



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **93194** (13) **U**  
(51) МПК (2014.01)  
**B60L 15/00**

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

<p>(21) Номер заявки: <b>u 2014 02943</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>24.03.2014</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: <b>25.09.2014</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: <b>25.09.2014, Бюл.№ 18</b></p>	<p>(72) Винахідник(и): <b>Черв'яков Володимир Дмитрович (UA), Самедов Юсіф Фахрат-огли (UA), Панич Андрій Олександрович (UA)</b></p> <p>(73) Власник(и): <b>СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007 (UA)</b></p>
--	--

**(54) СПОСІБ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ГАЛЬМУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА**

**(57) Реферат:**

Спосіб керування процесом гальмування електропривода полягає у здійсненні процесу гальмування як послідовного виконання операцій переведення двоконтурної системи керування електроприводом із режиму регулювання швидкості в режим автоматичного регулювання моменту на рівні заданого значення гальмівного моменту електропривода протягом часу від початку гальмування до зупину та повернення електропривода у режим регулювання швидкості. Задане значення гальмівного моменту електропривода розраховують з врахуванням його енергетичних показників, які вимірюють перед початком гальмування, за визначеною формулою.

**UA 93194 U**



Корисна модель належить до галузі електротехніки і може бути використана в автоматизованих електроприводах технологічних машин.

Відомий спосіб керування електроприводом транспортного засобу, по якому рух транспортного засобу перед зупинкою здійснюють з відключеними двигунами за рахунок кінетичної енергії транспортного засобу [1]. Точка відключення двигунів, тобто початок процесу гальмування розраховується для кожної ділянки уповільненого руху з врахуванням кінетичної енергії транспортного засобу на момент відключення двигунів та опору руху на цій ділянці. Кінетична енергія витрачається на роботу по здолянню сил опору руху.

Недоліком способу є повна відсутність певної кількості кінетичної енергії, яка могла б повернута джерелу живлення двигунів у процесі уповільненого гальмування.

Відомі двоконтурні системи підпорядкованого регулювання в електроприводах постійного і змінного струму, в яких здійснюється обмеження моменту (струму) максимально допустимим значенням з метою формування пускогальмівних характеристик [2, с. 474-475, с. 559]. Ці способи можна характеризувати як "екстремне гальмування", в наслідок чого отримується найшвидший процес гальмування.

Недоліком способу є низька енергоефективність процесу гальмування електропривода, тому що втрати електричної енергії, яка мала б повертатися джерелу живлення, пропорційні квадрату моменту гальмування. До того ж таке найшвидше гальмування не потрібне при нормальній роботі багатьох механізмів з циклічним характером переміщень робочого органу.

Як найближчий аналог вибрано спосіб керування електроприводом робочого органа летучого пилу, що містить як основу двоконтурну систему управління швидкості обертання двигуна. Спосіб передбачає здійснення процесу гальмування як послідовне виконання операцій переведення системи керування електроприводом із режиму регулювання швидкості в режим автоматичного регулювання моменту на рівні величини, що формується задавальним пристроєм і подається як задавальне діяння на вхід контуру регулювання моменту. Задавальний пристрій передбачає можливість налаштування і оперативного підстроювання задання моменту для кращого виконання технологічного циклу роботи летучого пилу. Після зупину двигуна здійснюють повернення системи керування електроприводом в режим регулювання швидкості [3, с. 35-39].

Недоліком відомого способу є те, що в ньому не враховуються конкретні початкові умови процесу гальмування. Задання моменту гальмування не обчислюється, а формується на основі апріорних уявлень про технологію роботи летучого пилу, внаслідок чого не досягається максимуму кінетичної енергії рухомих мас електропривода, яка могла б бути повернута джерелу живлення за час гальмування до зупину.

В основу корисної моделі поставлено задачу підвищення енергоефективності процесу гальмування за рахунок максимізації частки кінетичної енергії рухомих мас електропривода, накопиченої до початку процесу гальмування, що повертається джерелу живлення енергетичного каналу електропривода за час гальмування до зупину.

Поставлена задача вирішується тим, що у відомому способі керування електроприводом на основі двоконтурної системи регулювання швидкості процес гальмування електропривода здійснюють як послідовне виконання операцій переведення системи керування електроприводом із режиму регулювання швидкості в режим автоматичного регулювання моменту на рівні заданого значення протягом часу від початку гальмування до зупину, та після зупину двигуна повернення електропривода у режим регулювання швидкості, згідно з корисною моделлю, перед початком гальмування електропривода вимірюють його енергетичні показники і, ураховуючи їх, розраховують задане значення гальмівного моменту двигуна за формулою:

$$M_T = \begin{cases} \sqrt{M_c^2 + \beta \omega_0 M_c / 2} - M_c, \text{якщ } \sqrt{M_c^2 + \beta \omega_0 M_c / 2} \leq M_{\text{доп}}, \\ M_{\text{доп}}, \text{якщ } \sqrt{M_c^2 + \beta \omega_0 M_c / 2} > M_{\text{доп}}. \end{cases}$$

Принцип розробки нового способу керування процесом гальмування електропривода пояснюється наступним.

Швидкість  $\omega$  обертання двигуна є керованою перемінною стану динамічної системи, якою є механічна частина електропривода, а електромагнітний момент  $\omega$  двигуна є керуючим діянням. Збурюючим діянням є статичний момент  $M_c$ , що спотворюється силами спротиву руху механічної системи електропривода. Без суттєвої погрішності можна вважати статичний момент постійним ( $M_c = \text{const}$ ), оскільки він спотворюється в основному силами сухого тертя.

Процеси зміни поточного стану механічної системи електропривода під впливом керуючого  $M$  та збурюючого  $M_c$  діянь належать до категорії механічних процесів, тому вони цілком описуються рівняннями руху та механічної характеристики електропривода:

$$M - M_C = J(d\omega / dt), \quad (1)$$

$$\omega = \omega_x - M / \beta, \quad (2)$$

де  $J$  - момент інерції механічної частини електроприводу, приведений до швидкості  $\omega$ ;  $d\omega / dt$  - похідна швидкості  $\omega$  за часом  $t$ ;  $\beta = M_H / (\omega_x - \omega(M_H))$  - модуль жорсткості механічної характеристики електропривода;  $M_H$  - номінальне значення електромагнітного моменту двигуна;  $\omega_x$  - швидкість ідеального холостого ходу;  $\omega(M_H)$  - значення швидкості при роботі електропривода в усталеному режимі з номінальним навантаженням двигуна (при  $M = M_H$ ).

Для визначеності прийнято, що електропривод має лінійну механічну характеристику (2). Лінійну (або практично лінійну) механічну характеристику мають регульовані електроприводи на базі двигуна постійного струму з незалежним збудженням або асинхронного (змінного струму). У таких системах електропривода використовується однозонне регулювання швидкості в межах  $\pm \omega_x$  (шляхом змінення напруги в колі якоря двигуна постійного струму або шляхом змінення частоти напруги в колі статора двигуна змінного струму), внаслідок чого має місце постійність модуля жорсткості механічної характеристики ( $\beta = \text{const}$ ).

Рівняння (2) після множення всіх його членів на  $M$  перетворюється у рівняння балансу потужностей:

$$M\omega = M\omega_x - M^2 / \beta, \quad (3)$$

де  $M\omega = P_{\text{мех}}$  - механічна потужність двигуна;  $M\omega_x = P_{\text{ел}}$  - потужність процесу обміну енергією між джерелом живлення і енергетичним каналом електропривода;  $M^2 / \beta = \Delta P_{\text{ел}}$  - потужність електричних (теплових) втрат в електричній частині енергетичного каналу електропривода ( $\Delta P_{\text{ел}} > 0$ ).

Ліва частина (3) після заміни перемінної  $M$  її виразом із (1) набуває вигляду

$$M\omega = J\omega(d\omega / dt) + M_C\omega, \quad (4)$$

або

$$P_{\text{мех}} = P_K + P_C, \quad (5)$$

де  $P_K = J\omega(d\omega / dt) = d(J\omega^2 / 2) / dt$  - потужність змінення запасу кінетичної енергії рухомих мас електропривода;  $P_C = M_C\omega$  - потужність розходу енергії на подолання сил статичного опору. На всьому протязі процесу гальмування потужності  $P_K < 0, P_C > 0$ .

Таким чином, отримали рівняння балансу потужностей у вигляді

$$P_{\text{ел}} = P_K + P_C + \Delta P_{\text{ел}}. \quad (6)$$

Інтегруючи обидві частини (6) на інтервалі часу гальмування  $T$ , отримуємо рівняння енергетичного балансу динамічної системи:

$$\int_0^T P_{\text{ел}} dt = \int_0^T P_K dt + \int_0^T P_C dt + \int_0^T \Delta P_{\text{ел}} dt. \quad (7)$$

Ліва частина (7) являє собою кількість енергії, споживаної електроприводом за весь час  $T$  гальмування. Перший член правої частини (7) при будь-якій функції  $\omega(t)$  на інтервалі часу  $T$  за величиною дорівнює початковому запасу  $W_K(0)$  кінетичної енергії рухомих мас електропривода, а за знаком - негативний, тобто

$$\int_0^T P_K dt = -J\omega_0^2 / 2 = -W_K(0). \quad (8)$$

Отже, задача підвищення енергоефективності процесу гальмування зводиться до задачі мінімізації суми другого і третього членів правої частини (7), які визначають безповоротні витрати енергії. Це погоджується з фізичними уявленнями про енергетичні процеси в механічних системах.

Проведений аналіз енергетичних процесів дає підстави визначити цільову функцію керування електроприводом у процесі гальмування таким чином:

$$I = \int_0^T P_C dt + \int_0^T \Delta P_{\text{ел}} dt \rightarrow \min. \quad (9)$$

Після підстановки виразів  $P_c = M_c \omega$  та  $\Delta P_{ел} = M^2 / \beta$  у праву частину (9) цільова функція керування перетворюється до вигляду

$$I = (1/\beta) \left( \int_0^T (M^2 + \beta M_c \omega) dt \right) \rightarrow \min. \quad (10)$$

Задачу мінімізації функціоналу (10) будемо розв'язувати в класі кусково-постійних функцій  $M(t)$ , для чого розглянемо енергетичні показники процесу гальмування електропривода.

5 Тривалість  $T$  процесу гальмування при  $M(t) = -M_T = \text{const}$ , де  $M_T$  - величина постійного в часі гальмуючого моменту, визначимо із (1):

$$T = J\omega_0 / (M_T + M_c). \quad (11)$$

Шлях  $\varphi_T$  переміщення робочого органа технологічної машини, оснащеного даним електроприводом, за час  $T$  гальмування до зупину в кутовому вимірі дорівнює:

$$\varphi_T = \omega_0 T / 2 = (J\omega_0^2 / 2) / (M_T + M_c) = W_k(0) / (M_T + M_c). \quad (12)$$

Енергія, що витрачається на механічну роботу, дорівнює

$$W_c(T) = M_c \varphi_T = W_k(0) M_c / (M_T + M_c). \quad (13)$$

10 Енергія електричних втрат дорівнює

$$\Delta W_{ел}(T) = M_T^2 T / \beta = 2W_k(0) M_T^2 / \beta \omega_0 (M_T + M_c). \quad (14)$$

Кількість енергії, що споживається електроприводом за час гальмування, згідно (7) і з урахуванням (8) дорівнює

$$W_{ел}(T) = -W_k(0) + \Delta W_{ел}(T) + W_c(T) = -W_k(0) \left( 1 - (M_c + 2M_T^2 / \beta \omega_0) / (M_T + M_c) \right). \quad (15)$$

Відношенням

$$D = (M_c + 2M_T^2 / \beta \omega_0) / (M_T + M_c) \quad (16)$$

15 визначається частка початкового запасу  $W_k(0)$  кінетичної енергії рухомих мас електропривода, що безповоротно витрачається за час гальмування. Функція  $D(M_T)$  є випуклою, тобто має мінімум. Таким чином, безповоротні витрати енергії в процесі гальмування електропривода до зупину мінімізуються шляхом вибору такого значення  $M_T$  гальмівного моменту двигуна, при якому значення критерію  $D$  мінімальне. Для визначення мінімального значення  $D$  знайдемо похідну  $D$  за моментом  $M_T$ :

$$dD / dM_T = (2 / \beta \omega_0 (M_T + M_c)^2) (M_T^2 + 2M_c M_T - \beta \omega_0 M_c / 2). \quad (17)$$

20 Прирівнюючи праву частину (17) до нуля, отримуємо:

$$M_T = \sqrt{M_c^2 + \beta \omega_0 M_c / 2} - M_c. \quad (18)$$

Значення  $M_T$  гальмівного моменту двигуна не повинно перевищувати величини  $M_{доп}$  електромагнітного моменту, максимально допустимого за умов експлуатаційної надійності двигуна, тому розрахункову формулу, за якої здійснюється вибір величини  $M_T$ , слід зазначити такою:

$$M_T = \begin{cases} \sqrt{M_c^2 + \beta \omega_0 M_c / 2} - M_c, \text{ якщо } \sqrt{M_c^2 + \beta \omega_0 M_c / 2} \leq M_{доп}, \\ M_{доп}, \text{ якщо } \sqrt{M_c^2 + \beta \omega_0 M_c / 2} > M_{доп}. \end{cases} \quad (19)$$

25 Керування процесом гальмування електроприводом по способу, що заявляється, здійснюється таким чином.

Перед початком експлуатації системи автоматичного керування електроприводом визначаються показники його характеристики:

швидкість ідеального холостого ходу двигуна  $\omega_x$ ;

30 номінальне значення електромагнітного моменту двигуна  $M_H$ ;

значення швидкості двигуна при його роботі в усталеному режимі з номінальним навантаженням  $\omega(M_H)$ ;

модуль жорсткості механічної характеристики електропривода  $\beta = M_H / (\omega_x - \omega(M_H))$ ;

35 статичний момент опору, що спотворюється силами спротиву в механічній частині електропривода, приведений до швидкості  $\omega$  у залежності від напрямку руху  $M_c$ .

Безпосередньо перед початком процесу гальмування електропривода вимірюють значення кутової швидкості обертання двигуна  $\omega_0$  і обчислюють значення величини гальмівного моменту двигуна  $M_T$  за формулою (19) з урахуванням наведених вище показників.

5 Далі систему керування електроприводом переводять із режиму регулювання швидкості в режим автоматичного регулювання моменту на рівні значення гальмівного моменту двигуна  $M_T$ .

Після зупину двигуна здійснюють повернення системи керування електроприводом в режим регулювання швидкості.

10 Для ілюстрації способу керування процесом гальмування електропривода розглянемо наступний приклад.

Припустимо, що механічні характеристики (2) електропривода при будь-яких значеннях швидкості  $\omega_x$  мають незмінний модуль жорсткості  $\beta = 50M_H / \omega_H$ , Н·м·с/рад, статичний момент  $M_C = 0,1M_H$ , Нм. Перевантажувальну здатність двигуна характеризує відношення  $M_{доп}/M_H = 2,5$ .

15 При гальмуванні по способу [1] час зупину двигуна складе  $T_1 = J\omega_0 / M_C$ , оскільки  $M_T = 0$ , а частка початкового запасу кінетичної енергії рухомих мас електропривода, що безповоротно втрачається, дорівнює одиниці, що означає її втрату.

При гальмуванні по способу [2] з максимально допустимим значенням  $M_T = 2,5 \cdot M_H$ , то час зупину складе  $T_2 = J\omega_0 / (2,5 \cdot M_H + M_C) = J\omega_0 / 2,6 \cdot M_H$ , частка початкового запасу кінетичної енергії з початковим значенням швидкості  $\omega_0 = \omega_H$ , що повертається джерелу живлення буде  $W_{ел}(T_2) = W_k(0) \cdot (1 - 0,13) = -0,87 \cdot W_k(0)$ .

20 При гальмуванні по способу, що заявляється за критерієм (10) оптимальності з тим же початковим значенням швидкості  $\omega_0 = \omega_H$  отримаємо  $M_T = 1,9 \cdot M_H$ , час зупину складе  $T_3 = J\omega_0 / (1,9 \cdot M_H + M_C) = J\omega_0 / 2 \cdot M_H = 1,3 \cdot T_2$ , частка початкового запасу кінетичної енергії, що повертається джерелу живлення буде  $W_{ел}(T_3) = W_k(0) \cdot (1 - 0,1) = -0,9 \cdot W_k(0)$ .

При виборі  $M_T = 1,3 \cdot M_H$ , отримаємо  $W_{ел}(T_4) = W_k(0) \cdot (1 - 0,12) = -0,88 \cdot W_k(0)$  з часом гальмування  $T_4 = J\omega_0 / (1,3 \cdot M_H + M_C) = J\omega_0 / 1,4 \cdot M_H = 1,43 \cdot T_3 = 1,86 \cdot T_2$ .

30 Наведений приклад означає, що оптимальний за критерієм якості (10) процес ( $M(t), \omega(t)$ ) гальмування електропривода до зупину забезпечує мінімізацію енерговитрат в енергетичному каналі електропривода, при цьому має місце повернення максимальної частини початкового запасу кінетичної енергії рухомих мас джерелу живлення.

Джерела інформації:

1. Спосіб керування електроприводом транспортного засобу. Патент України на корисну модель № 18585. Бюл. № 11, 2006 р.

35 2. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посібник / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін.: За ред. М.Г. Поповича та О.Ю. Лозинського. -К. Либідь, 2005. -680 с.

40 3. Панич А.О. Обмеження ривка в двох режимній системі управління електропривода несучого органа летучої пили / А.О. Панич, М.О. Петренко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. - Кременчук: КДПУ, 2007. - Вин. 3/2007 (44). - С. 35-39.

## ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

- 5 Спосіб керування процесом гальмування електропривода, що полягає у здійсненні процесу гальмування як послідовного виконання операцій переведення двоконтурної системи керування електроприводом із режиму регулювання швидкості в режим автоматичного регулювання моменту на рівні заданого значення гальмівного моменту електропривода протягом часу від початку гальмування до зупину та повернення електропривода у режим регулювання швидкості, який **відрізняється** тим, що задане значення гальмівного моменту електропривода розраховують з врахуванням його енергетичних показників, які вимірюють перед початком гальмування, за наступною формулою:

$$M_T = \begin{cases} \sqrt{M_c^2 + \beta \omega_0 M_c / 2} - M_c, \text{ якщо } \sqrt{M_c^2 + \beta \omega_0 M_c / 2} \leq M_{\text{доп}}, \\ M_{\text{доп}}, \text{ якщо } \sqrt{M_c^2 + \beta \omega_0 M_c / 2} > M_{\text{доп}}. \end{cases}$$

- де  $M_T$ , Н·м - задане значення величини гальмівного моменту двигуна;  $\omega_0$ , рад/с - початкове значення кутової швидкості обертання двигуна перед гальмуванням;  $\beta = M_n / (\omega_x - \omega(M_n))$  - модуль жорсткості механічної характеристики електропривода;  $\omega_x$  - швидкість ідеального холостого ходу;  $M_n$  - номінальне значення електромагнітного моменту двигуна;  $\omega(M_n)$  - значення швидкості при роботі електропривода в усталеному режимі з номінальним навантаженням;  $M_c$  - статичний момент, що спотворюється силами спротиву в механічній частині електропривода, приведений до швидкості  $\omega$ ;  $M_{\text{доп}}$  - максимальна допустима величина електромагнітного моменту двигуна за умови його експлуатаційної надійності.

---

Комп'ютерна верстка Л. Литвиненко

---

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

---

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601