

ЕЛЕКТРОДИНАМІКА ВИСОКОТОЧНОГО ІТЕРАЦІЙНОГО ДВОКАНАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОДАЧІ З УМОВНИМ КОМПЕНСАТОРОМ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ

О.А. Худяєв*, канд. техн. наук, В.М. Шамардіна**, канд. техн. наук,
Д.О. Пшеничников***, канд. техн. наук, І.В. Обруч****, канд. техн. наук
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна.
E-mail: Vira.Shamardina@khp.edu.ua.

На прикладі моделювання поздовжньої подачі робочого органу (РО) прецизійного металорізального верстата моделі 24К70АФ4 в процесі різання (ПР) доведено можливість значного порівняльного підвищення ефективності електромеханічного перетворення енергії в електроприводі (ЕП) подачі шляхом застосування пропонованого ітераційного двоканального ЕП з умовним компенсатором ПР (УКПР) замість традиційного одноканального ЕП. Це дає змогу суттєво підвищити якість керування подачею РО та, як наслідок, значно підняти потенційну конкурентну спроможність випускної продукції важких металорізальних верстатів. Побудовано детальні імітаційні комп'ютерні моделі порівнюваних двоканального і одноканального ЕП, які містять відповідні динамічні моделі ПР та УКПР і враховують вплив на динаміку приводів нелінійних сил тертя у навантаженні. Одержано порівнювальні електродинамічні характеристики систем. Встановлені значні (у рази) потенційні переваги в швидкодії та точності керування подачею двоканального ЕП. Дослідження вперше показали, що точність подачі РО в режимі металообробки суттєво підвищено не тільки за рахунок ітераційної структури двоканальної системи керування ЕП, але й додатково шляхом побудови електронної моделі самого ПР та включення цієї моделі разом з УКПР в контур керування ЕП подачі. Бібл. 13, табл. 2, рис. 7.

Ключові слова: ітераційний двоканальний електропривод подачі, умовний компенсатор процесу різання, комп'ютерне моделювання, електродинамічні характеристики, швидкодія, динамічна точність.

Вступ. Підвищення статичної і, особливо, динамічної точності стежачих електроприводів (ЕП) механізмів подачі (МП) інерційних робочих органів (РО) верстатів, роботів та промислових маніпуляторів є одним з найважливіших завдань, що стоять перед проектувальниками сучасних програмно-керованих ЕП у верстато- та роботобудуванні [1–4]. Багатоканальні ЕП МП, побудовані за ітераційним принципом [5], як і близькі до них за принципом дії багатодвигунні та багатоконтурні високоточні стежачі приводи та системи позиціонування інших типів [6–10], мають суттєві переваги у швидкодії та точності керування положенням (без перерегулювання) РО перед традиційними одноканальними ЕП подачі прецизійних металорізальних верстатів та обробних центрів (ОЦ) [11]. Застосування ітераційних багатоканальних ЕП МП потенційно забезпечує можливість значного порівняльного підвищення ефективності електромеханічного перетворення енергії за рахунок значного підвищення якості керування і, як наслідок, потенційної конкурентоспроможності випускної продукції механообробних верстатів. Крім того, ітераційні стежачі ЕП із налаштуванням каналів за принципом систем підпорядкованого регулювання (СПР) [12] потенційно мають високу надійність за рахунок добре відпрацьованих та уніфікованих типових налаштувань контурів керування.

Постановка задачі. Ітераційні двоканальні ЕП на базі дводвигунних безредукторних МП [13] дають можливість значно зменшити інерційність приводного механізму (ПМ) і підвищити швидкість у порівнянні з технічно більш простими двоканальними ЕП подачі з механічним диференціалом [5]. Це досягається застосуванням конструкції ПМ з мінімальним числом передавальних ланок, що дає змогу більш ефективно використовувати швидкісні можливості ширококутового приводу другого, уточнюючого каналу. Варіантом ітераційного безредукторного ЕП може служити двоканальний ЕП МП з ходовою гайкою, що обертається (ОХГ) [11], однак, при цьому ускладнюються проектування та розробка відповідного МП з ОХГ, що суттєво підвищує вартість виготовлення верстата загалом.

© Худяєв О.А., Шамардіна В.М., Пшеничников Д.О., Обруч І.В., 2026
ORCID: * <https://orcid.org/0000-0003-3344-4559>; ** <https://orcid.org/0000-0002-9274-6517>;
*** <https://orcid.org/0000-0002-1243-168X>; **** <https://orcid.org/0000-0001-8239-1428>

© Видавець ВД «Академпериодика» НАН України, 2026



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

У роботі [13] як альтернативний варіант двоканальному ЕП з ОХГ запропонований двоканальний ЕП на базі дводвигунного МП, що має дві стандартні гвинтові передачі (ГП) (довгу і коротку) з кульково-гвинтовими парами (КГП) типу «гвинт-гайка кочення». Такий МП з двома ГП, що взаємодіють за ітераційним принципом, реалізує механічну безлюфтову передачу на РО верстата моментів і рухів за найбільш відповідальною координатою подачі та забезпечує можливість часткового поділу навантаження. Стосовно поздовжньої подачі РО (на прикладі прецизійного металорізального верстата моделі 24K70АФ4) побудовано уточнену динамічну модель руху в режимі механообробки та отримано відповідну узагальнену структурно-алгоритмічну схему ітераційного двоканального компенсованого ЕП МП з двома ГП та СПР-налаштуванням каналів керування.

Запропонована в [13] модель двоканального ЕП подачі включає узагальнену динамічну модель процесу різання (УДМ ПР) та модель відповідного умовного компенсатора ПР (УКПР), враховує вплив нелінійностей тертя ковзання в основних елементах МП верстата та тертя різання в РО під час металообробки. Разом з тим, у роботі не доведена можливість значного порівняльного підвищення ефективності електромеханічного перетворення енергії за рахунок застосування запропонованого двоканального ЕП подачі з УКПР; не виконано оцінку потенційно досяжних швидкодії та точності керування подачею інерційного РО за допомогою ітераційного двоканального ЕП з двома ГП, що потребує кількісної оцінки; не проведено аналіз електродинамічних характеристик і показників якості керування порівняно з одноканальними ЕП, які встановлюються на подібні верстати та ОЦ. У цьому сенсі результати даної роботи є логічним завершенням результатів, одержаних у роботі [13].

Мета роботи полягає у доведенні можливості порівняльного (порівняно з одноканальним ЕП) суттєвого підвищення ефективності електромеханічного перетворення енергії за рахунок значного підвищення швидкодії та точності керування подачею за допомогою ітераційного двоканального компенсованого ЕП МП з двома ГП та СПР-налаштуванням, який включає УДМ ПР та модель відповідного компенсатора УКПР стосовно поздовжньої подачі РО (робочого столу з виробом) важкого координатного багатофункціонального верстата особливо високої точності моделі 24K70АФ4.

Матеріал досліджень. Досліджуваний двоканальний ЕП подачі з двома ГП включає перший (основний) К-1 і другий (уточнюючий) К-2 канали керування за кутом з відповідними підпорядкованими контурами швидкості, налаштованими на симетричний оптимум. Основний канал К-1 використовується для керування приводом обертання ходового гвинта (ХГ1) першої ГП (ГП1), а уточнюючий канал К-2 – приводом обертання ходового гвинта (ХГ2) другої ГП (ГП2). Привод гвинта ХГ2 та ГП з парою КГП2 встановлені на спеціальних полозках МП РО. Спрощена схема конструкції та кінематична схема двоканального ЕП поздовжньої подачі (вісь Х) РО верстата розглянуті в роботі [13].

В комп'ютерній моделі порівнюваних ЕП подачі використано: в основному каналі К-1 двоканального ЕП та в одноканальному ЕП подачі – комплектний ЕП постійного струму з силовою частиною типу ІПП-ДПС серії MR-J3 моделі MR-J3-DU37KA ($P_{\text{ном}} = 37$ кВт, струм – до 630 А); в уточнюючому каналі К-2 – широкосмуговий комплектний сервопривод змінного струму з частотно-струмовим векторним керуванням (типу ПЧ-АД) серії Sinamics V90 моделі 6SL3210-5FE15-OUAO ($P_{\text{ном,ПЧ}} = 5$ кВт). Як виконавчі двигуни (ВД) Д1 основного та Д2 уточнюючого приводів, використані: високомоментний реверсивний ДПС із постійними магнітами серії 2ПБВ типу 2ПБВ132S ($P_{\text{ном,Д1}} = 1,94$ кВт), що встановлюється на верстати вказаної моделі, і порівнянний за номінальним моментом і потужністю АД з короткозамкненим ротором фірми Siemens серії 1LA7 моделі 1LA7133-8AB ($P_{\text{ном,Д2}} = 3$ кВт). Порівняння двоканального ЕП проводиться з традиційним для даної та аналогічних моделей верстатів одноканальним глибоко регульованим ЕП подачі на базі ДПС типу 2ПБВ132S.

1. Визначення операторів розімкнутих каналів керування. Спрощені функціональні схеми ітераційного двоканального ЕП МП з двома ГП і одноканального (автономного) ЕП подачі РО верстата без врахування ПР надані на рис. 1, де ОКШ1, ОКШ2, ОКШ, РП1, РП2, РП, і ε_1 , ε_2 , δ – оптимізовані контури швидкості, П-регулятори положення (П-РП) і помилки за положенням відповідних приводів; ДП1 і ДПРО – датчики положення вала двигуна Д1 і переміщення РО; $J_{\Sigma,1}$ і $\tilde{J}_{\Sigma,2}$ – сумарні моменти інерції ПМ, приведені до валів двигунів Д1 і Д2 за їх сумісної роботи в двоканальному ЕП: $J_{\Sigma,1,\text{max}} \approx 0,500457$ кг·м²; $\tilde{J}_{\Sigma,2}^+ \approx 0,07308$ кг·м²; $J'_{\Sigma,\text{авт}}$ – сумарний момент інерції ПМ, приведений до валу ВД одноканального ЕП, $J'_{\Sigma,\text{авт},\text{max}} \approx 0,34627$ кг·м².

У разі СПР-налаштування оператори оптимізованих контурів струму (ОКС) основного К-1 і уточнюючого К-2 каналів керування двоканального ЕП та одноканального (автономного) ЕП подачі

визначаються співвідношеннями

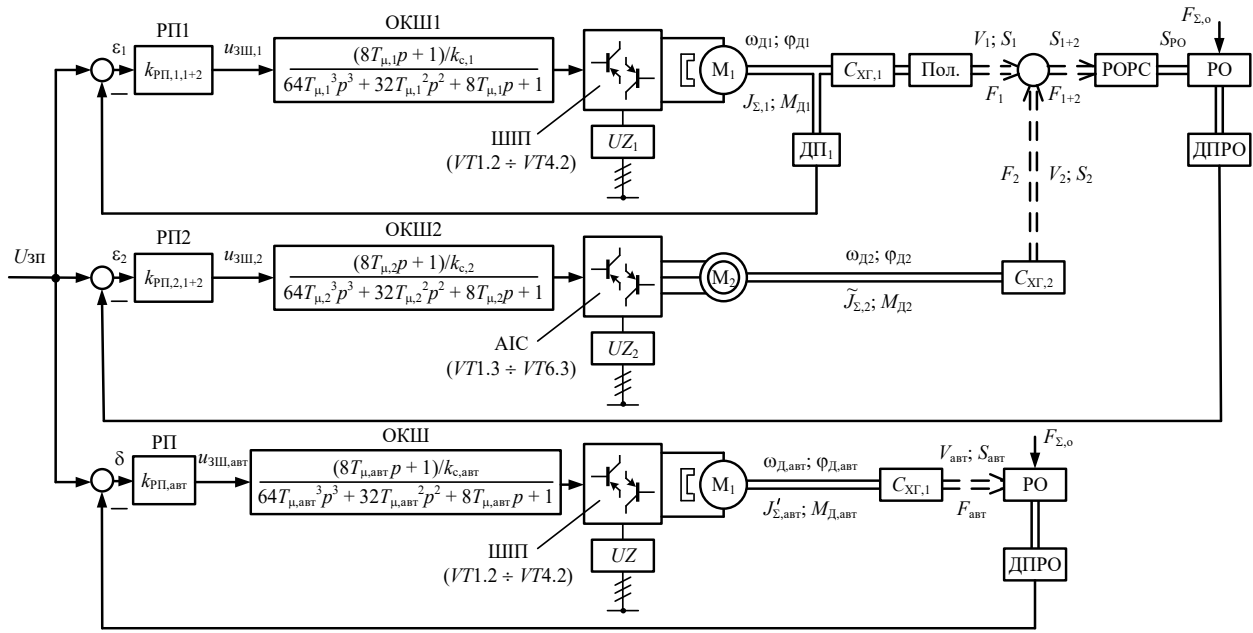


Рис. 1

$$W_{\text{ОКС},1}(p) \approx \frac{1/k_{c,1}}{2T_{\mu,1}p + 1}; \quad W_{\text{ОКС},2}(p) \approx \frac{1/k_{c,2}}{2T_{\mu,2}p + 1}; \quad W_{\text{ОКС},\text{авт}}(p) \approx \frac{1/k_{c,\text{авт}}}{2T_{\mu,\text{авт}}p + 1}, \quad (1)$$

де $p \equiv d/dt$ – оператор диференціювання за часом t ; $k_{c,1}$, $k_{c,2}$, $k_{c,\text{авт}}$ і $T_{\mu,1}$, $T_{\mu,2}$, $T_{\mu,\text{авт}}$ – коефіцієнти передачі й некомпенсуємі сталі часу контурів струму відповідних приводів [13]

$$\begin{aligned} k_{c,1} = k_{c,\text{авт}} = 0,02073 \text{ В/А}, & \quad k_{c,2} = 0,74087 \text{ В/А}; \\ T_{\mu,1} = T_{\mu,\text{авт}} = T_{\text{ШПП},1} = 8,3333 \cdot 10^{-5} \text{ с}, & \quad T_{\mu,2} = T_{\text{ШПП},2} = 3,125 \cdot 10^{-5} \text{ с}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для операторів за відповідним задавальним впливом $U_{\text{ЗП}}(t)$ оптимізованих контурів швидкості двоканального й одноканального ЕП (рис. 1) з урахуванням значень (2) отримаємо

$$W_{\text{ОКС},1}(p) = \frac{(6,6667 \cdot 10^{-4} p + 1)/k_{\text{ш},1}}{3,7037 \cdot 10^{-11} p^3 + 2,2222 \cdot 10^{-7} p^2 + 6,6667 \cdot 10^{-4} p + 1}; \quad (3)$$

$$W_{\text{ОКС},2}(p) = \frac{(2,5 \cdot 10^{-4} p + 1)/k_{\text{ш},2}}{1,9531 \cdot 10^{-12} p^3 + 3,125 \cdot 10^{-8} p^2 + 2,5 \cdot 10^{-4} p + 1}; \quad (4)$$

$$W_{\text{ОКС},\text{авт}}(p) = \frac{(6,6667 \cdot 10^{-4} p + 1)/k_{\text{ш},\text{авт}}}{3,7037 \cdot 10^{-11} p^3 + 2,2222 \cdot 10^{-7} p^2 + 6,6667 \cdot 10^{-4} p + 1}, \quad (5)$$

де $k_{\text{ш},1}$, $k_{\text{ш},2}$, $k_{\text{ш},\text{авт}}$ – коефіцієнти передачі контурів швидкості відповідних приводів [13]

$$k_{\text{ш},1} = k_{\text{ш},\text{авт}} = 0,59683 \text{ В·с/рад}; \quad k_{\text{ш},2} = 0,298418 \text{ В·с/рад}. \quad (6)$$

Тоді для двоканального ЕП і одноканального ЕП подачі згідно рис. 1 і співвідношень (3) ÷ (6) визначаємо оператори за завданням $U_{\text{ЗП}}(t)$ оптимізованих розімкнених контурів положення

$$R_{\text{П},1}^*(p) = \frac{k_{\text{РП},\text{пот},1} (8T_{\mu,1}p + 1)/k_{\text{ш},1}}{p(64T_{\mu,1}^3 p^3 + 32T_{\mu,1}^2 p^2 + 8T_{\mu,1}p + 1)} = \frac{k_{\text{РП},\text{пот},1} (6,6667 \cdot 10^{-4} p + 1)/0,59683}{p(3,7037 \cdot 10^{-11} p^3 + 2,2222 \cdot 10^{-7} p^2 + 6,6667 \cdot 10^{-4} p + 1)}; \quad (7)$$

$$R_{\text{П},2}^*(p) = \frac{k_{\text{РП},\text{пот},2} (8T_{\mu,2}p + 1)/k_{\text{ш},2}}{p(64T_{\mu,2}^3 p^3 + 32T_{\mu,2}^2 p^2 + 8T_{\mu,2}p + 1)} = \frac{k_{\text{РП},\text{пот},2} (2,5 \cdot 10^{-4} p + 1)/0,298418}{p(1,953125 \cdot 10^{-12} p^3 + 3,125 \cdot 10^{-8} p^2 + 2,5 \cdot 10^{-4} p + 1)}; \quad (8)$$

$$R_{П.авт}^*(p) = \frac{k_{РП.пот.авт} (8T_{\mu,авт} p + 1)/k_{ш,авт}}{p(64T_{\mu,авт}^3 p^3 + 32T_{\mu,авт}^2 p^2 + 8T_{\mu,авт} p + 1)} =$$

$$= \frac{k_{РП.пот.авт} (6,6667 \cdot 10^{-4} p + 1)/0,59683}{p(3,7037 \cdot 10^{-11} p^3 + 2,2222 \cdot 10^{-7} p^2 + 6,6667 \cdot 10^{-4} p + 1)},$$

де $k_{РП.пот.1}$, $k_{РП.пот.2}$, і $k_{РП.пот.авт}$ – потрібні (бажані) значення коефіцієнтів підсилення П-регуляторів контурів положення каналів керування двоканального ЕП і одноканального ЕП подачі.

2. Структурна схема підключення динамічної моделі УКПР. У роботі [13] показано, що оператор, який зв'язує миттєві значення заданої швидкості подачі РО $V_{PO}(t)$ і швидкості подачі РО $V_{PO}^*(t)$, яка враховує вплив УДМ ПР, визначається співвідношенням

$$W_{V_{PO}, V_{PO}^*}(p, \mu) = \frac{T_{p,h,0} T_2 p^3 + (T_2 + T_{p,h,0} T_1) p^2 + (T_{p,h,0} + T) p + 1}{T_{p,h,0} T_2 p^3 + (T_2 + T_{p,h,0} T_1) p^2 + (T_{p,h,0} + T) p + 1 + \mu K_{\delta V_{PO}, V_{PO}^*, 0}}, \quad (10)$$

де $K_{\delta V_{PO}, V_{PO}^*, 0}$ – безрозмірний розрахунковий коефіцієнт передачі УДМ ПР: $K_{\delta V_{PO}, V_{PO}^*, 0} = K \cdot t_{p,0} / c_0$; K – нормативна питома сила різання під час фрезерування (окружна сила різання F_z , віднесена до розрахункової площі f_0 шару, що зрізується одним зубом фрези): $K = 2549,729 \text{ Н} \cdot \text{зуб} / \text{мм}^2$; $t_{p,0}$ – задана (фіксована) величина глибини різання, мм; c_0 – розрахункове значення приведенного коефіцієнта жорсткості c системи МП-РО, яке визначається сумарною віською жорсткістю гвинтової передачі МП: $c_0 = c_{0,1+2} = 249,537 \cdot 10^3 \text{ Н/мм}$, $c_0 = c_{0,авт} = 413,8142 \cdot 10^3 \text{ Н/мм}$; μ – коефіцієнт тертя різання, який визначається в залежності від тангенціальної (окружної) швидкості обертання фрези (швидкості різання) V_p за характеристикою тертя різання $\mu = \mu(V_p)$; $T_{p,h,0}$ – стала часу аперіодичної ланки, яка відповідає оператору еталонної (розрахункової) сили подачі $F_{h,e}$: $T_{p,h,0} = 4,21343 \cdot 10^{-4} \text{ с}$; T_1 і T_2 – сталі часу коливальної ланки, що відповідає оператору механічної пружної системи верстата (ПСВ) «РО-різець»: $T_1 = T_{1,1+2} = 2,93697 \cdot 10^{-3} \text{ с}$; $T_1 = T_{1,авт} = 1,6316 \cdot 10^{-3} \text{ с}$; $T_2 = T_{2,1+2} \approx 3,807 \cdot 10^{-5} \text{ с}^2$; $T_2 = T_{2,авт} \approx 2,0541 \cdot 10^{-5} \text{ с}^2$.

За співвідношенням (10) отримуємо оператор $W_{УКПР}(p, \mu)$ динамічної моделі УКПР

$$W_{УКПР}(p, \mu) = W_{V_{PO}, V_{PO}^*}^{-1}(p, \mu) = \frac{K_{УКПР}(\mu) \left[\frac{T_{p,h,0} T_2}{K_{УКПР}(\mu)} p^3 + \frac{T_2 + T_{p,h,0} T_1}{K_{УКПР}(\mu)} p^2 + \frac{T_{p,h,0} + T_1}{K_{УКПР}(\mu)} p + 1 \right]}{T_{p,h,0} T_2 p^3 + (T_2 + T_{p,h,0} T_1) p^2 + (T_{p,h,0} + T) p + 1}, \quad (11)$$

де $K_{УКПР}(\mu)$ – безрозмірний коефіцієнт передачі динамічної моделі УКПР

$$K_{УКПР}(\mu) = 1 + \mu \cdot K_{\delta V_{PO}, V_{PO}^*, 0}. \quad (12)$$

В роботі на основі формул (11) і (12) виконаний розрахунок параметрів моделі УКПР для двоканального і порівнюваного одноканального ЕП подачі для прикладу відпрацьовування приводами заданого переміщення РО $S_{зад} = 1 \text{ мм}$ за заданої глибини різання $t_p = t_{p,0} = 0,2 \text{ мм}$, $\mu = \mu_0 = 0,316$ і розрахованих параметрах УДМ ПР. В результаті для УКПР двоканального ЕП подачі

$$W_{УКПР,1+2}(p, \mu) = W_{V_{PO}, V_{PO}^*}^{-1}(p, \mu) =$$

$$= \frac{K_{УКПР,1+2}(\mu_0) \left[\frac{1,604041 \cdot 10^{-8}}{K_{УКПР,1+2}(\mu_0)} p^3 + \frac{3,930746 \cdot 10^{-5}}{K_{УКПР,1+2}(\mu_0)} p^2 + \frac{3,35831 \cdot 10^{-3}}{K_{УКПР,1+2}(\mu_0)} p + 1 \right]}{1,604041 \cdot 10^{-8} p^3 + 3,930746 \cdot 10^{-5} p^2 + 3,35831 \cdot 10^{-3} p + 1},$$

де

$$K_{УКПР,1+2}(\mu_0) = 1 + 0,316 \cdot 2,043568 \cdot 10^{-3} = 1,000645767. \quad (14)$$

Для УКПР одноканального (автономного) ЕП подачі отримуємо

$$W_{\text{УКПР,авт}}(p, \mu) = \frac{1,00038941(8,651376 \cdot 10^{-9} p^3 + 2,12202 \cdot 10^{-5} p^2 + 2,05214 \cdot 10^{-3} p + 1)}{8,65474 \cdot 10^{-9} p^3 + 2,12285 \cdot 10^{-5} p^2 + 2,05294 \cdot 10^{-3} p + 1}, \quad (15)$$

$$K_{\text{УКПР,1+2}}(\mu_0) = 1 + 0,316 \cdot 2,043568 \cdot 10^{-3} = 1,000645767. \quad (16)$$

Структурну схему, яка ілюструє узгоджене функціонування УДМ ПР (10) і моделі УКПР (11), (12) в контурі положення двоканального ЕП подачі верстата, наведено на рис. 2, де $V_{\text{РО,різ}}$ – швидкість подачі РО в процесі металообробки з урахуванням компенсації впливу УДМ ПР, м/с.

3. Результати досліджень. На підставі формул (1)÷(16), розроблені структурно-алгоритмічні схеми, за якими побудовано відповідні імітаційні комп'ютерні моделі порівнюваних двоканального та одноканального ЕП. Комп'ютерне моделювання електродинамічних характеристик систем виконано за оптимального налаштування коефіцієнтів підсилення $k_{\text{РП,пот,1}}^*$, $k_{\text{РП,пот,2}}^*$ і $k_{\text{РП,пот,авт}}^*$ П-регуляторів контурів положення для різних типових завдань на подачу РО в режимі торцевого симетричного фрезерування. Враховувалися: вплив УДМ ПР та динамічної моделі УКПР, обмеження на швидкість робочої подачі РО та на перевантаження за струмом в ВД ЕП усіх каналів керування, нелінійності тертя в МП верстата та в системі «РО-різець», а також компенсація динамічного взаємовпливу каналів (ДВВК) за навантаженням у двоканальному ЕП з двома ГП.

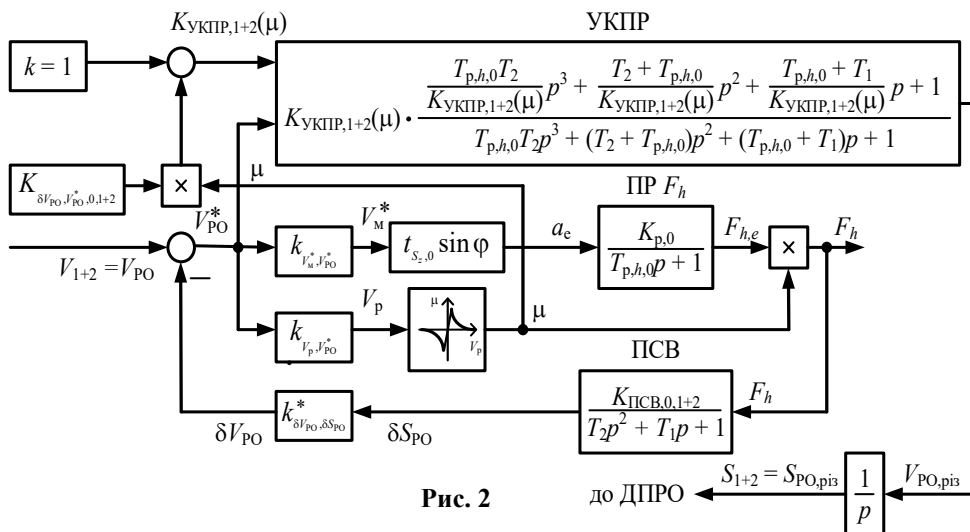


Рис. 2

до ДПРО

Розрахунки електродинамічних характеристик виконані з урахуванням технічних вимог до верстата і наведені у вигляді діаграм на рис. 3 ÷ 7, а результати порівняльної оцінки характеристик – у табл. 1 і 2. На рисунках позначено: цифрами «1» і «2» – графіки часових та частотних характеристик приводів основного К-1 та уточнюючого К-2 каналів, що працюють в ітераційному режимі;

цифрами «1+2» та «1авт» – аналогічні графіки двоканального ЕП та одноканального (автономного) ЕП подачі. Під час відпрацювання стрибкоподібних сигналів не допускалося перерегулювання за положенням і перевищення максимально допустимої швидкості V_x хвилинної подачі РО. Також враховувалося максимальне статичне навантаження, яке визначається приведеною масою системи МП-РО: $m_{\text{макс,1+2}} = m_{\text{вир,макс}} = m_{\text{ст}} + m_{\text{пол}} = 6000 + 3000 + 500 = 9500$ кг; $m_{\text{макс,авт}} = m_{\text{вир,макс}} = m_{\text{ст}} = 9000$ кг.

Комп'ютерні дослідження виявили переваги двоканального ЕП як у підвищенні точності відтворення заданих законів керування подачею РО, так і в порівняльному підвищенні швидкодії відпрацювання стрибкоподібних завдань в усьому діапазоні подачі верстата: $0 < S_{\text{РО}} \leq 2000$ мм. Особливо ефектно переваги виявляються в зоні малих та середніх переміщень $0 < S_{\text{РО}} < 1$ мм, де й досягається реалізація особливо високої точності керування та позиціонування РО.

Перехідні процеси. Задля досягнення найбільш ефективного відпрацювання двоканальним ЕП стрибкоподібних впливів $U_{\text{ЗП}}(t) = U_{\text{ЗП}} = \text{const}$ налаштування моделі приводу у певних зонах переміщень РО здійснювалося із застосуванням різних режимів взаємодії автономних каналів керування. Встановлено, що за налаштування динаміки ЕП у зоні малих переміщень (МП) ($0 < S_{\text{РО}} < 0,006$ мм) основний канал К-1 доцільно взагалі відключати. У зоні середніх переміщень (СП) ($0,006$ мм $\leq S_{\text{РО}} < 1$ мм) канали К-1 та К-2 повинні функціонувати паралельно (одночасно) в ітераційному режимі, а в зоні великих переміщень (ВП) РО (1 мм $\leq S_{\text{РО}} \leq 2000$ мм) має бути реалізований послідовно-паралельний режим взаємодії каналів, коли другий, уточнюючий канал К-2 підключається до роботи двоканального приводу за

заданим рівнем помилки ε_1 відпрацювання завдання $U_{ЗП}$ основним каналом К-1 (рис. 1). Для зони ВП встановлено, що в залежності від величини завдання $U_{ЗП}$ рівень помилки ε_1 , що задається, знаходиться в межах: $\varepsilon_1 = 0,05 \div 0,5$ мм.

На рис. 3 показано графіки перехідних процесів (ПП) положення РО в двоканальному ЕП і порівнюваному одноканальному ЕП МП верстата за відпрацювання приводами стрибкоподібних впливів

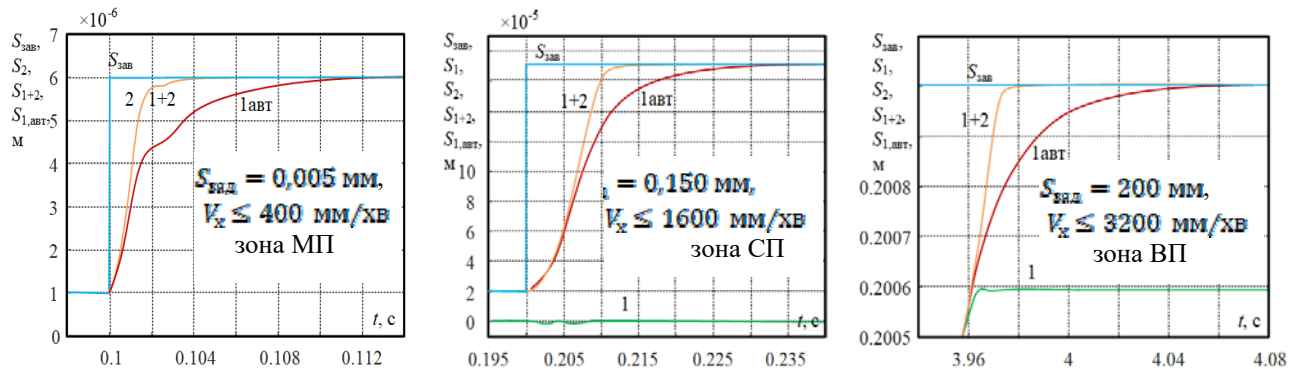


Рис. 3

$U_{ЗП}$, відповідних заданій подачі РО (з підлеглою обмеженою швидкістю V_x) в зонах малих, середніх і великих переміщень верстата. Моделювання ЕП виконано за компенсації в приводах впливу УДМ ПР підключенням моделі УКПР в контур керування. У табл. 1 для різних завдань $S_{зад}$ на величину фіксованої подачі наведено порівняльні показники якості ПП за положенням РО. З аналізу ПП (рис. 3 та табл. 1) випливає, що у двоканальному ЕП суттєво зменшується час регулювання у разі відпрацювання (без перерегулювання) невеликих переміщень: в зоні МП – в $2,5 \div 4,0$ рази; в зоні СП – в $1,65 \div 2,5$ рази; на першій ділянці зони ВП ($1 \text{ мм} \leq S_{РО} \leq 20 \text{ мм}$) – в $1,1 \div 1,63$ рази. На другій ділянці зони ВП ($20 \text{ мм} < S_{РО} \leq 2000 \text{ мм}$) досягається невеликий вииграш у швидкодії подачі РО (рис. 3 і табл. 1).

Таблиця 1

Варіант ЕП	Зона переміщення і задана величина подачі РО	Величина подачі S_z , мм/зуб	Показники якості ПП в режимі металообробки (подача з підпорядкованою обмеженою швидкістю)	
			час регулювання за рівнем 0,01% від $U_{ЗП}$, $t_{рег.авт}$ і $t_{рег.1+2}$, с	зменшення часу регулювання в двоканальному ЕП, раз
Одноканальний ЕП	$S_M(0,05 \text{ мкм})$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	0,01615	-
	$S_M(0,005 \text{ мм})$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	0,0168	-
	$S_C(0,15 \text{ мм})$	0,1	0,0494	-
	$S_B(1 \text{ мм})$	0,1667	0,091	-
	$S_B(1000 \text{ мм})^{1)}$	$n_{\phi}=300 \text{ об/хв}$ $n_{\phi}=50 \text{ об/хв}$	1,333 8,0	19,3715 19,372
Двоканальний ЕП	$S_M(0,05 \text{ мкм})$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	0,0045	3,589
	$S_M(0,005 \text{ мм})$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	0,00673	2,496
	$S_C(0,15 \text{ мм})$	0,1	0,0291	1,698
	$S_B(1 \text{ мм})$	0,1667	0,056	1,625
	$S_B(1000 \text{ мм})^{1)}$	$n_{\phi}=300 \text{ об/хв}$	1,3333	19,2812
		$n_{\phi}=50 \text{ об/хв}$	8,0	19,2845

¹⁾ Час регулювання вимірювався за рівнем $S_{зад} = 0,005 \text{ мм}$.

Частотні характеристики. Порівняльне підвищення швидкодії двоканального ЕП обумовлено значним розширенням його смуги пропускання. На рис. 4 надані логарифмічні амплітудно-частотні характеристики (середньочастотні ділянки) порівнюваних ЕП МП верстата при відпрацюванні синусоїдальних подач РО з різною заданою амплітудою $S_{зад}$ переміщень: $S_{зад} = 0,05 \text{ мкм}$; $0,15 \text{ мм}$; 1 мм ; 200 мм .

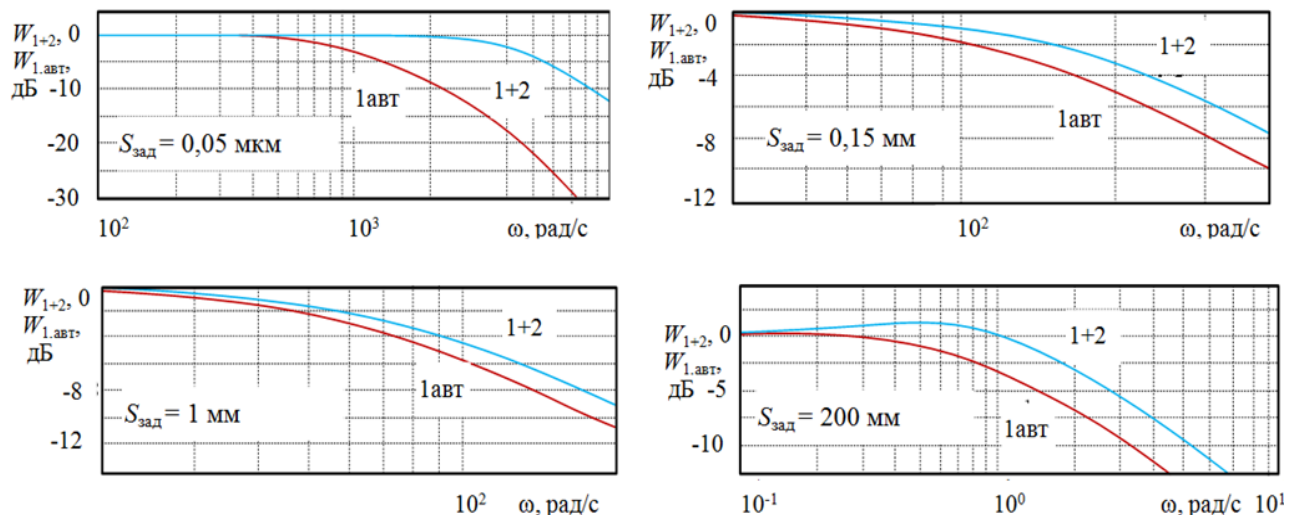


Рис. 4

Двоканальний ЕП забезпечує розширення смуги пропускання: на ділянці зони МП до 0,05 мкм ($0 < S_{PO} < 0,05$ мкм) – більш ніж в 4,1 рази; на другий ділянці зони МП і в зоні СП ($0,05$ мкм $< S_{PO} \leq 0,95$ мм) – в $1,35 \div 4,0$ рази; на ділянці зони ВП до 200 мм (1 мм $\leq S_{PO} \leq 200$ мм) – в $1,26 \div 2,1$ рази. На ділянці зони ВП (200 мм $< S_{PO} \leq 2000$ мм) показник розширення смуги знижується (залишаючися більшим одиниці), що з урахуванням обмежень на припустимий струм асинхронного ЕП обумовлено необхідністю зменшення коефіцієнта підсилення уточнюючого каналу К-2.

Компенсація впливу процесу різання. Графіки на рис. 5 і 6 відображають можливі робочі процеси в досліджуваному ЕП подачі під час відпрацювання стрибкоподібних завдань $U_{ЗП}$ в різних зонах переміщень РО: в зоні МП ($S_{зад} = 0,005$ мм, рис. 5 і 6) і в зоні ВП ($S_{зад} = 200$ мм, рис. 5) без компенсації (а) та з компенсацією (б) впливу УДМ ПР. На рис. 5 надано фрагменти графіків ПП положення РО в порівнюваних ЕП подачі, а на рис. 6 – фрагменти графіків ПП, які характеризують динаміку зміни окружної сили різання F_z та сили подачі F_h , що формуються при подачі РО у процесі металообробки. З аналізу ПП під час відключеного УКПР (рис. 5, а і 6, а) випливає, що не вклю-

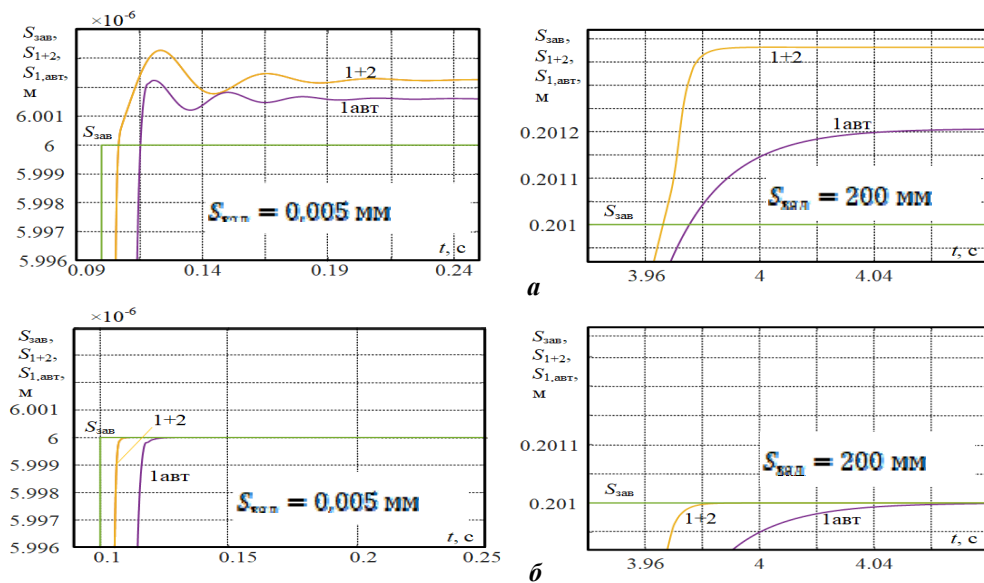
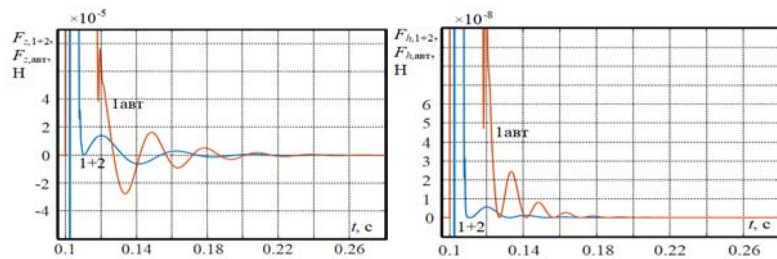


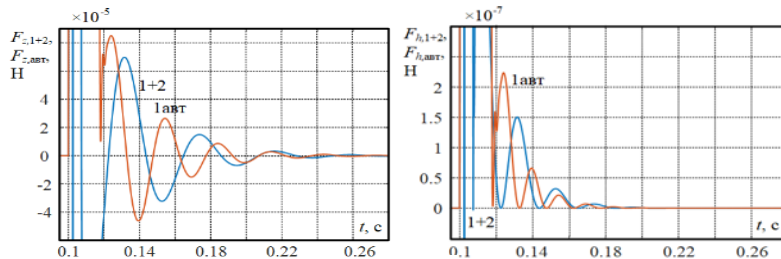
Рис. 5

чення в контур регулювання ЕП подачі верстата моделі УДМ ПР може призвести до появи в реальному приводі неврахованих помилок положення РО, обумовлених фактичним впливом механічної ПСВ.

У роботі залежно від заданої величини подачі РО виконано комп'ютерну оцінку максимально можливих сталих статичних помилок за положенням у порівнюваних ЕП. При цьому в налаштуваннях ЕП зберігалися всі необхідні технологічні параметри подачі в режимі ПР, але компенсатори впливу УДМ ПР були відключені. Встановлено, що величина статичної помилки суттєво зростає із зростанням величини $S_{зад}$ подачі. Так, наприклад, за $S_{зад} = 1000$ мм статичні помилки положення у двоканальному та одноканальному ЕП можуть досягати: $\epsilon_{ст,1+2} = 5$ мм (0,5 %) і $\epsilon_{ст,авт} = 2,7$ мм (0,27 %) (за $n_{ф} = 300$ об/хв), і



а



б

Рис. 6

коливання сил різання F_z та подачі F_h , зумовлені коливаннями ПСВ «РО-різець» (рис. 6, б).

Відпрацювання синусоїдальних впливів. У стежачих ЕП з П-РП статичні помилки за впливом $U_{3П} = \text{const}$ відсутні. Тому точності можливості порівнюваних ЕП зручно оцінювати за якістю відтворення впливів, що змінюються. Найбільш важко відтворюваними вважаються гармонічні задавальні сигнали. На рис. 7 наведено порівняльні графіки (в усталених режимах) відтворення двоканальним і одноканальним ЕП МП верстата (з підключенням УКПР) синусоїдальних сигналів амплітуди $S_{\text{зад}}$ і різної частоти f : $S_{\text{зад}} = 0,05$ мкм (а) і $S_{\text{зад}} = 20$ мм (б); значення f вказані на рисунку. Порівняльні показники якості відпрацювання ЕП синусоїдальних впливів подані у табл. 2.

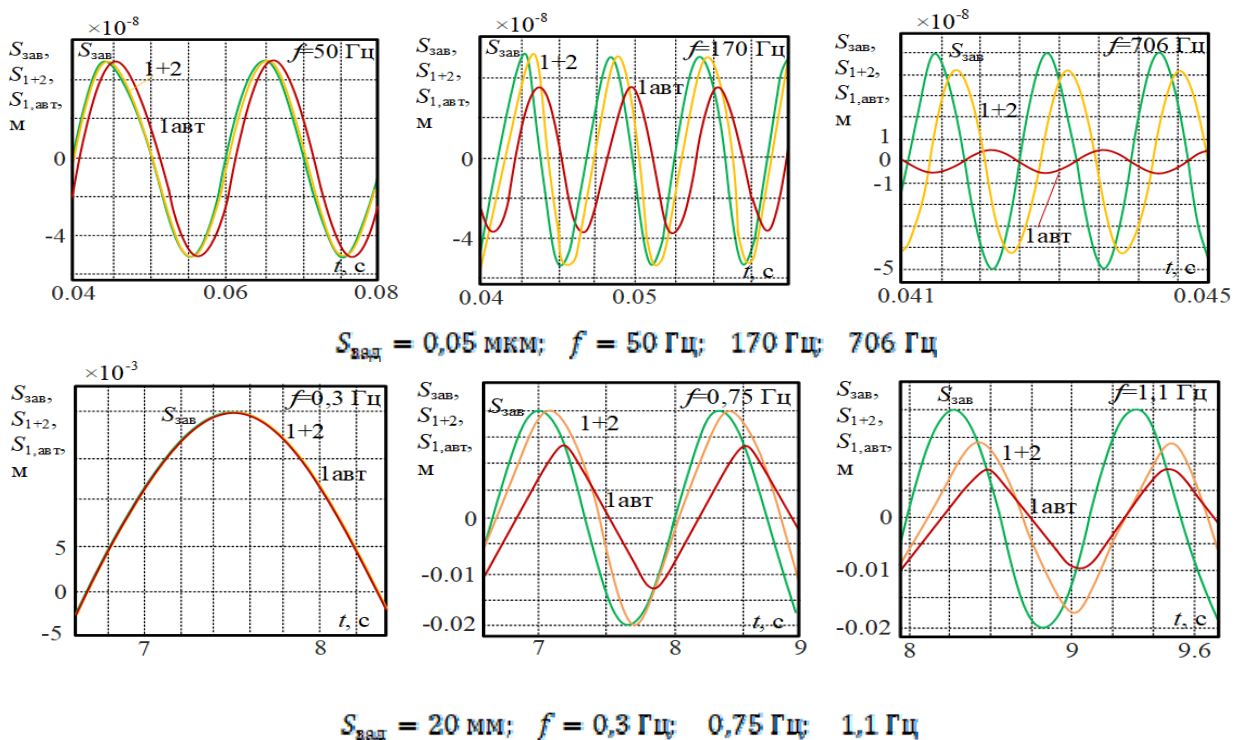


Рис. 7

$\varepsilon_{\text{ст},1+2} = 12,8$ мм (1,3 %) і $\varepsilon_{\text{ст},\text{авт}} = 6,9$ мм (0,7 %) (за $n_{\phi} = 50$ об/хв). Результати доводять необхідність врахування та компенсації в системі керування ЕП МП верстата помилок, зумовлених податливістю механічної системи МП-РО та пружністю системи «РО-різець» у процесі металообробки.

Результати моделювання ПП з підключенням УКПР (рис. 5, б і 6, б) показали, що точність подачі РО принципово можна підвищити шляхом побудови електронної моделі самого ПР та включення цієї моделі до контуру керування ЕП подачі (рис. 2). В цьому випадку типова система керування ЕП забезпечить компенсацію статичної податливості механічної системи МП-РО, але не усуне (без застосування додаткових компенсуювальних зв'язків) негативні

Таблиця 2

Варіант ЕП	Зона переміщень і величина подачі РО	Показники якості відтворення керуючого впливу								
		$U_{зп}(t) = U_{зп, max} \sin 2\pi f t \quad (f=var)$			зменшення запізнювання за фазою у порівнянні з одноканальним ЕП, раз			послаблення амплітудного значення $S_{зд}$ сигналу завдання, %		
Одноканальний ЕП	S_M (0,05 мкм)	50 Гц	170 Гц	706 Гц				50 Гц	170 Гц	706 Гц
		0,41	1,40	3,04				0,84	29,3	89,4
	S_M (0,005 мм)	15 Гц	65 Гц	151 Гц				15 Гц	65 Гц	151 Гц
		0,25	0,82	1,21				2,7	31	56,5
	S_C (0,15 мм)	5 Гц	20 Гц	28 Гц				5 Гц	20 Гц	28 Гц
		0,13	0,79	0,95				0,78	29,4	41,8
Двоканальний ЕП	S_B (1 мм)	3 Гц	9 Гц	12 Гц				3 Гц	9 Гц	12 Гц
		0,11	0,83	1,03				0,6	31,8	47,3
	S_B (200 мм)	0,065 Гц	0,082 Гц	0,1 Гц				0,065 Гц	0,082 Гц	0,1 Гц
		0,55	0,83	0,97				12,4	30,5	41,8
	S_M (0,05 мкм)	50 Гц	170 Гц	706 Гц	50 Гц	170 Гц	706 Гц	50 Гц	170 Гц	706 Гц
		0,085	0,37	1,21	4,8	3,83	2,52	-	-	15,6
Двоканальний ЕП	S_M (0,005 мм)	15 Гц	65 Гц	151 Гц	15 Гц	65 Гц	151 Гц	15 Гц	65 Гц	151 Гц
		0,11	0,43	0,82	2,29	1,88	1,49	0,46	9,3	31,1
	S_C (0,15 мм)	5 Гц	20 Гц	28 Гц	5 Гц	20 Гц	28 Гц	5 Гц	20 Гц	28 Гц
		0,06	0,35	0,51	2,32	2,25	1,85	-	13,8	27,1
	S_B (1 мм)	3 Гц	9 Гц	12 Гц	3 Гц	9 Гц	12 Гц	3 Гц	9 Гц	12 Гц
		0,055	0,47	0,56	2,04	1,77	1,84	-	12,1	21,5
Двоканальний ЕП	S_B (200 мм)	0,065 Гц	0,082 Гц	0,1 Гц	0,065 Гц	0,082 Гц	0,1 Гц	0,065 Гц	0,082 Гц	0,1 Гц
		0,35	0,54	0,82	1,54	1,53	1,18	-	14,8	30,7

Особливості налаштування та практичної реалізації двоканального ЕП. Встановлено, що динамічний взаємовплив каналів за навантаженням, характерний для ітераційних багатоканальних стежачих приводів, у двоканальному ЕП з двома ГП загалом несуттєво впливає на якість роботи контуру положення. Разом з тим задля компенсації ДВБК за навантаженням у модель двоканальної системи управління введені відповідні внутрішні компенсуючі перехресні зв'язки (КПЗ) між каналами К-1 та К-2 – компенсатори C_{12} та C_{21} [13], що дало можливість в середньому на 5÷15% зменшити (порівняно з відсутністю КПЗ) час регулювання ПП за положенням у двоканальному ЕП у зоні малих та середніх переміщень РО ($0 < S_{PO} < 1$ мкм). У зоні ВП ($1 \text{ мм} \leq S_{PO} \leq 2000 \text{ мм}$) підключення блоку КПЗ практично не впливає на якість ПП.

Досягнення в пропонованому двоканальному ЕП високої точності керування подачею істотно залежить від динамічних властивостей сервопривода змінного струму типу ПЧ-АД другого, уточнюючого каналу К-2 і, перш за все, від ширини смуги відтворюваних частот ЕП та від перевантажувальної здатності за моментом ВД Д2.

Відзначимо, що якість керування обмежується точностними можливостями виготовлення механіки дводвигунного МП та ступенем адекватності врахування впливу реальної динаміки ПР. Реалізація двоканального ЕП МП з двома ГП потребує наявності: у системі керування двох (замість одного) повноцінних стежачих ЕП у системі керування; спеціально розробленого МП з двома безлюфтовими ГП, що включає додаткові полужки для розміщення другої ГП; високоточного (з роздільною здатністю не нижче сотих часток мікрона) датчика ДПРО положення РО (наприклад, лінійного датчика фірми *Heidenhain* з дискретністю 10 нм). Крім того, повинні бути передбачені заходи, що унеможливають виникнення зривних автоколивань у режимі гранично повільних робочих переміщень РО.

Висновки. 1. Для пропонованого ітераційного двоканального ЕП МП з двома ГП і порівнюваного одноканального ЕП подачі з СПР-налаштуванням каналів визначено оператори за задавальним впливом $U_{зп}(t)$ оптимізованих контурів положення і розраховано параметри компенсаторів УКПР стосовно поздовжньої подачі РО прецизійного металорізального верстата моделі 24К70АФ4. Наведено структуру, яка ілюструє узгоджене функціонування моделі УДМ ПР та динамічної моделі відповідного компенсатора УКПР у контурі положення двоканального ЕП. Побудовані імітаційні комп'ютерні моделі порівнюваних ЕП, які включають УДМ ПР та компенсатори УКПР і враховують вплив нелінійних сил тертя у навантаженні. Це дало змогу виконати розрахунок та аналіз показників якості функціонування ЕП.

2. Результати моделювання ПП із підключенням УКПР вперше довели, що точність подачі РО

у робочих режимах (в одно- і двоканальному ЕП) принципово можна підвищити шляхом побудови електронної УДМ ПР та включення цієї моделі до контура керування ЕП. При цьому типова система управління ЕП здатна забезпечити компенсацію статичної податливості механічної системи МП-РО.

3. Доведено можливість значного порівняльного підвищення ефективності електромеханічного перетворення енергії в ЕП подачі верстата за рахунок застосування пропонованого ітераційного двоканального ЕП з УКПР замість традиційного одноканального ЕП. Показниками цієї можливості є:

- значні потенційні переваги в швидкодії відпрацювання ступінчастих задавальних впливів, які особливо помітні у зоні найбільш відповідальних: малих, середніх і, частково, великих переміщень РО ($0 < S_{PO} < 20$ мм), де швидкодія двоканального ЕП може бути підвищена більш ніж у $1,1 \div 4,0$ рази в залежності від величини завдання $S_{зад}$ на подачу. Крім того, двоканальний ЕП з двома ГП на відміну від двоканального ЕП з МД забезпечує порівняльне зменшення часу регулювання ПП в усьому діапазоні подачі верстата (табл. 1);

- суттєве підвищення динамічної точності подачі РО в усталених режимах, у тому числі, точності відпрацювання найбільш відповідальних височастотних синусоїдальних впливів невеликої амплітуди (до $S_{зад} = 20$ мм). У таких режимах двоканальний ЕП забезпечує наступні показники зменшення запізнення за фазою керуючого сигналу: у зоні МП (до $S_{зад} = 0,05$ мкм) за робочої частоти синусоїди $f = 50 \div 706$ Гц в $4,8 \div 2,52$ рази; у зоні СП ($S_{зад} = 0,15$ мм) за частоти $f = 5 \div 28$ Гц – у $2,32 \div 1,85$ рази; у зоні ВП ($S_{зад} = 1$ мм) за частоти $f = 3 \div 12$ Гц – у $2,04 \div 1,83$ рази, та у зоні ВП ($S_{зад} = 20$ мм) за частоти $f = 0,3 \div 1,1$ Гц – у $2,4 \div 1,53$ рази. При цьому в двоканальному ЕП спостерігається незначне (порівняно з одноканальним ЕП) послаблення керуючої синусоїди (табл. 2);

- значне розширення смуги пропускання двоканального ЕП: в зоні МП до $0,05$ мкм ($0 < S_{PO} \leq 0,05$ мкм) – більш ніж у $4,1$ рази; на другій ділянці зони МП та в зоні СП ($0,05$ мкм $< S_{PO} \leq 0,95$ мм) – у $1,35 \div 4,0$ рази; в зоні ВП до 200 мм (1 мм $\leq S_{PO} \leq 200$ мм) – у $1,26 \div 2,1$ рази. На ділянці зони ВП РО (200 мм $< S_{PO} \leq 2000$ мм) показник розширення смуги зменшується, але залишається більшим 1.

4. Підтверджено, що ДВБК за навантаженням загалом незначно впливає на якість роботи контура положення двоканального ЕП МП. Разом з тим, підключення блоку внутрішніх КПЗ, які компенсують ДВБК, зменшує (порівняно з його відсутністю) в середньому на $5 \div 15\%$ час регулювання ПП за положенням у двоканальному ЕП у зоні малих та середніх переміщень РО ($0 < S_{PO} < 1$ мм). У зоні ВП (1 мм $\leq S_{PO} \leq 200$ мм) підключення блоку КПЗ практично не впливає на якість ПП.

5. Застосування ітераційних двоканальних безредукторних ЕП подачі з двома ГП і компенсатором УКПР доцільно у випадках, коли від традиційних одноканальних ЕП подачі вимагаються дуже високі швидкодії і точність відпрацювання невеликих завдань (переміщень) у разі значних інерційних навантажень на виході привода. Такі вимоги відповідають зростаючим вимогам до якості роботи ЕП подачі РО сучасних важких прецизійних металорізальних верстатів і ОЦ.

ELECTRODYNAMICS OF A HIGH-PRECISION ITERATIVE TWO-CHANNEL ELECTRIC FEED DRIVE WITH A CONDITIONAL CUTTING PROCESS COMPENSATOR

O.A. Khudyaev, V.M. Shamardina, D.O. Pshenychnykov, I.V. Obruch
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
Kirpichova str., 2, Kharkiv, 61002, Ukraine.
E-mail: Vira.Shamardina@khpi.edu.ua.

Using the example of modeling the longitudinal feed of the working body (WB) of a precision metal-cutting machine tool model 24K70AF4 during the cutting process (PC), the possibility of a significant comparative increase in the efficiency of electromechanical energy conversion in the electric drive (ED) of the machine tool feed is proven by using the proposed iterative two-channel ED with a conditional PC compensator (PCCC) instead of the traditional single-channel ED. This allows you to significantly improve the quality of WB feed control and, as a result, significantly increase the potential competitiveness of the output of heavy metal-cutting machine. Detailed simulation computer models of the compared two-channel and single-channel EDs have been constructed, which contain the corresponding dynamic models of the PC and the PCCC compensators and take into account the influence of nonlinear friction forces in the load on the dynamics of the drives. Indicative comparative electrodynamic characteristics of the systems were obtained. Significant (multiple times) potential advantages in the speed and accuracy of feed control of a dual-channel ED have been established. The modeling results showed for the first time that the accuracy of the feed of the WB in the metal-

working mode can be significantly increased not only due to the iterative structure of the two-channel control system of the ED, but also additionally by building an electronic model of the PC itself and including this model together with the PCCC in the control loop of the feed ED. References 13, Tables 2, Figures 7.

Keywords: iterative two-channel electric feed drive, conditional cutting process compensator, computer modeling, electrodynamic characteristics, speed, dynamic accuracy.

1. Yamazaki Takanori. Experimental Study on Dynamic Behavior of High Precision Servo Motor for Machine Tools. *Applied Mechanics and Materials*. 2017. Vol. 863. Pp. 224–228. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.863.224>.
2. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Kolomiets V.V., Bovdii I.V. Improving of Electromechanical Servo Systems Accuracy. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2018. No 6. Pp. 33–37. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.6.04>.
3. Uzunoglu E., Tatlicioğlu E., Dede M. A Multi-Priority Controller for Industrial Macro-Micro Manipulation. *Robotica*. 2021. Vol. 39(2). Pp. 217–232. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0263574720000338>.
4. Zhao W., Qu J., Li J., Sue N., Shi G., Liu J. Research on quality analysis of solid-liquid two-phase abrasive flow precision machining based on different sub-grid scale models. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2022. No 119. Pp. 1693–1706. DOI: <https://doi.org/10.1007/S00170-021-07604-3>
5. Kuznetsov B.I., Novoselov B.V., Bogaenko I.N., Ryumshin N.A. *Projection of optimal control multichannel systems*. Kyiv: Tekhnika, 1993. (Rus).
6. Sharon A., Hardt D. Enhancement of Robot Accuracy Using Endpoint Feedback and a Macro-Micro Manipulator System. *Proceedings of 1984 American Control Conference*, San Diego, USA. June 1984. Pp. 1836–1842.
7. Sharon A., Hogan N., Hardt D.E. High bandwidth force regulation and inertia reduction using a macro/micro manipulator system. In *Proceedings of the International Conference on Robotics & Automation*, Philadelphia, PA, USA. April 1988. Pp. 24–29.
8. Hemi Jae Park, Dong Sung Lee, Jong Ho Park. Ultra-precision positioning system for servo motor–piezo actuator using the dual servo loop and digital filter implementation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2001. Vol. 41. Issue 1. Pp. 51–63. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(00\)00061-4](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00061-4).
9. Duane M., Lu H., Xin B., Li Z., Zhang Y., Liu Q. Multivariate orthogonal polynomial-based positioning error modeling and active compensation of dual-driven feed system. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* July 2019. No 104(5). Pp. 2593–2605. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04040-2>.
10. Yang M., Li L., Zhang C., Huang Y., Wu H., Feng, B. Research on Continuous Error Compensation of a Sub-Arc-Second Macro/Micro Dual-Drive Rotary System. *Micromachines*. 2022. No 13. Pp. 16–62. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi13101662>
11. Khudiayev O., Shamardina V. and Pshenychnykov D. Refined model of two-channel feed electric drive with the summation of movements on the sliding nut for high-precision metal-cutting machines. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*. 2024. Vyp. 68. Pp. 43–50. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.68.043>. (Ukr)
12. Khudiayev O.A., Pshenychnykov D.O., Klepikov V.B., Vorobiov B.V. Electrodynamics of high-precision iterative feed electric drive of machining center with inertial load. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2023. No 3. Pp. 50–5910. DOI: <https://doi.org/10.15407/technd2023.03.050>.
13. Khudiayev O.A., Pshenychnykov D.O., Klepikov V.B., Obruch I.V. Dynamic model of an iterative electric feed drive with two screw gears for precision machine tools and machining centers. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. No 3. Pp. 61–72. DOI: <https://doi.org/10.15407/technd2024.03.061>. (Ukr)

Надійшла 18.08.2025

Прийнята 25.01.2026