**УДК 62-83:621.314.632:621.879**

**В.Б. Цяпа**
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ЕАП

# КОМБІНОВАНА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ОБМЕЖЕННЯМ ПРИСКОРЕННЯ

*Ó Цяпа В.Б., 2012*

**Наведена система електроприводу з дворазово інтегрувальним контуром струму з підсистемами регулювання швидкості і прискорення.**

***Ключові слова: прискорення, інтегрування, контур струму, збурення, технічний оптимум.***

**Present system of electric double integrating circuit current of the subsystems of speed control and acceleration.**

***Key words: acceleration of the integration circuit current perturbation technical optimum.***

## Постановка проблеми

Для забезпечення продуктивної і надійної роботи на весь період проектної експлуатації механізмів з повторно короткочасним режимом роботи, електроприводи, формуючи пуско-гальмівні режими, повинні працювати в граничних режимах, підтримуючи або момент двигуна на максимально допустимому рівні ($M=M_{max.доп}$), або на допустимому значенні прискорення ($\varepsilon=\varepsilon_{доп}$). Вибір режиму роботи приводу з максимальним моментом чи максимальним прискоренням залежить від факторів збурення, які діють на механізм. Такими основними факторами є момент навантаження $M_c$, та момент інерції $J_{мех}$. Дія факторів збурення може сприяти рухові механізму або протидіяти. Тому в режимах збільшення навантаження $M_c$, а також при протидії моменту інерції рухові привід повинен підтримувати момент двигуна на допустимому рівні $M_{max.доп.}$

У режимах, коли ці фактори збурення сприяють рухові і є загроза збільшення прискорення вище допустимого значення ($\varepsilon>\varepsilon_{доп}$), система керування повинна обмежувати прискорення ($\varepsilon\le\varepsilon_{доп}$). Перебільшення моменту і прискорення над допустимими значеннями сприяє зростанню динамічних зусиль в механічних передачах, що приводить до зменшення терміну роботи або до їх руйнування в гіршому випадку, а також до теплового перевантаження електричних машин.

Якщо в пуско-гальмівних режимах система електроприводу нездатна утримувати роботу механізму в граничних режимах, підтримуючи момент і прискорення на граничнодопустимому рівні, то це приводить до зниження його продуктивності.

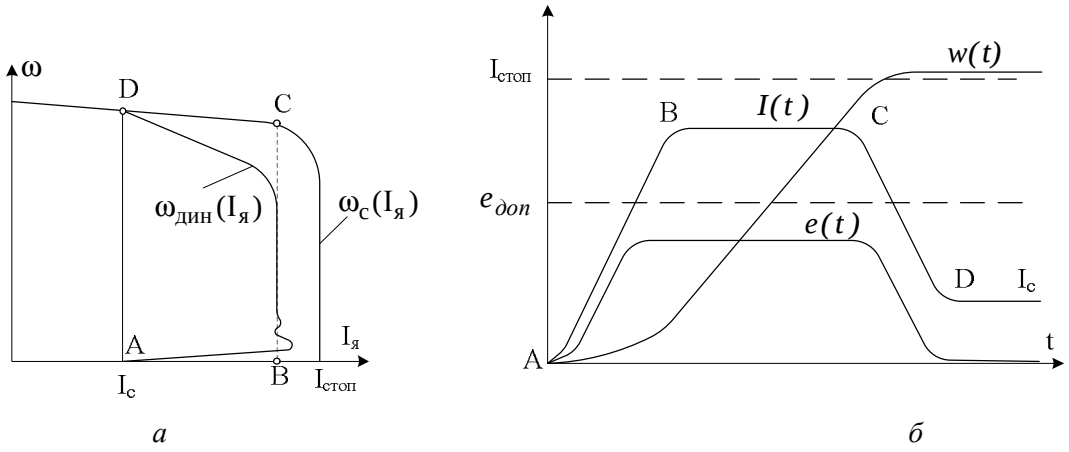
## Аналіз останніх досліджень

У більшості сучасних систем керування електроприводами виконання цих вимог покладено на контур струму (моменту) двигуна. Цей контур має багатофункціональне призначення. Він не тільки формує пуско-гальмівні режими, а також обмежує струм (момент) механічної характеристики в статиці, забезпечуючи її стабільність незалежно від зміни параметрів силової частини електроприводу. Для задоволення всіх цих вимог потрібне компромісне налагодження контуру струму, тим більше, що сучасні системи використовують одноразово інтегрувальні контури струму з одним регулятором. У таких системах завжди існує розбіжність між статичними і динамічними характеристиками. На рис. 1, *а* наведено статичну і динамічну характеристики в координатах ω(Iя), а на рис. 1, *б* – характеристики швидкості ω(t) струму I(t) і прискорення ε(t). Ці розбіжності наближено можна охарактеризувати коефіцієнтом співвідношення динаміки зі статикою [1] $\chi=I_{дин}/I_{стат}$. Коефіцієнт $\chi$ в системах з одноразово інтегрувальним контуром струму, налагодженим за умови технічної оптимізації, завжди менше одиниці і для більшості



Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

загальнопромислових механізмів знаходиться в межах $\chi$=0,55–0,9 [2]. Значення $\chi$ залежить від співвідношення малої нескомпенсованої сталої контуру струму $T_\mu$ і електромеханічної сталої $T_{ем}$ (m= $T_\mu$/ $T_{ем}$). Враховуючи це двигун в пуско-гальмівних режимах буде недовикористаний в кращому випадку на 10 %, а в гіршому – на 45 %.




*а* *б*

*Рис. 1. Статичні та динамічні характеристики*

Для збільшення швидкодії контуру струму і відповідно коефіцієнта $\chi$ застосовують системи з гнучкими зворотними зв'язками за струмом [3], але забезпечити значення $\chi$=1 такі системи нездатні.

**Виклад основного матеріалу.** Значно кращий результат мають системи з дворазово інтегрувальним контуром струму [4]. Один з можливих варіантів такої системи наведено на рис. 2. Вона побудована за паралельним принципом з'єднання регуляторів [5] і складається з двох підсистем: регулювання швидкості $\omega_д$ і регулювання прискорення $\varepsilon$. В кожний момент часу увімкнена та підсистема, вихідна координата якої має більше значення. Цей вибір здійснює ланка "вибір меншого" ЛВМ.

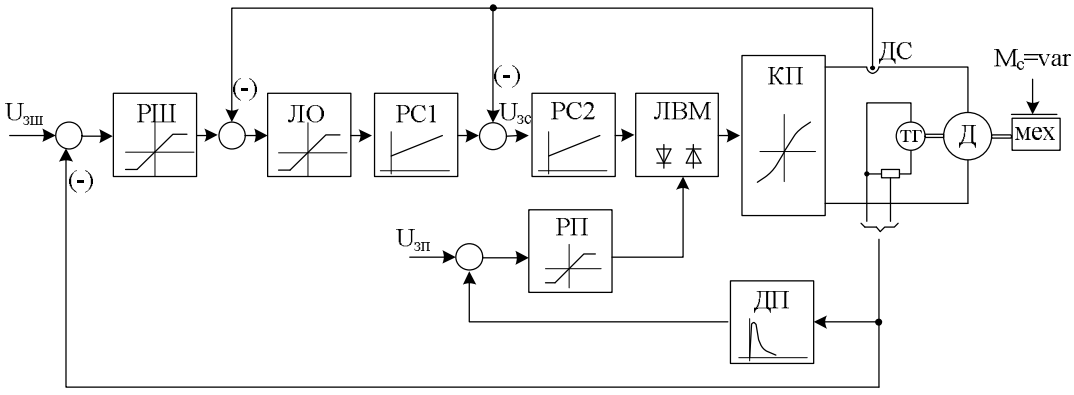



*Рис. 2. Структурно-функціональна схема з дворазово інтегрувальним контуром струму*

Підсистема регулювання швидкості складається з трьох контурів: контуру швидкості з регулятором РШ і двох контурів струму з регуляторами РС1, РС2. Для обмеження темпу зміни струму на час пуску або гальмування двигуна використовується ланка обмеження ЛО. Для випадку налагодження контурів струму за технічним оптимумом регулятори струму мають такі передавальні функції

$$W_{PC1}(p) = 1/pT_{i1};\ W_{PC2}(p) = (pT_я + 1)/pT_{i2},$$

де $T_{i1}=4T_\mu k_{зв.с}k_{ЛО}$ – інтегральна складова регулятора РС1; $T_{i2}=2T_\mu k_{КП}k_{зв.с}R_{як}$ – інтегральна складова регулятора РС2; $T_я$ – електромагнітна стала часу якірного кола двигуна; $k_{зв.с}$ – коефіцієнт передачі



Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

зворотного зв'язку за струмом; $k_{ЛО}$ – коефіцієнт передачі ланки обмеження ЛО; $k_{КП}$ – коефіцієнт передачі керованого перетворювача КП.

Структурна схема дворазово інтегрувального контуру струму зображена на рис. 3. Згідно з цією схемою та передавальними функціями регуляторів РС1, РС2 запишемо в операторній формі вираз для струму якірного кола Iя. З урахуванням дії від'ємного зворотного зв'язку за ЕРС двигуна запишемо

$$I_я(p) = \frac{1/k_{зв.с}}{D_1(p) + D_2(p)}\left[U_{зс}(p) + D_2(p)\frac{k_{зв.с}}{c}M_c(p)\right], \quad (1)$$

де $D_1(p)=p4T_μ[p2T_μ(pT_μ+1)+1]+1$ – складова, яка описує процес в електроприводі без урахування дії внутрішнього зворотного зв'язку за ЕРС двигуна; $D_2(p) = \frac{p8T_μ^2(pT_μ+1)}{T_μ(pT_{як}+1)}$ – складова, яка враховує дію внутрішнього зворотного зв'язку за ЕРС двигуна; $c=E_н/ω_н$ – стала двигуна; $U_{зс}$ – завдання струму ланки ЛО.

З виразу (1) знайдемо усталене значення струму $I_я$ під час роботи на ділянці обмеження струму, підставляючи значення p=0

$$I_я=U_{зс.max}/k_{зв.с} \quad (2)$$

Вираз (2) визначає, що струм $I_я$ в режимі пуску відповідає максимальному $I_{дин.\ max}$. Прийнявши $U_{зс}= U_{зс.max}$, знайдемо значення струму в перехідному режимі роботи на відрізку струмообмеження

$$I_{дин.\ max}=I_{стоп}= U_{зс.max}/k_{зв.с}.$$

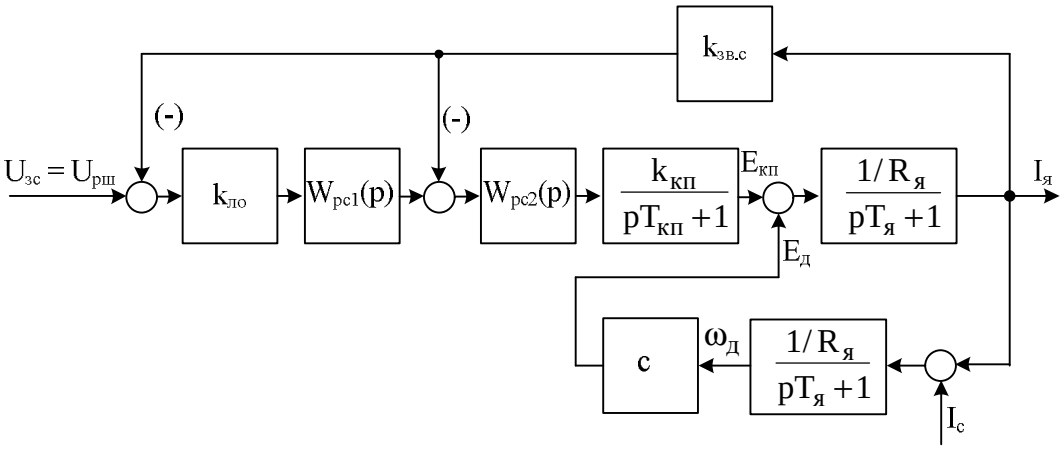



*Рис. 3. Структурна схема дворазово інтегрувального контуру струму*

Це означає, що $\chi$=1. Таким чином система з дворазовим інтегруванням в контурі струму забезпечує значно вищий коефіцієнт наближення динаміки до статики в порівнянні з одноразово інтегрувальною. Наявність ланки ЛО в першому контурі струму дає змогу забезпечити плавне прикладання моменту до механізму, що має важливе значення для механізмів з розгалуженими механічними передачами та люфтами.

Система зберігає високий запас стійкості (з кутом $\varphi \cong 63^o$), менш чутлива до змін параметрів та збурень і не критична до змін параметрів внутрішнього контуру струму. Роботу приводу на ділянці струмообмеження система підтримує з $\chi$=1 і інваріантна до значення та знака навантаження. Остання особливість системи з дворазово інтегрувальною ланкою струму є позитивною в режимах, коли зовнішні збурення протидіють рухові. Що стосується режимів, коли збурення сприяють рухові, існує небезпека перебільшення прискорення над допустимим значенням. Звичайно, як і для систем з одноразовим інтегруванням, для формування пуско-гальмівних режимів можна скористатися задавачем інтенсивності ЗІ на вході регулятора швидкості РШ. Але наявність додаткового контуру струму зменшує швидкодію контуру швидкості і система буде з запізненням



Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

відтворювати сигнал завдання. Значно кращі показники формування пуско-гальмівних режимів забезпечує введення незалежного від системи регулювання швидкості контуру прискорення з регулятором РП, як це показано на рис. 2.

Завдяки паралельному з'єднанню контурів регулювання швидкодія контура прискорення залежить тільки від швидкодії керованого перетворювача КП, яка визначається нескомпенсованою сталою $T_\mu$.

Структурна схема контуру прискорення наведена на рис. 4. Для оптимізації контуру прискорення використаємо ПІ регулятор з передавальною функцією

$$W_{РП}(p) = \frac{pT_1 + 1}{pT_{i\varepsilon}},$$

де $T_1 = T_{як}$ – електромагнітна стала часу якірного кола; $Ti\varepsilon = 2T_\mu \cdot k_{КП} \cdot k_{зв.п} \cdot k_п / (T_{ем} \cdot c)$ – стала часу інтегральної складової регулятора; $k_{зв.п}$ – коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за прискоренням; $k_п$ – коефіцієнт пропорційності між швидкістю $\omega_д$ і прискоренням $\varepsilon$.

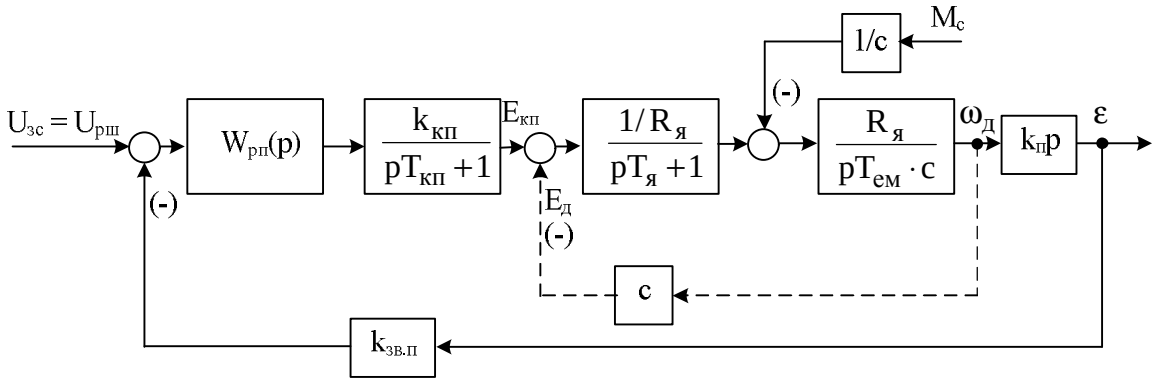



*Рис. 4. Структурна схема контуру прискорення*

Згідно з структурною схемою рис.4 та передавальною функцією регулятора РП, запишемо в операторній формі вираз для прискорення двигуна без врахування внутрішнього зв'язку за ЕРС двигуна

$$\varepsilon(p) = \frac{1/k_{зв.п}}{D_{1\varepsilon}(p)}\left[U_{зп}(p) \pm D_{2\varepsilon}(p)\frac{k_{зв.п}}{c}M_c(p)\right], \qquad (3)$$

де $D_{1\varepsilon}(p) = 2T_\mu(pT_\mu+1)+1$ – характеристичне рівняння схеми керування прискорення; $D_{2\varepsilon}(p) = p2T_\mu(pT_\mu + 1)/ (T_{ем} \cdot c)$ – передавальна функція ланки приведення моменту навантаження до входу контуру.

З виразу (3) знайдемо усталене значення прискорення *е* зростання або спадання швидкості $\varepsilon_{уст} = U_{зп}/k_{зв.п}$.

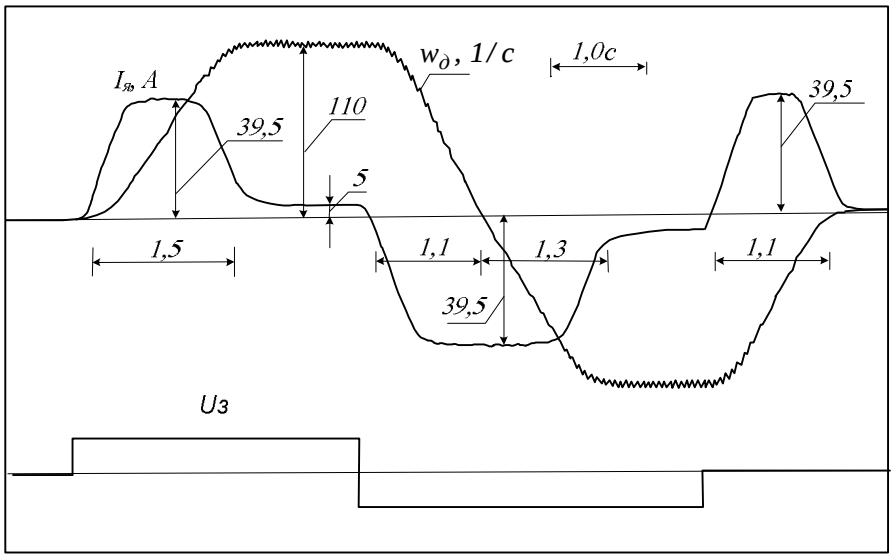
Вираз показує, що прискорення $\varepsilon_{уст}$ залежить тільки від завдання обмеження прискорення $U_{зп}$ і величини зворотного зв'язку за прискоренням $k_{зв.п}$.

На рис. 5 наведено осцилограми експериментальних досліджень електроприводу з запропонованою системою керування. Параметри установки: $\omega_{дн}$=110 1/с, $\varepsilon_{доп}$=85 1/с$^2$, $I_{стоп}$=39,5 А, $I_{стат}$=5А. На осцилограмах показано процеси пуску, реверсу та гальмування. Осцилограма рис. 5, *а* знята в системі з дворазово інтегрувальній системі без контуру прискорення. У режимі гальмування прискорення становить 100 1/с$^2$, що на 10% перевищує допустиме.

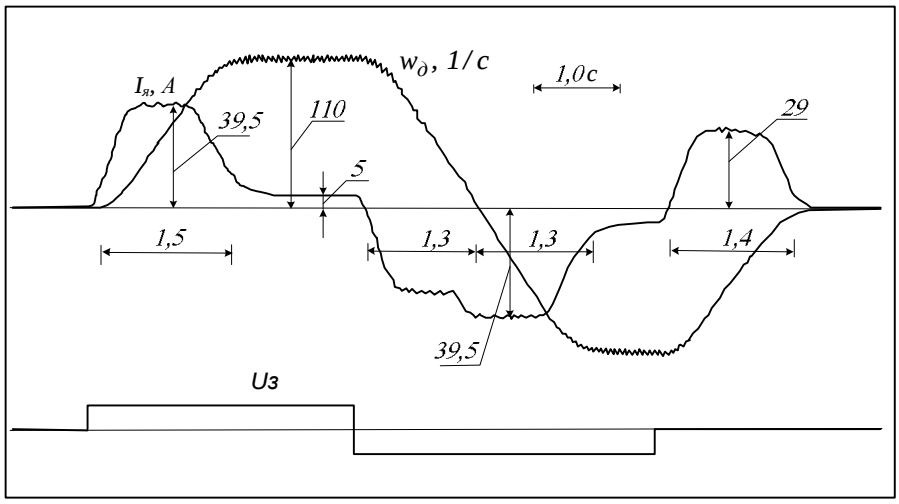
Осцилограма рис. 5, *б* знята в системі з дворазовим інтегратором в контурі струму і контуром прискорення. Величина прискорення в режимах як пуску, так і гальмування не перевищує 85 1/с$^2$.



Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua




*а*




*б*

*Рис. 5. Осцилограми експериментальних досліджень електроприводу*

**Висновки**

Отже, система з дворазовим інтегруванням в контурі струму забезпечує значно вищий коефіцієнт наближення динаміки до статики. Максимальний пусковий струм у режимах, коли момент навантаження $M_c$ протидіє руху, практично дорівнює стопорному $I_{дин.max}=I_{стоп}=39,5A$.

Система з контуром прискорення надійно обмежує прискорення приводу допустимим значенням за зміни знака моменту навантаження $M_c$.

*1. Вуль Ю.Я. Наладка электроприводов экскаваторов / Ю.Я. Вуль, В.И. Ключев, Л.В. Седаков. – М.: Недра, 1975. – 312 с. 2. Панченко Б.Я. Формування механічних характеристик електроприводів з системами двократного інтегрування в контурі струму / Б.Я. Панченко, В.І. Кузнецов, В.Б. Цяпа // Автоматизація виробничих процесів. – 1992.– № 30. – С. 26–31. 3. Ключев В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. – М.: Энергия, 1971. – 320 с. 4. Лебедев Е.Д. Управление вентильными электроприводами постоянного тока / Е.Д. Лебедев, В.Е. Неймарк, М.Я. Пистрак, О.В. Слежановский. – М.: Энергия, 1967. – 200 с. 5. Eisele H., Vance O.M. Parallel control sistem regulates motor speed and torque "Westinghouse Engr". – 1966. – № 4. – P. 12–16.*



Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua