відс}, M_{c1})$. Швидкість і відповідно потужність зменшується до значень ω_1, P_1 . Якщо в такому режимі електропривід буде знаходитися порівняно довгий час, то середнє значення потужності буде зменшуватися і наближатися до величини P_1 . Це повинно дати сигнал на збільшення моменту відсічки $M_{\text{відс}}$, електромеханічна характеристика зміститься в положення 2 рис. 1, а робоча точка перейде в положення A_2 $(\omega_0 \text{ відс } 2, M_2 \text{ відс } 2)$. В результаті потужність P_2 наблизиться до проектного значення.

Експлуатаційні експериментальні дослідження на серійних екскаваторах ЕКГ-4,6 довели ефективність застосування системи, яка здійснює корекцію параметрів механічної характеристики в функції середньо статистичних навантажень в діапазоні робочих моментів механізму $M_c = (0,6 \div 1,2) M_{\text{відс}}$.

Разом з тим ця система має недолік, який характерний для адаптивних систем: вона не здатна захищати механізм від окремих значних за величиною, але рідко виникаючих накидів навантаження. Так, хоча в режимах жорстких стопорінь ковша, моменти в механічних передачах можуть перевищувати $(1,5 \div 2) M_{\text{відс}}$, система адаптації на це не буде реагувати, бо її дії почнуться лише у відповідь на серію таких навантажень. Слід зауважити, що така система адаптивного керування сама провокує збільшення напружень в механічних передачах в режимах значних перевантажень, збільшуючи уставку моменту $M_{\text{відс}} > M_0 \text{ відс}$.

У зв'язку з вище сказаним система адаптації обов'язково повинна доповнюватися пристроями "екстремного обмеження навантажень", що перевищують робочий діапазон навантажень копаючих механізмів екскаваторів $M > 1,2 M_{\text{відс}}$.

Аналіз останніх досягнень. Більшість сучасних систем керування електроприводами копаючих механізмів побудовані за принципом підпорядкованого керування (СПР) з контурами напруги (швидкості) двигуна – зовнішній контур і контуром струму(моменту) двигуна – внутрішній контур. Як правило, контури регулювання систем и налагоджуються за умови "технічної оптимізації", яка забезпечує високі якісні показники системи в пуско-гальмівних режимах. Що стосується дії навантажень, то такі системи здатні суттєво обмежити момент (струм) двигуна, коли пікове навантаження в режимі копання не перевищить $M_c \leq (1,1 \div 1,2) M_{\text{стоп}}$. Як було доведено [2] в режимах жорстких стопорінь СПР суттєво зменшують викиди струму і моменту двигуна, а тим більше моменти в пружних передачах M_p . В роботі [2] запропонована СПР з додатковим зворотним затриманим зв'язком за струмом в контурі струму. Цей зв'язок реалізований на форсуючій ланці з високим коефіцієнтом передачі, яка вступає в дію коли струм перевищує значення $I_a \geq (1,2 \div 1,3) M_{\text{стоп}}$. Така система здатна значно обмежити струм і момент двигуна. Що стосується моменту в механічних передачах, то така система не може суттєво зменшити викиди пружного моменту M_p .

Стосовно обмеження прискорення в пуско-гальмівних режимах, то адаптивна система збільшуючи момент $M_{\text{відс}}$, тим самим збільшує величину прискорення понад допустиме значення $\varepsilon > \varepsilon_{\text{доп}}$, що в свою чергу приведе до збільшення динамічних моментів в механічних передачах. На існуючих екскаваторах обмеження прискорення здійснюється подачею сигналу завдання за допомогою задавача інтенсивності ЗІ, але після підривання породи (після стопоріння ковша) система не контролює прискорення і не обмежує динамічних навантажень в механічних передачах.

Задачі досліджень. Аналітичні і експериментальні дослідження показали, що системи адаптивного керування, дії яких спрямовані на підтримання потужності копаючих механізмів одноківшових екскаваторів на проектному рівні, не спроможні обмежувати зусилля в механічних передачах в режимах, коли моменти виходять за межі допустимих значень. В залежності від моделі екскаватора, робочі моменти знаходяться в межах $M=(1,1\div 1,2)M_{відс}$. З метою захисту механічного обладнання в цих режимах необхідно розробити і дослідити системи екстренного захисту електромеханічного обладнання (СЕЗ).

Виходячи з умови роботи копаючих механізмів сформулюємо основні вимоги до СЕЗ. Система СЕЗ повинна:

- працювати в режимі очікування і вступати в дію тільки тоді, коли момент (струм) навантаження перевищить максимально-допустиме значення;
- здійснювати тільки захисну функцію і не приймати участі в формуванні робочих характеристик;
- захищати електромеханічне обладнання як в пуско-гальмівних режимах так і в режимах копання і транспортування ковша;
- оскільки в режимах жорстких стопорінь ковша існує суттєва розбіжність між моментом двигуна M_d і моментом в пружних механічних передачах M_n , то для обмеження M_n необхідно використовувати сигнали інших координат, наприклад сигнали напруги або швидкості.

Виклад основного матеріалу. На рис. 2 зображена функціональна схема одного з варіантів системи керування з адаптивним керуванням. Система побудована на базі двоконтурної СПР з контуром струму якірного кола з регулятором РС – внутрішній контур, і контуром напруги з регулятором РН – зовнішній контур. Адаптивне керування здійснює блок БАК (блок адаптивного керування), який у функції усереднення значення потужності $P \cong P_n$ здійснює корекцію параметрів системи, впливаючи на регулятор РН.

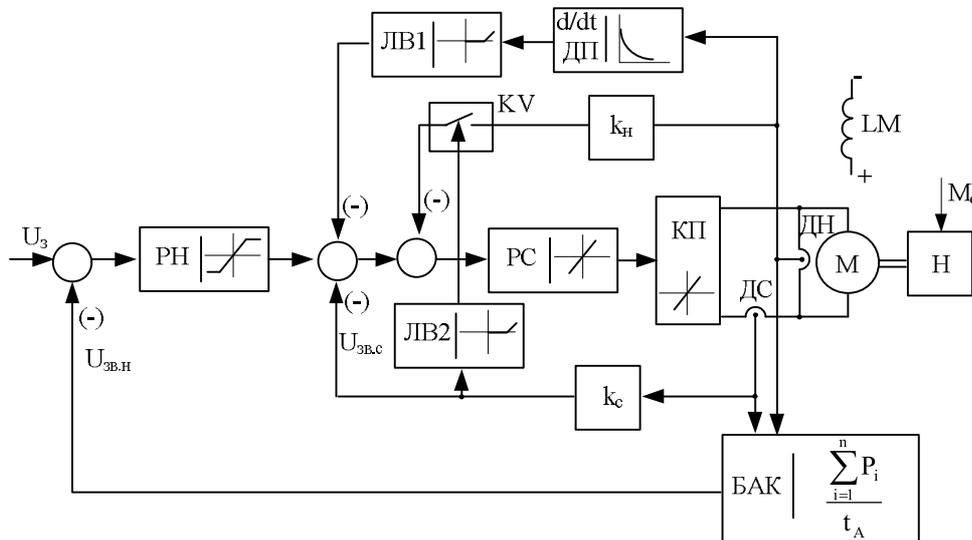


Рис. 2. Функціональна схема електроприводу з адаптивним керуванням

Захист електричного і механічного обладнання від перевантажень, що перевищують допустимі робочі значення, здійснює система екстренного захисту СЕЗ, яка складається з двох контурів: контуру обмеження прискорення двигуна (ОП) і контуру обмеження моменту (ОМ). Сигнали від цих контурів поступають на вхід регулятора РС. Всі зворотні зв'язки від'ємні. В контур обмеження прискорення входять датчик похідної від напруги (швидкості) ДП і ланка відсічки ЛВ1, яка визначає допустиме прискорення $\epsilon_{доп}$. Робота контуру та визначення його параметрів описана в [4].

Контур обмеження моменту складається з ключа KV, який подає сигнал пропорційний нарузі (швидкості) двигуна на вхід регулятора РС і ланки відсічки струму ЛВ2, яка подає сигнал

на вмикання ключа KV. В режимах перевантажень і жорстких стопорінь, коли струм (момент) двигуна перевищує максимальне значення робочих струмів спрацьовує ланка ЛВ2 і вмикає ключ KV. На вхід регулятора РС поступає сигнал від'ємного зворотного зв'язку за напругою U_d і характеристика $\omega(M)$ стає жорсткішою, в результаті чого двигун переходить в режим рекуперативного гальмування. Як наслідок, швидкість двигуна зменшується, зменшуючи тим самим величину пружного моменту M_p в механічних передачах. Таким чином, введення зв'язку за напругою приводить до роботи електроприводу в двох квадрантах. Можливий варіант обмеження моменту M_p , зображений в фазових координатах, приведений на рис. 3, де показано: 1 – електро-механічна характеристика системи електроприводу в усталеному режимі $\omega(M)$, 2 – штучна електромеханічна характеристика електроприводу при введенні від'ємного зворотного зв'язку за напругою (ключ KV увімкнено). Усереднені динамічні характеристики режиму стопоріння позначені 3 – $\omega(I_a)$, 4 – $\omega(M_{пр})$. Пунктиром позначено ймовірні характеристики $\omega(I_a)$, $\omega(M_p)$ без цього зворотного зв'язку.

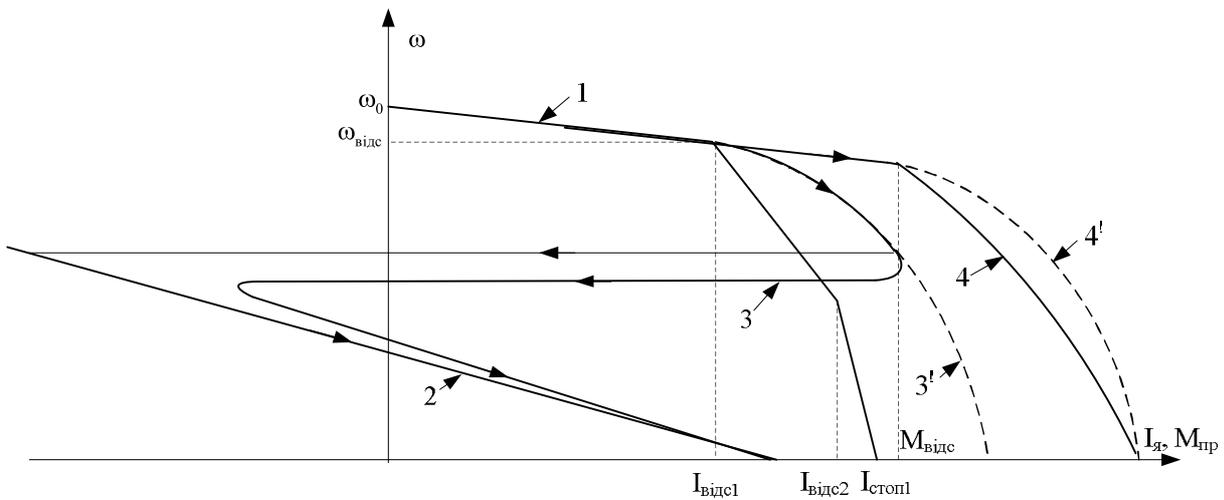


Рис. 3. Характеристики електроприводу

Проведемо вибір параметрів зворотного зв'язку за напругою, який здійснює захист системи електроприводу в стопорному режимі. Для цього розглянемо структурну схему контуру струму в стопорному режимі. Схема системи в такому режимі приведена на рис.4 і відповідає варіанту коли діють два зворотних зв'язки – за струмом з коефіцієнтом передачі k_c і за напругою з коефіцієнтом k_H , регулятор РН знаходиться в насиченні і на вхід регулятора РС поступає максимальний сигнал завдання $U_{зс\ max} = U_{рн\ max}$.

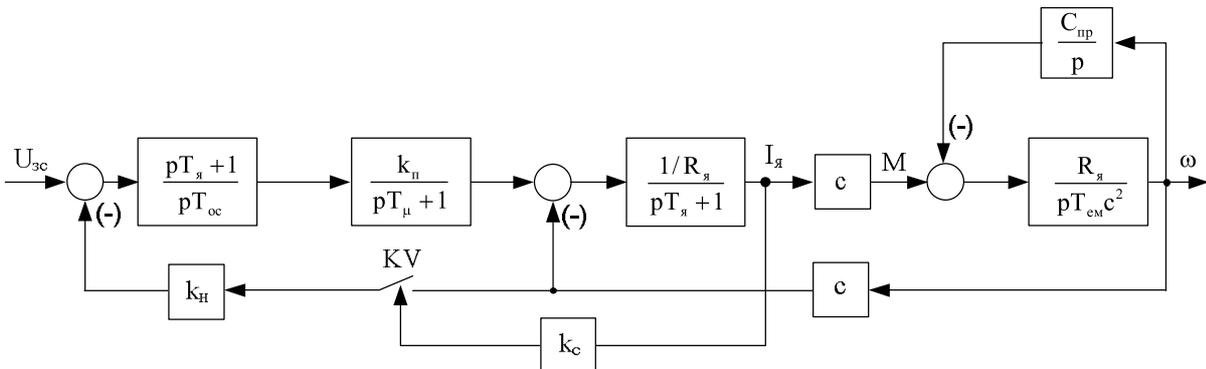


Рис. 4. Структурна схема контуру струму в стопорному режимі

У відповідності з структурною схемою Лапласове зображення для приросту моменту в пружній передачі $\Delta M_p(s)$, вважаючи що перед початком стопоріння привід був навантажений статичним стопорним моментом $M_{стоп}$ (або $M_{відс}$), має вигляд

$$\Delta M_{\text{п}}(s) = M_{\text{стоп}} \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{sD(s)} \right), \quad (1)$$

де $D(s) = s^3 a_c T_{\mu} T_d T_{\text{п}} + s^2 T_{\text{п}} (T_d + a_c T_{\mu}) + s(a_c T_{\mu} + T_{\text{п}} \frac{k_{\text{н}}}{k_{\text{т}}}) + 1$, a_c – коефіцієнт оптимізації контуру

струму; у випадку технічної оптимізації $a_c = 2$; $T_d = J_d \frac{R_{\text{як}}}{c^2}$ – електромеханічна стала двигуна;

$T_{\text{п}} = 1 / (T_d \cdot \Omega_0)^2$ – стала, яка визначає пружність передач механізму; $\Omega_0 = \sqrt{C_{\text{пр}} J_d}$ – частота вільних коливань пружної механічної системи; $C_{\text{пр}}$ – жорсткість пружної механічної системи; T_{μ} – некомпенсована стала контуру струму; $M_{\text{стоп}} = U_{3 \text{ max}} \cdot c / k_c$ – стопорний момент двигуна; c – стала двигуна; $U_{\text{н}}$, $I_{\text{н}}$, $\omega_{\text{н}}$ – номінальні параметри двигуна.

Значення коефіцієнта від'ємного зворотного зв'язку за напругою $k_{\text{н}}$ визначаємо, виходячи з умови забезпечення мінімуму квадратичного інтеграла

$$J_{\text{н}} = \int_0^{\infty} [\Delta M(t)]^2 dt. \quad (2)$$

Для цього скористаємось теоремою Парсеваля і таблицями, приведеними в []. В результаті знайдемо

$$J_{\text{н}} = a_c T_{\mu} + T_{\text{п}} \frac{k_{\text{н}}}{k_{\text{т}}} + \frac{T_{\text{п}} (T_d + a_c T_{\mu})^2}{a_c^2 T_{\mu}^2 + T_{\text{п}} (T_d + a_c T_{\mu}) \frac{k_{\text{н}}}{k_{\text{т}}}}. \quad (3)$$

Диференціюючи значення інтеграла $J_{\text{н}}$ за коефіцієнтом $k_{\text{н}}$ і прирівнюючи похідну до нуля, після перетворень знайдемо

$$k_{\text{н}} = k_{\text{т}} \Omega_0 \left[T_d \sqrt{1/\chi} - \chi (a_c T_{\mu})^2 \right], \quad (4)$$

де $\chi = T_d / (a_c T_{\mu} + T_d)$ – коефіцієнт, що характеризує наближення динамічних характеристик до статичних в пуско-гальмівних режимах.

Для прикладу розрахуємо значення $k_{\text{н}}$ електроприводу піднімання екскаватора ЕКГ-20 з такими параметрами: $T_d = 0,03\text{с}$, $T_{\text{пн}} = 0,3\text{с}$, $\Omega_0 = 8 \text{ 1/с}$, $T_{\mu} = 0,01\text{с}$, $a_c = 2$, $k_{\text{т}} = 0,06$.

Визначаємо коефіцієнт $\chi = 0,6$. В цьому випадку оптимальне значення коефіцієнта від'ємного зворотного зв'язку за напругою, згідно з формулою (3), повинно бути $k_{\text{н}} = 0,016$.

Робота електроприводу з даними параметрами та розрахованим коефіцієнтом $k_{\text{н}}$ перевірялась на моделі в режимі стопоріння. Осцилограми приведені на рис. 4.

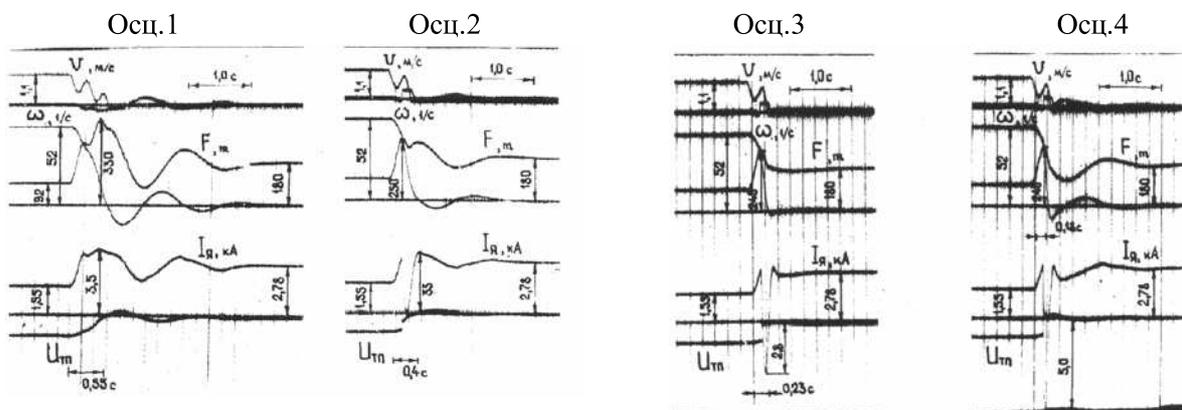


Рис. 4. Осцилограми роботи електроприводу з адаптивним керуванням

Аналіз осцилограм показує, що при розрахованому коефіцієнті $k_{\text{н}}$ отримуємо оптимальний перехідний процес, при якому максимальне збільшення зусилля в канатах F при стопорінні

зменшується до величини $F=245$ т (осц. 3) в порівнянні з зусиллям $F=330$ т без дії від'ємного зворотного зв'язку за напругою (осц. 1). На рисунку приведено також осцилограми при налагодженні від'ємного зворотного зв'язку за напругою з коефіцієнтом K_n меншим (осц. 2) і більшим (осц. 4) від розрахованого. Вони підтверджують твердження оптимальності розрахованого значення коефіцієнту, так як при меншому значенні коефіцієнта максимальне перегулювання за зусиллям становить $F=250$ т, а при більшому значенні (осц. 4), навіть при зміні знаку струму двигуна і зростанні струму до величини $I_n=5$ кА перегулювання за зусиллям не зменшилось нижче $F=245$ т.

Висновки. Запропонована система обмеження струмів і моментів двигуна в механічних передачах в режимах перевантажень і різких стопорінь здатна суттєво обмежити викиди струму і пружного моменту M_n . Вона спроможна зменшити максимальне значення перегулювання за струмом і пружним моментом в залежності від типу екскаватора і механізму копання в межах (1,3–1,6) для струму і (1,2–1,5) для моменту. Запропонована система може успішно використовуватись для копаючих механізмів як для систем з адаптивним керуванням, так і для стандартних систем стабілізації механічних характеристик.

Експерименти показали, що вона проста в налагодженні, бо вона не критична за показниками динаміки при зміні коефіцієнту в сторону збільшення зворотного зв'язку за напругою K_n .

1. Иванченко Г.Е., Иванков Б.Ф. Разработка и результаты опытной эксплуатации адаптивной системы управления копающего механизма экскаватора // Электроэнергетические и электромеханические системы. – 1981. – № 151. – С. 143–146. 2. Бардачевский В.Т., Иванков Б.Ф., Панченко Б.Я. Устройство ограничения момента как исполнительный орган адаптивной системы регулирования нагрузок копающего механизма экскаватора // Республиканский межведомственный научно-технический сборник // Электромашиностроение и электрооборудование, “Техніка”. – К., 1980. – № 31. – С. 31–42. 3. Иванков Б.Ф. Оптимізація режимів електроприводу копаючого механізму екскаватора. Республіканський міжвідомчий науково-технічний збірник // Автоматизація виробничих процесів. – 1992. – № 30. – С. 32–37. 4. Лозинський О.Ю., Панченко Б.Я., Цяпа В.Б. Система автоматизованого електропривода з обмеженням прискорення // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2005. – №5 44: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С. 89–95. 5. Лозинський О.Ю., Панченко Б.Я., Цяпа В.Б. Система керування екскаваторними електроприводами копаючих механізмів / Вестн. ХГПУ “Проблеми автоматизованого електропривода”, Теорія і практика. – 2001. – С. 176–178. 6. Нютон Дж.К., Гулд Л.А., Кайзер Дж.Ф. Теорія лінійних слідячих систем. – М.: Физматгиз, 1969.