

УДК: 681.3+615.89

**Ю. М. Маринич, Ю. М. Гуменюк**

## **ВПЛИВ ІНДУКТИВНОСТІ ФАЗ НА ТОЧНІСТЬ ДВИГУНА- МАХОВИКА**

### **Вступ**

Стрімкий розвиток космічних технологій та їх вихід на нанорівень висуває нові вимоги до відповідної елементної бази для побудови високоефективних систем керування кутовим рухом супутника. Одним з найпоширеніших методів кутової стабілізації та орієнтації космічних апаратів є системи, виконуваними органами яких є двигуни-маховики (ДМ). Відома публікація [1], в якій описано основні технічні рішення побудови ДМ на базі безколекторного двигуна постійного струму з широтно-імпульсним керуванням без врахування впливу індуктивності силових котушок ДМ на закон керування.

При розробці контуру керування основною вимогою до ДМ є забезпечення пропорційності між зовнішнім сигналом керування та створюваним реактивним моментом на всьому діапазоні частот обертання ротора ДМ.

### **Постановка задачі**

Метою роботи є забезпечення стабільності закону управління ДМ, побудованого на БДПС із безпазовим статором та з широтно-імпульсним керуванням [2, 3, 4] з єдиним для всіх фаз перетворювачем код-ШІМ, в широкому діапазоні частот обертання за рахунок компенсації впливу індуктивності котушок фаз.

### **Схема керування ДМ та логіка перетворення інформації в контролері**

Відома публікація [1], в якій на прикладі двохфазного безколекторного двигуна постійного струму (БДПС) показано загальний принцип побудови ДМ з використанням одного пристрою формування імпульсів ШІМ для управління всіма фазами мотора. Вплив індуктивності котушок фаз мотора на стабільність закону керування ДМ, через затримку по фазі струму в фазах мотора відносно середньої напруги управління (за період ШІМ), яка по формі співпадає з імпульсами датчиків положення. Це призводить до залежності коефіцієнта перетворення ДМ від поточної кутової швидкості.

Розглянемо схему конструкції ДМ, побудованого на базі безколекторного трифазного шестиполюсного двигуна постійного струму з безпазовим статором. Взаємне розташування елементів конструкції ДМ схематично показано на рис. 1. Він містить магнітопроводи 5, які обертаються разом з ротором, перетворювачі Хола ДХ1, ДХ2, ДХ3 закріплені на корпусі і зв'язані потоком індукції з радіально намагніченими постійними магнітами 4, розташованими на роторі 6, котушки фаз статора, робочі витки відповідних фаз показані на рис. 1. в розрізі (1 – перша фаза, 2 – друга фаза, 3 – третя фаза).

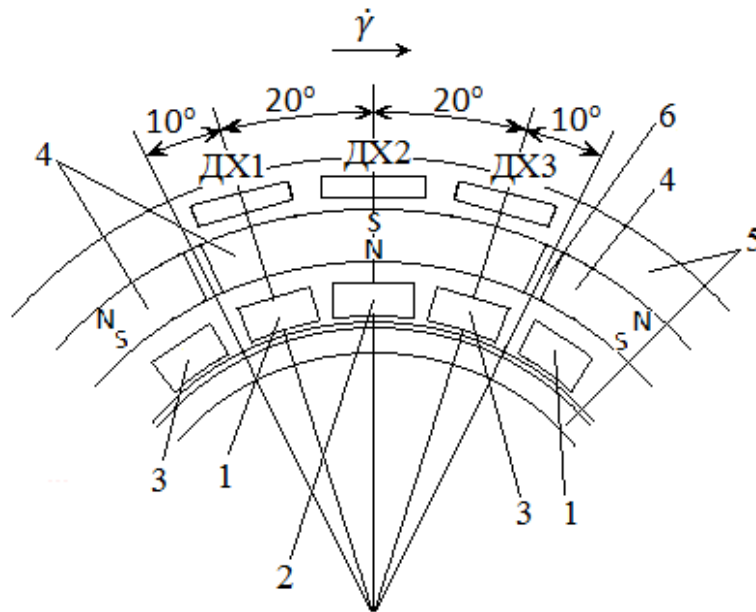


Рис. 1. Сектор шестиполюсного трифазного БДПС

Сигнали датчиків положення ротора  $U_{ДП1}$ ,  $U_{ДП2}$ ,  $U_{ДП3}$  (рис. 2.) формуються з сигналів датчиків Хола і представляють собою послідовність імпульсних сигналів прямокутної форми на ділянках квазіпостійного магнітного поля в місці розташування робочих котушок кожної фази.

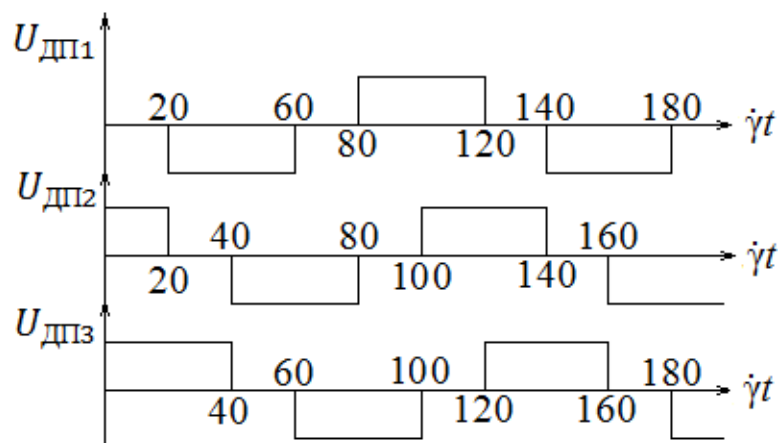


Рис. 2. Епюри сигналів  $U_{\text{ДП1}}$ ,  $U_{\text{ДП2}}$ ,  $U_{\text{ДП3}}$  відповідних датчиків положення ротора ДП1, ДП2, ДП3

При початковому взаємному розташуванні ротора двигуна маховика відносно датчиків положення (рис. 1.) і при напрямку обертання ротора за годинниковою стрілкою з кутовою швидкістю  $\dot{\gamma}$ , на виході датчиків положення ДП1, ДП2, ДП3 будуть формуватись три послідовності прямокутних імпульсів  $U_{\text{ДП1}}$ ,  $U_{\text{ДП2}}$ ,  $U_{\text{ДП3}}$  (рис. 2.), які відповідають проміжку активності відповідної фази двигуна-маховика. В сигналах  $U_{\text{ДП1}}$ ,  $U_{\text{ДП2}}$ ,  $U_{\text{ДП3}}$  всі імпульси мають тривалість 40 кутових градусів і проміжок між сусідніми імпульсами 20 кутових градусів, що забезпечує в кожний момент часу роботу 2-х фаз з однаковим струмом на створення обертового моменту.

Тривалість активності кожної фази двигуна-маховика змінюється зворотно пропорційно зміні кутової швидкості обертання. Через вплив індуктивності котушок струм в фазах двигуна-маховика змінюється по експоненті, а тому при великих значеннях швидкості обертання ротора середнє значення струму в кожній фазі буде відрізнятись від заданого значення і як наслідок не буде забезпечуватись пропорційність реактивного моменту двигуна маховика до сигналу керування на всьому діапазоні частот обертання двигуна-маховика. З метою усунення даного недоліку пропонується ввести в контур керування блок компенсації впливу індуктивності. Сигнал компенсації збільшує середню (за період ШІМ) напругу управління і, відповідно, струм в котушках двигуна-маховика в залежності від частоти обертання ротора. Величина сигналу компенсації розраховується виходячи з умови рівності площ двох фігур: перша фігура обмежена графіком струму в котушках без врахування індуктивності й являє собою прямокутник, який збігається по тривалості з імпульсом датчика положення відповідної фази; друга фігура обмежена графіком струму в котушках двигуна-маховика з врахуванням індуктивності і змінюється по експоненті. Оскільки тривалість імпульсу в обох випадках однакова, то рівність площ двох фігур буде забезпечуватись збільшенням амплітуди струму в другій фігурі. Виходячи з наведених умов було розраховано значення сигналу компенсації:

$$U_{\text{кор}} = \frac{U_{\text{сер}}(1 - e^{-\frac{\pi R}{18L|\dot{\gamma}|}})}{\frac{\pi R}{18L|\dot{\gamma}|} - (1 - e^{-\frac{\pi R}{18L|\dot{\gamma}|}})}$$

де  $U_{\text{кор}}$  – напруга сигналу компенсації впливу індуктивності котушок двигуна-маховика на закон керування;

$U_{\text{сер}}$  – середнє (за період ШІМ) значення напруги в котушках двигуна-маховика, яке залежить від сигналу керування;

$R$  – активний опір котушок двигуна-маховика;

$L$  – індуктивність котушок фаз ДМ;

$\dot{\gamma}$  – поточна кутова швидкість обертання ротора.

Оскільки наведений вираз є дуже громіздким та складним для відтворення в реальному контурі керування доцільним є його спрощення шляхом розкладу в степеневий ряд:

$$U_{\text{кор}} = U_{\text{сер}} \cdot (k|\dot{\gamma}| + k^2|\dot{\gamma}|^2 + k^3|\dot{\gamma}|^3 + \dots)$$

де  $k = \frac{18L}{\pi R}$ .

Таким чином в пристрої компенсації впливу індуктивності котушок двигуна-маховика на закон керування формуються сигнали пропорційні модулю кутової швидкості в ступені  $n$  ( $n = 1, 2, 3 \dots$ ), при чому значення  $n$  обирається з умови заданої точності компенсації цього впливу: чим більше значення  $n$ , тим вища точність компенсації впливу індуктивності котушок двигуна-маховика. Для більшості безпазових БДПС малої потужності (до десятків ват)  $n = 2$ , що забезпечує стабільність закону управління на рівні (2..5)%.

На рис. 3. зображено схема управління для трифазного БДПС, яка містить пристрій компенсації впливу індуктивності котушок ДМ на закон управління, який складається з блоків  $b_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ), в яких формуються модулі сигналів кутової швидкості в ступені  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ ), суматора 7 та керованого інвертора 8, на керований вхід якого подається сигнал керування з супутника, що забезпечує рівність знаків сигналу керування та сигналу компенсації впливу індуктивності котушок ДМ на закон управління.

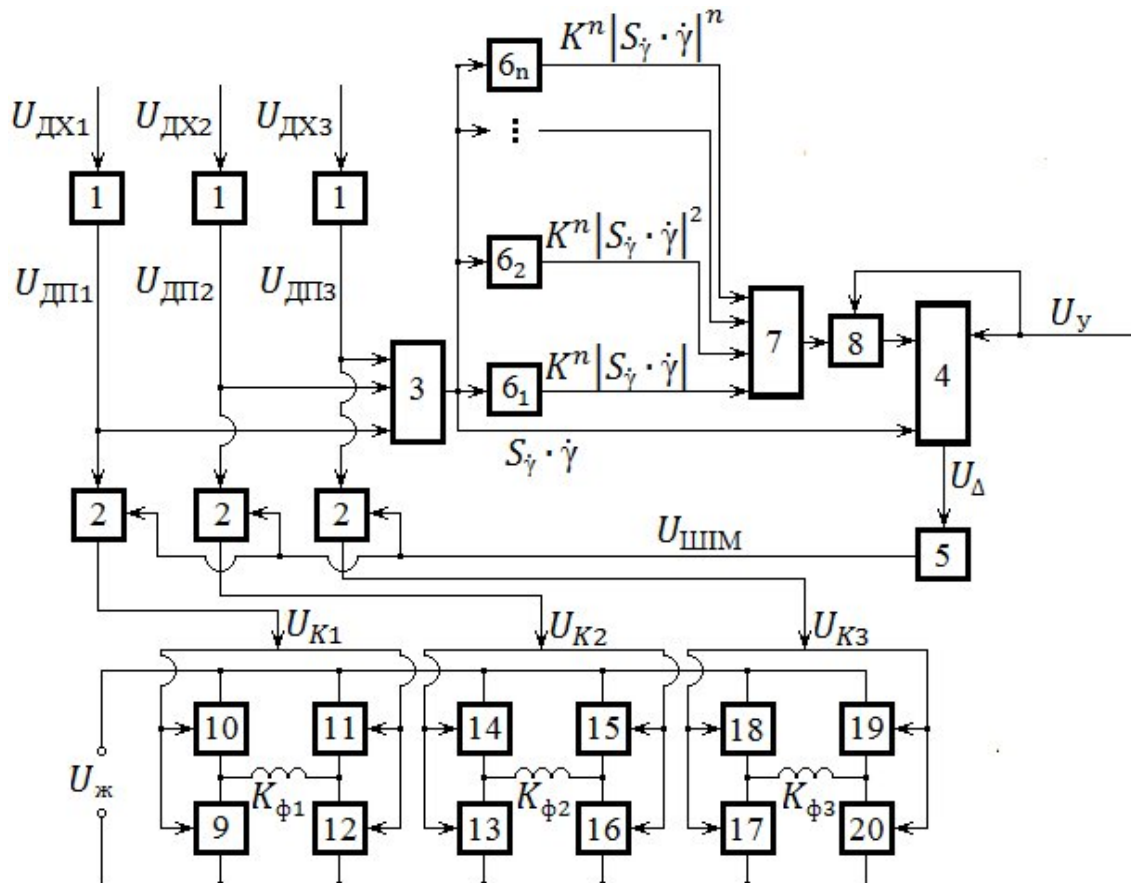


Рис. 3. Схема перетворення інформації і ключовий підсилювач потужності

На схемі перетворення інформації (рис. 3.) позначено:

- 1 – пристрій формування сигналів датчиків положення  $U_{дпi}$ , які представляють собою двополярні імпульсні сигнали, що збігаються за часом з ефективністю відповідних фаз ДМ;
- 2 – керовані інвертори, які при відсутності імпульсу широтно-імпульсної модуляції  $U_{ШІМ}$  пропускають сигнали  $U_{дпi}$  без перетворення, а при наявності імпульсу ШІМ – змінюють знак в сигналах  $U_{дпi}$ ;
- 3 – частотомір, що формує сигнал поточної кутової швидкості  $U_{\gamma} = S_{\gamma} \cdot \dot{\gamma}$  за сигналами  $U_{дпi}$ ,  $S_{\gamma}$  – крутизна; цей сигнал також подається на суматор 4 для компенсації проти-ЕРС;
- 4 – суматор, вихідний сигнал з якого  $U_{\Delta}$  визначає тривалість імпульсу ШІМ;
- 5 – перетворювач код-ШІМ;
- $6_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) – блоки компенсації впливу індуктивності силових котушок на закон керування, в яких формуються сигнали пропорційні  $\dot{\gamma}^i$  ( $i = 1, \dots, n$ ), при чому кількість блоків визначається з умови точності компенсації цього впливу,  $K$  – коефіцієнт підсилення, щоналаштовується.
- 7 – суматор;

- 8 – керований інвертор;
- 9...20 – нормально розімкнуті ключі;

Наведена логіка перетворення інформації разом з ключовим підсилювачем потужності забезпечують закон керування – пропорційність між реактивним моментом ДМ та сигналом керування з супутника.

### **Висновки**

Запропонований підхід дозволяє в ДМ з єдиним для всіх фаз перетворювачем код-ШІМ компенсувати вплив індуктивності силових котушок ДМ на закон керування з наперед заданою точністю у всьому діапазоні частот обертання ротора ДМ.

### **Список використаної літератури**

1. *Маринич Ю. М.* Двигун-маховик для управління кутовим рухом супутника [Текст] / Ю. М. Маринич, О. В. Збруцький // Механіка гіроскопічних систем. – 2011. – № 23. – С. 68–75.
2. Astrosyn International Technology Ltd. Special DC motors [Електронний ресурс] – Режим доступу: [http://astrosyn.com/section.php/3/1/special\\_dc\\_motors.html](http://astrosyn.com/section.php/3/1/special_dc_motors.html).
3. Microsat Systems Canada Inc. Development of reaction wheel attitude control systems [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.reactionwheel.com/products/index.html>.
4. *Marinich Yu. M.* Motor–hangwheel for satellite angular movement control [Text] / Yu. M. Marinich, A. V. Zbrutskiy // Вісник Черкаського Державного Технологічного Університету. – 2009. – Спецвипуск.–С. 66–68.