



УКРАЇНА

(19) UA (11) 27549 (13) U  
(51) МПК (2006)  
H02M 7/00МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ПАТЕНТУ  
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬвидається під  
відповідальність  
власника  
патенту**(54) СПОСІБ ПРЯМОГО МІКРОПРОЦЕСОРНОГО КЕРУВАННЯ ВИПРЯМЛЯЧЕМ ЗА ОБЧИСЛЮВАЛЬНИМИ ПРОГНОЗАМИ**

1

(21) u200705586

(22) 21.05.2007

(24) 12.11.2007

(72) СОКОЛ ЄВГЕНІЙ ІВАНОВИЧ, UA, КІЯШКО БОРИС ОЛЕКСАНДРОВИЧ, UA, ДОМНІН ІГОР ФЕЛІКСОВИЧ, UA, БАХНОВ ЛЕОНІД ЄВГЕНІЙОВИЧ, UA, СУНАНТО ????, UA, ТИМЧЕНКО МИКОЛА ОЛЕКСАНДРОВИЧ, UA, ІВАНОВ ОЛЕКСАНДР ЄВГЕНІЙОВИЧ, UA

(73) НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ", UA, ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ ІНСТИТУТ "ХАРКІВСЬКИЙ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИЙ ЗАВОД", UA

(56)

(57) 1. Спосіб керування тиристорним перетворювачем за обчислювальними прогнозами, який полягає у тому, що задають струм навантаження, вимірюють фактичний струм навантаження, вимірюють протиерс навантаження та визначають момент подачі чергових імпульсів керування на тиристори на кожному інтервалі дискретності, який **відрізняється** тим, що величину струму навантаження, що задається на наступний інтервал провідності, визначають під час комутації на поточному інтервалі провідності за допомогою розв'язання основного електромеханічного рівняння електроприводу постійного струму відносно струму якорного ланцюга двигуна  $i_a$  для двох його значень, а саме: поточного та значення, яке повинно бути досягнуто на момент наступної комутації з урахуванням заданого на цей момент прискорення швидкості (темпу розгону), яке обчислюється як різниця значень заданої та поточної швидкості, що

2

є помноженою на коефіцієнт пропорційності, та поточного значення прискорення швидкості, яке визначається за допомогою числових методів обчислювання похідної за трьома точками виміру - поточного значення, значення, яке було отримане на попередньому кроці дискретизації, та значення, яке було виміряне два кроки тому відносно поточного моменту часу.

2. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що момент подачі чергових імпульсів керування на тиристори на кожному інтервалі дискретності визначається рівністю двох збільшень струмів, а саме: збільшення струму, яке необхідно відробити, щоб усунути помилку за швидкістю, яке обчислюється з поточного значення струму, та значення струму, яке було заданим під час попередньої комутації, що обчислено згідно з п. 1 на підставі різниць заданої та поточної швидкостей, та збільшення струму, яке буде відроблено від моменту поточної комутації до передбачуваного моменту наступної комутації, яке обчислюється за допомогою інтегрування різниці між кривою вихідної напруги перетворювача та протиерс навантаження на вказаному інтервалі, при цьому протиерс навантаження обчислюється з поточної швидкості двигуна, помноженої на конструктивний коефіцієнт двигуна, а момент передбачуваної комутації (передбачуваний кут керування на наступний інтервал провідності перетворювача) обчислюється як арккосинус відношення різниці поточного значення протиерс навантаження та падіння напруги на активному опорі ланцюга якоря двигуна, та постійній складовій випрямленої напруги перетворювача.

Корисна модель належить до перетворювальної техніки і може бути використаний для керування перетворювачем змінного струму в постійний, навантаженням якого є двигун постійного струму.

Відомим є спосіб керування випрямлячем, що працює на активно - індуктивне навантаження, що містить протиЕРС, який полягає у тому, що

момент подачі чергових імпульсів на тиристори на кожному інтервалі провідності визначається шляхом розв'язання рівнянь, що описують перехідні процеси в електричному ланцюзі навантаження [Шипило В. П. Операторно-рекуррентный анализ электрических цепей и систем. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 312 с. - ISBN 5-283-00645-X]. Розв'язання провадиться

(19) UA (11) 27549 (13) U

операторно-рекурентним методом, при цьому, значення поточного моменту комутації (кута керування перетворювачем)  $\alpha_0$  с функцією від однієї з поточних координат самої системи, наприклад, вихідного сигналу регулятора струму (с. 273).

Недоліком наведеного способу є, по-перше, наявність інтегрального регулятора, при якому досить важко усунути перерегулювання за струмом, а по-друге, у наведеному способі не є очевидним спосіб регулювання швидкості обертання вала двигуна.

Відомим є спосіб керування випрямлячем, що працює на активно - індуктивне навантаження, що містить протиЕРС, який полягає у тому, що задають струм навантаження, вимірюють фактичний струм навантаження вимірюють протиЕРС навантаження та визначають за допомогою розв'язання диференціального рівняння навантаження момент подачі чергових імпульсів на тиристори на кожному інтервалі дискретності [А. с. №1539934 ССРС, МКИ Н 02 М 7/48. Спосіб управління тиристорним преобразователем / Серов Н. А., Чучалов В. А., Муселимян С. А. и др.]

Наведений спосіб керування обирається прототипом.

Недоліком даного способу керування є те, що він не враховує електромеханічних процесів у навантаженні, в наслідок чого є неможливим регулювання швидкості обертання вала двигуна із заданим темпом розгону. Також табличний метод опису синусоїди з постійним шагом є джерелом похибки у розрахунках. Застосований у прототипі метод чисельно інтегрування, а саме, метод прямокутників є найменш точним, та внаслідок цього вносить погрішність, знак та величина якої є змінними.

Корисна модель спрямована на розв'язання технічної задачі підвищення якості перехідних процесів. Технічним результатом корисної моделі є регулювання швидкості обертання вала двигуна із заданим темпом розгону.

Вирішення поставленої задачі досягається тим, що вимірюють фактичний струм навантаження та визначають момент подачі чергових імпульсів керування таким чином, щоб фактичний струм навантаження досяг заданого значення за один інтервал дискретності без перерегулювання. Потім визначають інтервал дискретності через перетин гладкої складової напруги  $U_{гл}$  з черговою синусоїдою. Визначають залежність гладкої складової напруги  $U_{гл}$  від часу на майбутній інтервал дискретності. За відомою  $U_{гл}$  та стану мережі визначають чергову синусоїду напруги мережі, що повинна підключатися до навантаження в майбутньому інтервалі дискретності. Визначають значення інтегралу від різниці чергової синусоїди напруги мережі та  $U_{гл}$  в межах від поточного моменту до закінчення інтервалу дискретності. Вимірюють напругу тиристорного перетворювача та визначають значення інтегралу від різниці  $U_{гл}$  та напруги тиристорного перетворювача в межах від початку інтервалу дискретності до поточного моменту

часу. Під час рівності вказаних інтегралів видають імпульси на ті тиристори, які підключають чергову синусоїду напруги мережі до навантаження. Наприкінці поточного інтервалу дискретності повторюють дії щодо розрахунку майбутнього інтервалу.

З метою підвищення якості перехідних процесів величину струму навантаження, що задається на наступний інтервал провідності, визначають під час комутації на поточному інтервалі провідності за допомогою розв'язання основного електромеханічного рівняння електродвигуна постійного струму:

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = M_M - I_{ST} \quad (1)$$

де  $J$  - момент інерції,

$\Omega$  - швидкість обертання вала двигуна,

$t$  - час,

$M_M$  - момент на валу двигуна,

$I_{ST}$  - статичний момент.

Розв'язання провадиться відносно струму якірного ланцюга двигуна  $i_a$  для двох його значень, а саме: поточного та значення яке повинно бути досягнуто на момент наступної комутації з урахуванням заданого на цей момент прискорення

швидкості (темпу розгону)  $\frac{d\Omega}{dt}$ , яке обчислюється як різниця значень заданої  $\Omega_0$  та поточної  $\Omega$  швидкості, що є помноженою на коефіцієнт пропорційності  $k$ , та поточного значення

прискорення швидкості  $\frac{d\Omega}{dt}$ , яке визначається за допомогою чисельних методів обчислювання похідної за трьома точками виміру - поточного значення  $\Omega$ , значення яке було отримане на попередньому кроці дискретизації  $\Omega_{n-1}$ , та значення яке було виміряне два кроки тому відносно поточного моменту часу  $\Omega_{n-2}$ .

При цьому, момент подачі чергових імпульсів керування на тиристори на кожному інтервалі дискретності визначається рівністю двох збільшень струмів, а саме: збільшення струму яке необхідно відробити щоб усунути помилку за швидкістю  $\Delta i$ , яке обчислюється з поточного значення струму  $i_a$  та значення струму яке було заданим під час попередньої комутації  $i_{SET}$ , та збільшення струму яке буде відроблено від моменту поточної комутації до передбачального моменту наступної комутації  $\Delta i_a$ :

$$\Delta i_a = i_{SET} - i_a \quad (2)$$

При цьому збільшення струму  $\Delta i_a$  обчислюється за допомогою інтегрування різниці між кривою вихідної напруги перетворювача та протиЕРС навантаження на вказаному інтервалі

$$\Delta i_a = \frac{1}{L} \int_0^t (e_n - e_g) dt \quad (3)$$

де  $L$  - індуктивність обмотки якоря,

$e_n$  - вихідна напруга перетворювача,

$e_g$  - значення протиЕРС двигуна, що обчислюється з поточної швидкості двигуна, та при сталому режимі дорівнює

$$e_g = \Omega C; \quad (4)$$

де  $C$  - конструктивний коефіцієнт двигуна.  
Момент передбачальної комутації

(передбачальний кут керування  $\alpha_1$ , на наступний інтервал провідності перетворювача) обчислюється як арккосинус відношення різниці поточного значення протиЕРС навантаження та падіння напруги на активному опорі  $R_a$  ланцюга якоря двигуна, та постійній складовій випрямленої напруги перетворювача  $U_{d0}$

$$\alpha_1 = \arccos\left(\frac{E_M - i_{SET} \cdot R_a}{U_{d0}}\right), \quad (5)$$

На Фіг.1 зображений електричний ланцюг навантаження перетворювача, при цьому електродвигун постійного струму замінено його еквівалентною схемою.

Фіг.2 є поясненням до процесів описаних виразами 9-15.

Фіг.3 містить структурну схему електромеханічної системи, яка здійснює наведений спосіб керування.

Пристрій за фіг.1 містить: 1 - мікропроцесор, 2 - датчик нуля лінійної напруги вхід якого підключений до двох фаз мережі, а вихід - до одного з входів переривачів мікропроцесора 1, 3 - формувач імпульсів керування, 4 - трифазний мостовий керований випрямляч, 5 - датчик струму навантаження, що вимірює струм якорного ланцюга двигуна 6, та отримує значення подає на вхід АЦП 7, 6- двигун постійного струму (навантаження), якорний ланцюг котрого живиться від випрямляча 4, а порушення здійснюється з будь-якого іншого джерела постійного струму та на схемі не вказано, 7 та 9 - аналого-цифрові перетворювачі, 8 - таймер, 10 - датчик обертання валу двигуна, на виході якого видається сигнал постійної напруги пропорційний кутовий швидкості обертання валу двигуна 6.

Датчик нуля лінійної напруги 2 формує імпульси синхронізації з появою яких мікропроцесор 1 перезапускає таймер 8, який здійснює відлік поточного кута керування перетворювача. Датчик 5 вимірює струм якорного ланцюга та за допомогою АЦП 7 результат вводиться до мікропроцесору. Інформація про швидкість обертання вводиться до мікропроцесору за допомогою датчика 10 та АЦП 9. Виміряні значення поточного струму  $i_a$  якорного ланцюга та швидкості обертання  $\Omega$  напряму пов'язані з моментом на валу двигуна  $M_M$  та величиною протиЕРС навантаження  $E_M$  згідно з виразами 6 та 7.

$$E_M = \Omega \cdot C; \quad (6)$$

$$M_M = i_a \cdot C; \quad (7)$$

де  $C$  - конструктивний коефіцієнт двигуна.

Як відомо, процеси у електроприводі постійного струму описуються виразом 1.

Якщо узяти диференціал за часом від виразу 1, та від моменту на валу двигуна перейти до струму якоря, то при переході від похідної до кінцевих збільшень отримаємо вираз:

$$\Delta i = \frac{J}{C} \cdot \Delta\left(\frac{d\Omega}{dt}\right); \quad (8)$$

де  $\Delta i$  - збільшення струму яке необхідно відробити перетворювачу, щоб уникнути помилки за швидкістю при регулюванні,

$$\Delta\left(\frac{d\Omega}{dt}\right) = \frac{d\Omega_0}{dt} - \frac{d\Omega}{dt}; \quad (9)$$

де  $\frac{d\Omega_0}{dt}$  - темп розгону, що є заданим,

$\frac{d\Omega}{dt}$  - дійсний темп розгону двигуна.

Дійсний темп розгону обчислюється на підставі поточного значення швидкості обертання валу двигуна та двох попередніх значень, що вимірюються мікропроцесором із частотою обчислювання моменту комутації тиристорів, за допомогою методу чисельного диференціювання:

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{2 \cdot \tau} (1,5 \cdot \Omega_n - 2 \cdot \Omega_{n-1} + 0,5 \cdot \Omega_{n-2}); \quad (10)$$

де  $\tau$  - період обчислювань моменту комутації тиристорів,

$\Omega_n$  - поточне значення швидкості обертання валу двигуна,

$\Omega_{n-1}$ , та  $\Omega_{n-2}$  - значення швидкості на двох попередніх моментах обчислювання.

На підставі аналізу виразів 8 та 9 можна зробити висновок про те, що при потенційній можливості досягнення заданого струму за один такт перетворювача, необхідний темп розгону двигуна також буде досягнуто за один такт.

Заданий темп розгону  $\frac{d\Omega_0}{dt}$  напряму залежить від помилки регулювання і може бути врахований як:

$$\frac{d\Omega_0}{dt} = k \cdot (\Omega_0 - \Omega); \quad (11)$$

де  $\Omega_0$  - кутова швидкість обертання валу двигуна, що є заданою,

$k$  - коефіцієнт пропорційності.

Отримане за виразом 8 збільшення струму повинно бути додане до поточного значення струму у навантаженні:

$$i_{SET} = i_a + \Delta i \quad (12)$$

де  $i_{SET}$  - значення струму навантаження перетворювача, що є заданим на наступний такт перемикання тиристорів перетворювача.

Враховуючі рівняння ланцюга навантаження зображеного на фіг.2 різниця між поточним струмом якоря в момент коли відбулась чергова комутація та струмом який буде досягнутий на момент наступної комутації  $\Delta i_a$ , без урахування активного опору обмотки якоря обчислюється за виразом 3.

Вихідна напруга перетворювача може бути визначена за виразом:

$$e_n = E_m \cos\left(\omega t + \alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right) \quad (13)$$

де  $E_m$  - амплітуда лінійної напруги мережі,

$\alpha_0$  - поточний кут керування перетворювачем,  $m$  - пульсність, що для трифазного мостового випрямляча дорівнює  $m = 6$ .

З урахуванням виразу 13 та процесів зображених на фіг.3:

$$\Delta i_a = \frac{1}{L} \int_0^{t_1} E_m \cos\left(\omega t + \alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right) dt - \frac{1}{L} \int_0^{t_1} E_g dt = \frac{E_m}{\omega L} \sin\left(\omega t + \alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right) \Big|_0^{\alpha_1 - \alpha_0 + \frac{2\pi}{m}} - \frac{E_g}{L} t_1 \quad (1)$$

де  $t_1 = \frac{\alpha_1 - \alpha_0 + \frac{2\pi}{m}}{\omega}$  - момент наступної комутації,

під час якої  $\alpha_1$  - передбачуваний кут керування на наступний інтервал провідності, що обчислюється за виразом 5.

$0'$  - момент поточної комутації.

Після перетворення отримуємо:

$$\Delta i_a = \frac{E_m}{\omega L} \left[ \sin\left(\alpha_1 + \frac{\pi}{m}\right) - \sin\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right) \right] - \frac{E_m}{\omega L} \left( \alpha_1 - \alpha_0 + \frac{2\pi}{m} \right), \quad (1)$$

На підставі виразів 2 та 15 якщо прирівняти збільшення струмів, на кожному інтервалі комутації є можливим визначення моменту перемикання ключів. Чергова комутація повинна відбутися якщо

$$(i_{SET} - i_a) \geq \frac{E_m}{\omega L} \left[ \sin\left(\alpha_1 + \frac{\pi}{m}\right) - \sin\left(\alpha_0 - \frac{\pi}{m}\right) \right] - \frac{E_m}{\omega L} \left( \alpha_1 - \alpha_0 + \frac{2\pi}{m} \right), \quad (16)$$

при цьому  $i_{SET}$  обчислюється за виразом 12 виходячи з різниці заданого та поточного темпів розгону.

Рішення про видачу чергових імпульсів комутації приймається мікропроцесором 1 (Фіг.1) при обчислюванні виразу 16. При цьому, поточний

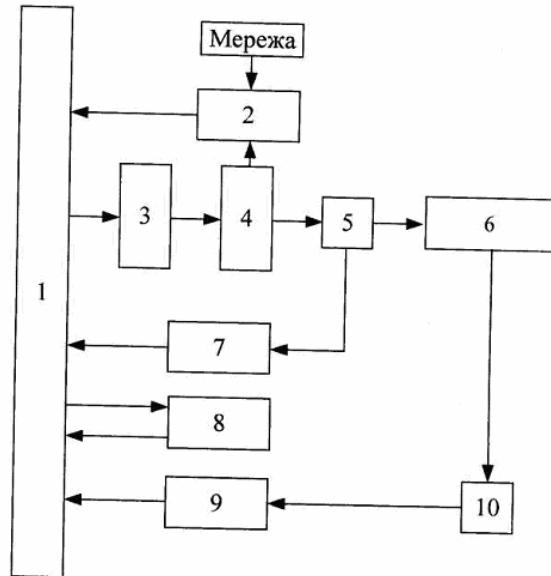
кут керування перетворювачем  $\alpha_0$ , відраховується від моменту попередньої комутації шляхом перерахунку часу, який пройшов від початку періоду мережі та який вимірюється таймером 8.

Таким чином, наведений спосіб керування тиристорним перетворювачем дає можливість регулювати швидкість обертання валу двигуна із заданим темпом розгону, а також здійснює регулювання струму навантаження без явного інтегрування. При цьому необхідні тригонометричні обчислювання (вирази 5 та 16) обчислюються мікропроцесором шляхом розкладання необхідної функції в ряд.

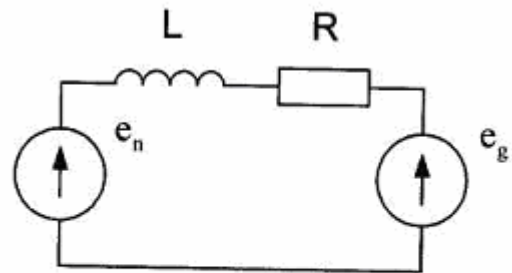
Джерела інформації

1. Шипило В. П. Операторно-рекуррентный анализ электрических цепей и систем. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 312 с.

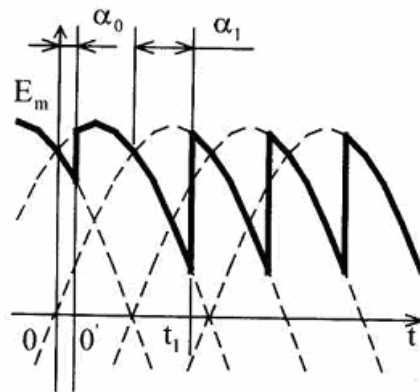
2. А. с. №1539934 СССР, МКИ Н 02 М 7/48. Способ управления тиристорным преобразователем / Серов Н. А., Чучалов В. А., Муселимян С. А. и др.



Фіг. 1



Фіг. 2



Фіг. 3