



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 113687

(13) U

(51) МПК

H02P 21/04 (2006.01)

H02P 103/10 (2016.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

<b>(21)</b> Номер заявки: <b>u 2016 08108</b>	<b>(72)</b> Винахідник(и): <b>Бялобржеський Олексій Володимирович (UA),</b> <b>Слободенюк Юлія Олександрівна (UA),</b> <b>Смірнова Тамара Олександрівна (UA)</b>
<b>(22)</b> Дата подання заявки: <b>22.07.2016</b>	
<b>(24)</b> Дата, з якої є чинними права на корисну модель: <b>10.02.2017</b>	
<b>(46)</b> Публікація відомостей про видачу патенту: <b>10.02.2017, Бюл.№ 3</b>	<b>(73)</b> Власник(и): <b>КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО,</b> вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, Полтавська обл., 39600 (UA)

**(54) СПОСІБ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З УРАХУВАННЯМ НАСИЧЕННЯ ТА ОБМЕЖЕННЯ МОМЕНТУ НА НИЗЬКИХ ОБЕРТАХ****(57) Реферат:**

Спосіб векторного керування тяговим асинхронним двигуном з урахуванням насичення та обмеження моменту на низьких обертах, в якому задають керуючий сигнал швидкості та порівнюють з сигналом обчислення швидкості по збільшенню кута, виконують обчислення q-складової струму статора, порівнюють із компенсаційною складовою каналу управління, формують з сигналу помилки по струму сигнал завдання напруги по осі q, порівнюють із компенсаційною складовою каналу управління, виконують обчислення d-складової струму статора, використовуючи потік намагнічування в залежності від моменту, при заданому  $\psi_R$ , порівнюють із компенсаційною складовою каналу управління, формують з сигналу помилки по струму сигнал завдання напруги по осі d, порівнюють із компенсаційною складовою каналу управління, порівнюють із компенсаційною складовою каналу управління, здійснюють перетворення вектора напруги статора з обертової системи dq в нерухому двофазну, а потім в полярну систему координат, здійснюють високочастотну фільтрацію та перетворення струму статора від трифазної нерухомої системи координат в двофазну, а потім у обертову систему dq, здійснюють реалізацію вектора напруги статора, керують процесом інвертування напруги джерела постійного струму та формування струму статора асинхронної машини, причому формують з сигналу помилки по швидкості сигнал завдання моменту, обмежують момент в залежності від частоти, обчислюють значення швидкості та гранично допустимий струм, визначають максимальний момент, який двигун здатний забезпечити, перевантажувальний момент, формують перевантажувальний момент та частоту, нижче якої починається обмеження моменту на рівні перевантажувального, задають потік ротора при роботі з постійним потоком, або оптимізації потоку ротора в залежності від моменту, виконують обчислення частоти ковзання, здійснюють обчислення поточного кута повороту потоку ротора, обмежують частоти нижче номінальної для зростання граничного моменту.

UA 113687 U



Корисна модель належить до галузі електротехніки і може бути використана в промисловості та на електрифікованих залізницях для векторного керування електродвигуном змінного струму з автономним інвертором для забезпечення динамічних режимів руху та регенеративного гальмування з урахуванням ланцюга насичення та намагнічування.

Відомий спосіб визначення ідентифікатора положення вектора потокозчеплення ротора, значень активної та намагнічуючих складових струму статора асинхронного двигуна [Патент № 48510, UA, H02K 15/00 "Спосіб визначення ідентифікатора положення вектора потокозчеплення ротора, значень активної та намагнічуючих складових струму статора асинхронного двигуна"/ Гончарова Л. М., Опубл. 25.03.2010 Бюл. № 6], що включає реєстрацію реально діючих сигналів у режимах робочого функціонування асинхронного двигуна й наступну обробку зареєстрованих сигналів як реально діючих в асинхронному двигуні сигналів використовують поточні значення фазних струмів, при цьому ідентифікатор положення вектора потокозчеплення ротора знаходять через значення пропорційних складовим вектора потокозчеплення ротора змінних  $\dot{\varphi}_\alpha$  і  $\dot{\varphi}_\beta$  формулах:

$$\dot{\varphi}_\alpha = -i_\alpha + I_{q3} \cdot i_\alpha / I_{d3},$$

$$\dot{\varphi}_\beta = -i_\beta + I_{q3} \cdot i_\beta / I_{d3},$$

де  $I_{d3}$  - задане значення, намагнічуючої складових струмів статора,  $I_{q3}$  - задане значення активної складової струму статора,  $i_\alpha$  - проекція узагальненого вектора струму на вісь  $\alpha$ ,  $i_\beta$  - проекція узагальненого вектора струму на вісь  $\beta$ , потім обчислюють кут  $\beta$  між вектором потокозчеплення й віссю нерухливої системи координат по формулі:

$$\Theta = \arctan\left(\frac{\dot{\varphi}_\beta}{\dot{\varphi}_\alpha}\right),$$

а намагнічуючу складову статорного струму й активну складову статорного струму обчислюють за формулами:

$$I_d = \frac{i_\alpha \cdot \dot{\varphi}_\alpha}{(\dot{\varphi}_\alpha^2 + \dot{\varphi}_\beta^2)^{0,5}} + \frac{i_\beta \cdot \dot{\varphi}_\beta}{(\dot{\varphi}_\alpha^2 + \dot{\varphi}_\beta^2)^{0,5}};$$

$$I_q = \frac{i_\alpha \cdot \dot{\varphi}_\beta}{(\dot{\varphi}_\alpha^2 + \dot{\varphi}_\beta^2)^{0,5}} + \frac{i_\beta \cdot \dot{\varphi}_\alpha}{(\dot{\varphi}_\alpha^2 + \dot{\varphi}_\beta^2)^{0,5}}.$$

Суттєві ознаки, що збігаються з корисною моделлю, що заявляється: асинхронний двигун, перетворювач, датчики струму, що з'єднують силовий перетворювач та асинхронний двигун, перетворювач координат стуму, використання регуляторів швидкості, активної та намагнічуючої складової струму.

Недоліками даного технічного рішення є: відсутність обмежувачів сигналів завдання активної та намагнічуючої складових струму, що може призвести до підвищення струму в статорному колі та перегріву машини, відсутні блоки, які забезпечують урахування насичення магнітної системи.

Відоме технічне рішення системи векторного керування асинхронним двигуном [Патент №79969, UA, H02P 21/00 "Система векторного керування асинхронним двигуном"/ Огарь В. О., Лиходій І. О., Опубл. 13.05.2013 Бюл.№9], яка синтезована в координатній системі d, q, 0, використовує прямий та квадратурний канали регулювання, значення потокозчеплення та швидкості визначаються за допомогою відповідних блоків із значень струмів та напруг статора та враховує втрати у сталі шляхом введення в систему спостерігача стану за індуктивністю контуру намагнічування  $L_\mu$ , спостерігач визначає  $L_\mu$  з залежності  $L_\mu = f(I_{\mu\Sigma})$ , де за струм намагнічування  $I_{\mu\Sigma}$  приймається струм прямого каналу  $I_d$ , уточнене значення  $L_\mu$  використовується в адаптивних регуляторах та для уточнення розрахунку кутової швидкості двигуна, додатково застосовується фільтр сигналу кутової швидкості, який встановлений після блока розрахунку кутової швидкості.

Суттєві ознаки, що збігаються з корисною моделлю, що заявляється: модель синтезована в обертовій координатній системі d, q, 0; асинхронний двигун, перетворювач, датчики струму, що з'єднують силовий перетворювач та асинхронний двигун, перетворювач координат стуму, використання прямого та квадратурного каналу регулювання, що підтримує постійність вектора

потокосцеплення ротора та кутової швидкості двигуна, використання регуляторів швидкості, активної та намагнічуючої складової струму.

Недоліками даного технічного рішення є: зміна параметрів регуляторів при зміні індуктивності намагнічування, відсутність обмежувачів сигналів завдання активної та намагнічуючої складових струму, що може призвести до підвищення струму в статорному колі та перегріву машини.

Відомий спосіб урахування насичення асинхронного двигуна в системі векторного керування [Патент № 80682, UA, H02P 21/00 "Спосіб урахування насичення асинхронного двигуна в системі векторного керування"/ Родькін Д. Й., Огарь В. О., Свистун А. В., Опубл. 10.06.2013 Бюл. № 11], який полягає у врахуванні нелінійності кривої намагнічування в системі векторного керування трифазним асинхронним електродвигуном із перетворювачем частоти як джерелом живлення, в якому сигнали з блоків датчиків струму та напруги, що вимірюють миттєві значення струму та напруги, датчика швидкості асинхронного двигуна надходять на вхід блоків перетворювачів координат, на вхід блоків пропорційно-інтегральних регуляторів потокосцеплення, активного і реактивного струмів, пропорційного регулятора швидкості, блока компенсації перехресних зв'язків, блоків завдання швидкості і потокосцеплення, блоків перетворення координат, які в складі векторної системи керування здійснюють керування з орієнтацією за модулем головного потокосцеплення, на вхід блока, що виконує функцію компенсації насичення, надходять значення паспортних даних і сигнали з об'єкта керування (насиченого двигуна), з яких сигнали, що коректують значення параметра для регуляторів прямого та квадратурного струмів, частоти обертання двигуна, потокосцеплення, через зворотний зв'язок надходять на свої відповідні суматори і на керуючий вхід перетворювального пристрою живлення двигуна.

Суттєві ознаки, що збігаються з корисною моделлю, що заявляється: врахування нелінійності кривої намагнічування в системі векторного керування трифазним асинхронним електродвигуном із перетворювачем частоти як джерелом живлення, сигнали з блоків датчиків струму та напруги, що вимірюють миттєві значення струму та напруги, датчика швидкості асинхронного двигуна надходять на вхід блоків перетворювачів координат, на вхід блоків пропорційно-інтегральних регуляторів потокосцеплення, активного і реактивного струмів, пропорційного регулятора швидкості, блока компенсації перехресних зв'язків, блоків завдання швидкості і потокосцеплення, блоків перетворення координат, які в складі векторної системи керування здійснюють керування з орієнтацією за модулем головного потокосцеплення, на вхід блока, що виконує функцію компенсації насичення, надходять значення паспортних даних і сигнали з об'єкта керування (насиченого двигуна), з яких сигнали, що коректують значення параметра для регуляторів прямого та квадратурного струмів, частоти обертання двигуна, потокосцеплення, через зворотний зв'язок надходять на свої відповідні суматори і на керуючий вхід перетворювального пристрою живлення двигуна.

Недоліками даного технічного рішення є: необхідність датчиків потокосцеплення, відсутність блока обмеження моменту, що унеможливорює формування механічної характеристики на малих швидкостях обертання.

Зазначений спосіб за переліком суттєвих ознак приймається як прототип.

В основу корисної моделі поставлена задача векторного керування тяговим асинхронним двигуном з формуванням тягової характеристики, шляхом врахування насичення магнітної системи асинхронного двигуна та обмеження моменту на низьких обертах забезпечити обмеження струму статора та зниження теплового навантаження двигуна.

Поставлена задача вирішується тим, що в способі векторного керування тяговим асинхронним двигуном з урахуванням насичення та обмеження моменту на низьких обертах задають керуючий сигнал швидкості та порівнюють з сигналом обчислення швидкості по збільшенню кута, виконують обчислення q-складової струму статора, порівнюють із компенсаційною складовою каналу управління, формують з сигналу помилки по струму сигнал завдання напруги по осі q, порівнюють із компенсаційною складовою каналу управління, виконують обчислення d-складової струму статора, використовуючи потік намагнічування в залежності від моменту, при заданому  $\psi_R$ , порівнюють із компенсаційною складовою каналу управління, формують з сигналу помилки по струму сигнал завдання напруги по осі d, порівнюють із компенсаційною складовою каналу управління, порівнюють із компенсаційною складовою каналу управління, здійснюють перетворення вектора напруги статора з обертової системи dq в нерухому двофазну, а потім в полярну систему координат, здійснюють високочастотну фільтрацію та перетворення струму статора від трифазної нерухомої системи координат в двофазну, а потім у обертову систему dq, здійснюють реалізацію вектора напруги

статора, керують процесом інвертування напруги джерела постійного струму та формування струму статора асинхронної машини, формують з сигналу помилки по швидкості сигнал завдання моменту, обмежують момент в залежності від частоти, обчислюють значення швидкості та гранично допустимий струм, визначають максимальний момент, який двигун

5 здатний забезпечити, перевантажувальний момент, формують перевантажувальний момент та частоту, нижче якої починається обмеження моменту на рівні перевантажувального, задають потік ротора при роботі з постійним потоком, або оптимізації потоку ротора в залежності від моменту, виконують обчислення частоти ковзання, здійснюють обчислення поточного кута повороту потоку ротора, обмежують частоти нижче номінальної для зростання граничного моменту.

Корисна модель пояснюється кресленнями, де на кресленні наведена структурна схема системи регулювання з непрямою орієнтацією по полю, на якій прийняті наступні позначення: 1 - блок завдання швидкості; 2 - перший суматор; 3 - регулятор швидкості; 4 - блок обмеження моменту; 5 - силовий перетворювач; 6 - блок обчислення q-складової струму; 7 - блок обчислення d - складової струму; 8 - блок обчислення потоку; 9 - блок обчислення частоти ковзання; 10 - другий суматор; 11 - четвертий суматор; 12 - шостий суматор; 13 - блок компенсації перехресних зв'язків; 14 - регулятор струму q - складової; 15 - регулятор струму d - складової; 16 - третій суматор; 17 - п'ятий суматор; 18 - перший перетворювач координат; 19 - блок обчислення кута; 20 - другий перетворювач координат; 21 - силовий перетворювач з широтно-імпульсною модуляцією; 22 - фільтр низьких частот; 23 - інвертор; 24 - асинхронна машина; 25 - блок обчислення швидкості; 26 - джерело живлення постійної напруги; 27 - блок датчиків струму.

У блоці завдання швидкості 1 задають керуючий сигнал та передають на перший вхід першого суматора 2, де порівнюють з сигналом блока обчислення швидкості 25, в якому здійснюють обчислення швидкості по збільшенню кута. Потім сигнал надходить на регулятор швидкості 3, який реалізують пропорційно-інтегруючим регулятором, за допомогою якого формують з сигналу помилки по швидкості сигнал завдання моменту. На блок обмеження моменту 4, в якому обмежують момент в залежності від частоти, обчислюють значення швидкості та гранично допустимий струм силового перетворювача 5.

В блоці обмеження моменту 4 визначають максимальний момент, який двигун здатний забезпечити:

$$M_{\max} = M_{\text{НОМ}} \frac{\omega_{\text{НОМ}}}{\omega}, \quad (1)$$

де:  $M_{\text{НОМ}}$  - номінальний момент двигуна;  $\omega_{\text{НОМ}}$  - номінальна швидкість двигуна. Перевантажувальний момент:

$$M_{\text{ПЕР}} = \frac{3Z_p \psi_R^2 I_{sq}}{2(L_{\sigma R} I_{sd} + \psi_R)} = \frac{3Z_p \psi_R^2 \sqrt{I_{\text{SLIM}}^2 - I_{sd}^2}}{2(L_{\sigma R} I_{sd} + \psi_R)}. \quad (2)$$

Враховуючи формулу

$$M = \frac{3}{2} Z_p I_R \psi_R = \frac{3Z_p I_{sq} \psi_R^2}{2(L_{\sigma R} I_{sd} + \psi_R)} \Rightarrow I_{sq} = \frac{2M}{3Z_p \psi_R^2} (L_{\sigma R} I_{sd} + \psi_R). \quad (3)$$

В результаті на виході блока обмеження моменту 4 формують перевантажувальний момент:

$$M_{\text{ПЕР1}} = \frac{3Z_p \psi_R \sqrt{I_{\text{SLIM}}^2 - I_{sd}^2}}{2(L_{\sigma R} + L_0^2)} \quad (4)$$

та частота, нижче якої починається обмеження моменту на рівні перевантажувального:

$$\omega_{\text{ПЕР}} = \omega_{\text{НОМ}} \frac{M_{\text{НОМ}}}{M_{\text{ПЕР}}} \quad (5)$$

Блок обчислення q-складової струму 6 виконує функцію обчислення q-складової струму статора, використовуючи формулу (3), із якого сигнал надходить на перший вхід другого суматора 10 та порівнюють із сигналом з блока компенсації перехресних зв'язків 13, в якому обчислюють компенсаційну складову каналу управління  $I_{sd}$

$$U_{kd} = \omega I_{sq} \left( L_{\sigma S} + \frac{L_m L_{\sigma R}}{L_m + L_{\sigma R}} \right) \quad (6)$$

та компенсаційну складову каналу управління  $I_{sq}$

$$U_{Kq} = -\omega I_{Sq} (L_m + L_{\sigma R}) \cdot (7)$$

Порівняний сигнал передають на вхід регулятора струму q-складової 14, що реалізують пропорційно-інтегруючим регулятором, у якому формують з сигналу помилки по струму сигнал завдання напруги по осі q. Сигнал із регулятора надходить на третій суматор 16, де його порівнюють із сигналом блока компенсації перехресних зв'язків 13. У блоці обчислення d-складової струму 7 виконують функцію обчислення d-складової струму статора, використовуючи потік намагнічування в залежності від моменту, при заданому  $\psi_R$  :

$$\psi_m = \sqrt{\psi_R^2 + \frac{2M_{\sigma R}}{3Z_p \psi_R}} \quad (8)$$

$$\frac{I_m}{I_{sd}} = \frac{\psi_m}{\psi_R} \Rightarrow I_{sd} = I_m \frac{\psi_R}{\psi_m} = \frac{\psi_R}{L_m} \frac{(\psi_m - a_i) \psi_R}{b_i \psi_m}, \quad (9)$$

де  $\psi_m$  визначено через потік ротора і момент виразом (8).

При роботі на лінійній ділянці кривої намагнічування, при  $a_0 = 0$ , вираз (9) переписється у наступному вигляді:

$$I_{sd} = \frac{\psi_m \psi_R}{b_0 \psi_m L_0} \cdot (10)$$

де  $L_0 = b_0 = \text{const}$  - значення індуктивності намагнічування на лінійній ділянці.

Із блока обчислення d-складової струму 7 сигнал надходить на перший вхід четвертого суматора 11, де його порівнюють із сигналом з блока компенсації перехресних зв'язків 13. Порівняний сигнал передають на вхід регулятора струму d-складової 15, що реалізується пропорційно-інтегруючим регулятором, у якому формують з сигналу помилки по струму сигнал завдання напруги по осі d. Сигнал із регулятора надходить на п'ятий суматор 17, де його порівнюють із сигналом блока компенсації перехресних зв'язків 13. У блоці обчислення потоку 8 виконують функцію завдання потоку ротора при роботі з постійним потоком, або оптимізації потоку ротора в залежності від моменту. У блок обчислення частоти ковзання 9 виконують функцію обчислення частоти ковзання:

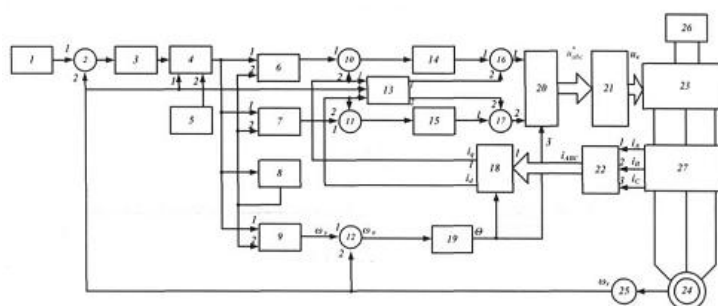
$$\Delta\omega = \frac{2R_R}{3Z_p \psi_R^2} M \cdot (11)$$

Із нього сигнал надходить на перший вхід шостого суматора 12, де його порівнюють із сигналом з блока компенсації перехресних зв'язків 13. Порівняний сигнал передають на вхід блока обчислення кута 19, у якому здійснюють обчислення поточного кута повороту потоку ротора. Кут обчислюють як сума інтеграла від частоти ковзання і кута повороту ротора, помноженого на число пар полюсів двигуна  $\varphi = Z_p \lambda + \int \Delta\omega dt$ . Із третього 16 та п'ятого 17 суматорів та блока обчислення кута 19 сигнали надходять у перетворювач координат 20, в якому здійснюють перетворення вектора напруги статора з обертової системи  $dq$  в нерухому двофазну, а потім в полярну систему координат. Перетворений вектор передають на силовий перетворювач з широтно-імпульсною модуляцією 21, в якому здійснюють реалізацію вектора напруги статора, за тим до інвертора 23 та асинхронної машини 24. Інвертований струм через блок датчиків струму 27 передають на фільтр низьких частот 22, у якому обмежують частоти нижче номінальної для зростання граничного моменту та надходить до перетворювача координат 18, у якому здійснюють перетворення струму статора від трифазної нерухомої системи координат в двофазну, а потім у обертову систему  $dq$ , з якого переходить на блок компенсації перехресних зв'язків 13. Живлення відбувається через джерело постійного струму 26.

#### ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Спосіб векторного керування тяговим асинхронним двигуном з урахуванням насичення та обмеження моменту на низьких обертах, в якому задають керуючий сигнал швидкості та порівнюють з сигналом обчислення швидкості по збільшенню кута, виконують обчислення q-складової струму статора, порівнюють із компенсаційною складовою каналу управління, формують з сигналу помилки по струму сигнал завдання напруги по осі q, порівнюють із компенсаційною складовою каналу управління, виконують обчислення d-складової струму статора, використовуючи потік намагнічування в залежності від моменту, при заданому  $\psi_R$ ,

порівнюють із компенсаційною складовою каналу управління, формують з сигналу помилки по струму сигнал завдання напруги по осі  $d$ , порівнюють із компенсаційною складовою каналу управління, порівнюють із компенсаційною складовою каналу управління, здійснюють перетворення вектора напруги статора з обертової системи  $dq$  в нерухому двофазну, а потім в полярну систему координат, здійснюють високочастотну фільтрацію та перетворення струму статора від трифазної нерухомої системи координат в двофазну, а потім у обертову систему  $dq$ , здійснюють реалізацію вектора напруги статора, керують процесом інвертування напруги джерела постійного струму та формування струму статора асинхронної машини, який **відрізняється** тим, що формують з сигналу помилки по швидкості сигнал завдання моменту, обмежують момент в залежності від частоти, обчислюють значення швидкості та гранично допустимий струм, визначають максимальний момент, який двигун здатний забезпечити, перевантажувальний момент, формують перевантажувальний момент та частоту, нижче якої починається обмеження моменту на рівні перевантажувального, задають потік ротора при роботі з постійним потоком, або оптимізації потоку ротора в залежності від моменту, виконують обчислення частоти ковзання, здійснюють обчислення поточного кута повороту потоку ротора, обмежують частоти нижче номінальної для зростання граничного моменту.



Комп'ютерна верстка В. Мацело

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

ДП “Український інститут інтелектуальної власності”, вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601