

*І.О. МІХЄЄВ*, студент НТУ «ХПІ»

## **ФОРМУВАННЯ ФАЗНИХ НАПРУГ, ПРИКЛАДЕНИХ ДО ОБМОТОК ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНОГО ДВИГУНА**

У статті розглянута та проаналізована методика формування фазних напруг, прикладених до обмоток вентильно-індукторного двигуна.

В статье рассмотрена и проанализирована методика формирования фазных напряжений, приложенных к обмоткам вентильно-индуктивного двигателя.

In the article considered and the analysed method of forming of phase naprug, enclosed to obmotok valve-inductor engine.

**Введення.** Для сучасного автомобіля характерна тенденція об'єднання функціональних систем. Розвиток електроніки, а також зростання необхідної потужності генератора дозволяє об'єднати елементи системи пуску та електропостачання в єдиному пристрої - стартер-генераторі (СГ). Це електрична машина, при пуску працює електродвигуном, а в нормальному робочому режимі - генератором. Таке поєднання дозволяє відмовитися від ряду пристроїв, що встановлюються на двигуні автомобіля (привід стартеру, шків ремінної передачі на генератор).

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** У роботі [1-3] детально викладена інформація про формування фазних напруг, прикладених до обмоток вентильно-індукторного двигуна.

**Методика формування фазних напруг вентильно-індукторного двигуна (ВІД).** Формування фазних напруг ВІД може здійснюватися або в функції часу, або в функції поточного кутового положення ротора. У першому випадку отримуємо синхронний режим роботи двигуна, в якому зі збільшенням моменту навантаження зростає кут навантаження, ротор відстає від обертового вектора МРС поля статора. Частота обертання ротора не залежить від моменту навантаження. Якщо момент навантаження перевищує максимальний синхронізуючий момент, то двигун випадає із синхронізму. Різке збільшення моменту навантаження, швидка зміна темпу обурюючого (управляючого) впливу також викликають порушення умов синхронізму. При обертаючому роторі двигун має властивість самосинхронізації. Пуск в синхронному режимі ВІД можливий частотними методами. Для узгодження електромагнітних і електромеханічних процесів у часі необхідно, щоб темп зміни керуючого або обурюючого впливу відповідав електромеханічній постійній часу приводу. При введенні зворотного зв'язку по положенню ротора, коли фазні напруги формуються у функції кута повороту, отримуємо ВІД, у якого збільшення моменту навантаження викликає зменшення частоти обертання ротора. Характеристики ВІД подібні двигуну постійного струму з

послідовним збудженням. Пусковий момент у межах між комутаційного інтервалу, рівного кроку ВРД, відповідає синхронізуючому моменту.

Для аналітичного запису фазних напруг, прикладених до обмоток двигуна, скористаємося комутаційною функцією  $\gamma$ , спосіб обчислення якої визначається способом формування напруг. При формуванні фазних напруг у функції часу комутаційна функція:

$$\gamma = E \left[ \frac{t_i}{T_\lambda} \right], \quad T_\lambda = \frac{2\pi}{n_{\dot{a},\dot{e}} m \omega_c} = \frac{1}{n_{\dot{a},\dot{e}} m f_1}, \quad (1)$$

де  $E$  – функція, що визначає цілу частину числа;

$t_i$  – поточний час;

$T_\lambda$  – тривалість однополярного імпульсу фазної напруги;

$m$  – число фаз;

$f_1$  – частота однополярної фазної напруги;

$\omega_c$  – частота обертання поля статора;

$n_{\dot{a},\dot{e}}$  – коефіцієнт, що враховує режим роботи інвертора напруги, при одиночній та парній комутації фаз -  $n_{\dot{a},\dot{e}} = 1$ , при комбінованій комутації фаз  $n_{\dot{a},\dot{e}} = 2$ .

При формуванні фазних напруг у функції поточного положення ротора комутаційна функція, що описує дискретність перемикання транзисторів вентильного комутатора, має вигляд:

$$\gamma_\alpha = E \left[ \frac{\Theta_i + \Theta_{\dot{m}} + \beta}{n_{\dot{a},\dot{e}} \alpha} \right], \quad (2)$$

де  $\Theta_i$  – поточний кут повороту ротора;

$\Theta_{\dot{m}}$  – початкове кутове зміщення між віссю фази А і віссю найближчого зубця ротора;

$\beta$  – кут випередження включення транзисторів.

Необхідна для забезпечення випереджального перемикання фаз по відношенню до поточного положення ротора кутове зміщення на 90 ел. град, формується в комутаційній функції вентильного комутатора.

Комутаційні функції  $\gamma_\alpha$  і  $\gamma_\alpha$  представляють собою необмежений натуральний ряд чисел. Для обмеження чисельних значень комутаційних функцій межами одного ел. обороту  $\gamma_\alpha$  і  $\gamma_\alpha$  необхідно нормувати за допомогою R- функції, визначаючої цілочисельний залишок від ділення:

$$\gamma = R \left[ \frac{\gamma_{l,\alpha}}{n_{a,e} m} \right], \quad \gamma_{y\ddot{e}} = 0, 1, 2, \dots, (n_{a,e} m - 1), 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

За допомогою комутаційної функції, що приймає цілочисленні значення, вдається не тільки аналітично записати дискретні фазні напруги, але й отримати простий алгоритм перемикання транзисторів вентильного комутатора, зручний при мікропроцесорній реалізації системи управління ВІД.

У вентильному комутаторі ВІД формується в кожній фазі однополярна імпульсна напруга, тривалість і форма якого залежать від числа фаз двигуна і режиму роботи вентильного комутатора. Аналітично записати в загальному випадку формуючі фазні напруги ВІД не представляється можливим. В окремих випадках при обмеженому числі фаз (трьох або чотирьох) вдається отримати математичний опис напруги в ВІД за допомогою декількох тригонометричних функцій, в яких комутаційна функція є аргументом.

У системі управління чотирьохфазним ВІД для реалізації режиму одиночної комутації фаз формуються однополярні фазні напруги, форма яких наведена на рис. Тривалість відкритого стану транзисторів у цьому випадку  $\lambda_{\min} = 2\pi / m = \pi / 2$ . Комутаційна функція приймає чотири нормованих значення:  $\gamma_{y\ddot{e}} = 0, 1, 2, 3$ . Фазну напругу запишемо за допомогою трьох складових: постійної напруги –  $U_0$ , прямої послідовності зворотній послідовності –  $U_{i\delta}$  та зворотної послідовності  $U_{i\dot{\alpha}\delta}$ .

$$U_{ik}^{o,k} = U_0 + U_{i\delta} + U_{i\dot{\alpha}\delta} = \frac{U_n}{4} + \frac{U_n}{2} \cos \left[ \frac{\pi}{2} (\gamma_{y\ddot{e}} - (k-1)) \right] + \frac{U_n}{4} \cos [\pi (\gamma_{y\ddot{e}} - (k-1))], \quad (4)$$

де  $k = 1, 2, 3, 4$  – порядковий номер фази обмотки статора.

Такий вибір функцій розкладання фазних однополярних імпульсних напруг не є випадковим. Кожна складова напруги має певний фізичний зміст.

Постійна складова  $U_0$  відповідає середньому значенню фазної напруги, не залежить від поточного положення ротора, є еквівалентною напругою збудження. Вектор еквівалентної напруги збудження дискретно переміщається по розточуванню статора при кожній комутації фаз.

Друга складова  $U_{i\delta}$  – це змінна прямокутна напруга, частота обертання якої відповідає частоті обертання поля статора. Третя складова  $U_{i\dot{\alpha}\dot{\alpha}}$  - це змінна прямокутна напруга, що обертається з подвійною частотою по відношенню до поля статора. Вона умовно називається зворотною складовою і існує, коли тривалість відкритого стану транзисторів не дорівнює  $\pi$ . Середні значення  $U_{i\delta}$  і  $U_{i\dot{\alpha}\dot{\alpha}}$  за ел. період дорівнюють нулю.

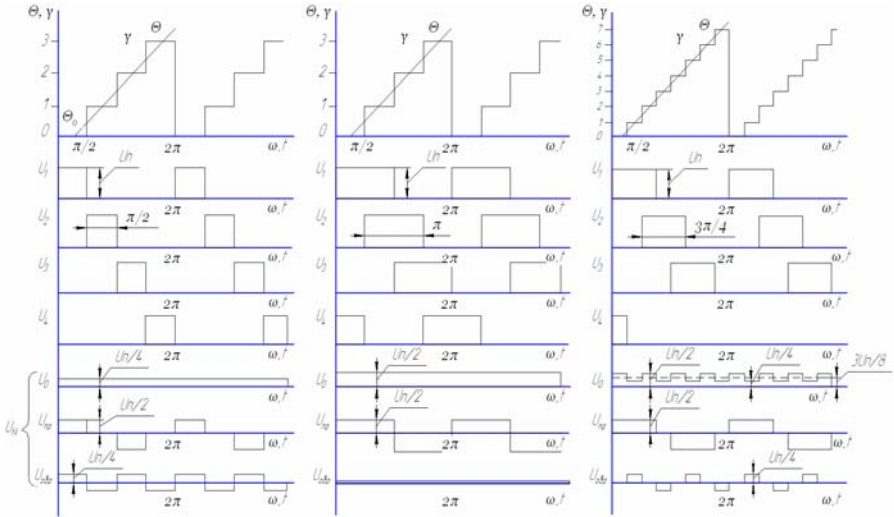


Рисунок – Формування фазних напруг ВІД

Запишемо рівняння для фазних напруг  $U_{tk}^{o.k}$  в матричній формі:

$$U_{tk}^{o.k} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{U_n}{4} + \frac{U_n}{2} \cos\left(\frac{\pi}{2} \gamma_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}}\right) + \frac{U_n}{4} \cos(\pi \gamma_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}}) \\ \frac{U_n}{4} + \frac{U_n}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2} \gamma_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}}\right) - \frac{U_n}{4} \cos(\pi \gamma_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}}) \\ \frac{U_n}{4} - \frac{U_n}{2} \cos\left(\frac{\pi}{2} \gamma_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}}\right) + \frac{U_n}{4} \cos(\pi \gamma_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}}) \\ \frac{U_n}{4} - \frac{U_n}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2} \gamma_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}}\right) - \frac{U_n}{4} \cos(\pi \gamma_{\dot{\alpha}\dot{\alpha}}) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

При формуванні фазних напруг у функції поточного положення ротора необхідно ввести додатковий кутовий зсув у бік випередження на 90 ел. град. Для чотирьохфазної ВІД за одиночної та парної комутації маємо чотири нормованих значення комутаційної функції за один ел. оберт. Одиничний зсув комутаційної функції відповідає кутовому зсуву 90 ел. град., отже, комутаційні функції пов'язані співвідношенням  $\gamma_\alpha = \gamma_l + 1$ . Перетворене рівняння для фазних напруг, що формуються у функції поточного положення ротора:

$$U_{\alpha k}^{o.k} = U_0 + U_{i\delta} + U_{i\dot{\alpha}\delta} = \frac{U_n}{4} + \frac{U_n}{2} \cos \left[ \frac{\pi}{2} (\gamma_{y\dot{\epsilon}} - (k-2)) \right] + \frac{U_n}{4} \cos [\pi (\gamma_{y\dot{\epsilon}} - (k-2))]. \quad (6)$$

Рівняння фазних напруг  $U_{\alpha k}^{o.k}$  в матричній формі має вигляд:

$$U_{\alpha}^{o.k} = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{U_n}{4} - \frac{U_n}{2} \sin \left( \frac{\pi}{2} \gamma \right) - \frac{U_n}{4} \cos(\pi \gamma) \\ \frac{U_n}{4} + \frac{U_n}{2} \cos \left( \frac{\pi}{2} \gamma \right) + \frac{U_n}{4} \cos(\pi \gamma) \\ \frac{U_n}{4} + \frac{U_n}{2} \sin \left( \frac{\pi}{2} \gamma \right) - \frac{U_n}{4} \cos(\pi \gamma) \\ \frac{U_n}{4} - \frac{U_n}{2} \cos \left( \frac{\pi}{2} \gamma \right) + \frac{U_n}{4} \cos(\pi \gamma) \end{pmatrix}. \quad (7)$$

У режимі парної комутації фаз чотирьохфазної ВІД час відкритого стану транзисторів складає:  $\lambda_{\max}$ . Нормовані значення комутаційної функції для даного режиму  $\gamma_{y\dot{\epsilon}} = 0, 1, 2, 3$ . Фазні напруги для режиму парної комутації записуються у вигляді двох складових: постійної і прямої послідовності. Зворотна послідовність напруги відсутня через  $\gamma_{\max} = \pi$ . Напруження формуються у функції часу

$$U_{ik}^{r.k} = \frac{U_n}{2} + \frac{\sqrt{2}U_n}{2} \cos \left[ \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4} \gamma_{y\dot{\epsilon}} \right) \frac{\pi}{2} (k-1) \right]. \quad (8)$$

Фазні напруги чотирьохфазної ВІД для парної комутації, що формуються у функції поточного положення ротора, з урахуванням додаткового зсуву комутаційної функції у бік випередження:

$$U_{\alpha}^{i,k} = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{U_n + \sqrt{2}U_n \cos\left(\frac{\pi}{4}(1+2\gamma)\right)}{2} \\ \frac{U_n - \sqrt{2}U_n \cos\left(\frac{\pi}{4}(1+2\gamma)\right)}{2} \\ \frac{U_n - \sqrt{2}U_n \cos\left(\frac{\pi}{4}(1+2\gamma)\right)}{2} \\ \frac{U_n + \sqrt{2}U_n \cos\left(\frac{\pi}{4}(1+2\gamma)\right)}{2} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

У режимі комбінованої комутації фаз ВІД відбувається чергування одиночної та парної комутації. На рис., «наведені комутаційна функція, фазні напруги і функції розкладання, що дозволяють аналітично записати фазні напруги. Тривалість відкритого стану транзисторів становить  $\lambda = 3\pi/4$ . Комутаційна функція в межах одного електричного обороту має вісім чисельних нормованих значень  $\gamma_{ye} = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ . Фазні напруги двигуна в режимі комбінованої комутації запишемо також за допомогою трьох складових:  $U_0, U_{i\dot{\alpha}}, U_{i\dot{\alpha}\dot{\alpha}}$ . Постійна складова, еквівалентна напрузі збудження, містить два члени: перший - середнє значення одно-полярного імпульсного напруги, другий – змінна складова, що змінюється в протифазі з напругою в зворотній послідовності. Напруга  $U_{i\dot{\alpha}\dot{\alpha}}$  виникає тільки тоді, коли струм протікає по одній фазі двигуна. Напруга к-ї фази обмотки ВІД при комбінованій комутації записується у вигляді

$$U_k = \frac{3U_n}{8} + \frac{U_n}{8} \cos \left[ \pi\gamma_{ye} - \frac{\pi}{2}(k-1) \right] + \frac{U_n}{2} \sin g \left[ \cos \left\{ \frac{\pi}{4}(\gamma_{ye} - 1) - \frac{\pi}{2}(k-1) \right\} \right] + \frac{U_n}{2} \sin \left[ \pi\gamma_{ye} - \frac{\pi}{2}(k-1) \right]. \quad (10)$$

**Висновки.** Вентильний двигун може стати успішною альтернативою колекторного двигуна в приводі електромобіля – за принципом дії і реалізованими характеристиками вони дуже близькі з двигуном постійного струму послідовного з'єднання. Вентильний двигун являє собою електромеханічний перетворювач, забезпечений електронною системою управління. Конструкція електромеханічного перетворювача і схемне рішення системи управління відрізняються різноманітністю і прив'язуються до конкретних умов експлуатації.

**Список літератури:** 1. *Трененков И.И.* Эксплуатационные показатели сельскохозяйственных тракторов. – М: Машгиз, 1963. – 271 с. 2. *Барский И.Б.* Конструирование и расчет тракторов. – М.: Машиностроение, 1980. – 336 с. 3. *Ключев В.И.* Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 1985. –560 с.

*Надійшла до редколегії 06.04.2012*