

МОДЕЛЮВАННЯ АВТОНОМНИХ АСИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ З ВЕНТИЛЬНИМ ЗБУДЖЕННЯМ ПРИ РІЗНИХ АЛГОРИТМАХ ПЕРЕМИКАННЯ СИЛОВИХ КЛЮЧІВ

*Л. І. Мазуренко, д.т.н., проф., В. І. Романенко, асп.
Інститут електродинаміки НАН України
пр. Перемоги, 56, 03680, м. Київ, Україна
E-mail: volodimir_r@ukr.net.*

Обґрунтовано можливість математичного моделювання асинхронного генератора з вентильним збудженням за допомогою моделі на основі методу припасовування при однократному і багатократному алгоритмах перемикавання (векторна широтно-імпульсна модуляція) силових ключів вентильної системи збудження.

Ключові слова: асинхронний генератор, вентильне збудження, моделювання, векторна широтно-імпульсна модуляція.

Вступ. В останній час значно зріс інтерес до автономних енергоустановок на основі асинхронних генераторів з вентильним збудженням (АГ з ВЗ). На етапі розробки та при проведенні досліджень таких генераторів важливим є створення математичної моделі, що дає інформацію про характер зміни електромагнітних процесів у генераторі при різних режимах роботи. Асинхронна машина добре відома в теорії електричних машин. Однак математичний опис асинхронного генератора зі збудженням від напівпровідникового перетворювача в автономному режимі ускладнений нелінійностями, які вносять напівпровідникові елементи та індуктивність контура намагнічування.

Аналіз попередніх досліджень. У математичних моделях АГ з ВЗ окремими блоками представляються асинхронна машина, напівпровідниковий перетворювач, система керування та навантаження. Вплив напівпровідникових ключів урахується за допомогою комутаційних функцій. У [0] рівняння асинхронної машини представлено в трифазних координатах з урахуванням нелінійності контура намагнічування. Комутаційні функції входять в логічні вирази, які потрібно обраховувати на кожному кроці інтегрування. Це займає багато машинного часу. В [0, 0] для запису рівнянь асинхронної машини використовується двофазна система координат. Комутаційні функції є наперед відомими відповідно до алгоритму перемикавання напівпровідникових ключів. У моделях не враховується нелінійність контура намагнічування, що призводить до неточностей при моделюванні. При використанні бібліотеки SimPowerSystems пакету Matlab для моделювання асинхронної машини і напівпровідникових ключів виникає додаткова складність при формуванні алгоритмів перемикавання вентилю. Відома модель, що базується на методі припасовування, де напівпровідникові елементи перетворювача розглядаються як ідеальні ключі, які формують схеми заміщення із обмоток генератора і навантаження. Враховується нелінійність контура намагнічування, рівняння асинхронної машини представлені в трифазних координатах, нерухомих відносно статора. При цьому значно зменшується час моделювання, а відповідно [0] використання трифазних координат є доцільним при несиметрії в статорних колах. Однак дана модель може застосовуватися для добре вивчених схемних рі-

шень[0]. Оскільки напівпровідникова частина автономних АГ з ВЗ найчастіше виконується на основі схеми інвертора напруги, послідовність перемикавання ключів якого добре вивчено, то для моделювання таких генераторів доцільно використовувати математичну модель на основі методу припасовування.

Мета роботи. Обґрунтування можливості математичного моделювання АГ з ВЗ за допомогою моделі на основі методу припасовування при однократному і багатократному алгоритмах перемикавання (векторна широтно-імпульсна модуляція (ШІМ)) силових ключів вентильної системи збудження (ВЗ).

Матеріал і результати дослідження. Автономна енергоустановка, функціональна схема якої зображена на рис. 1, складається із приводного двигуна (ПД) та асинхронної машини (АМ). До трифазної обмотки АМ під'єднано ВЗ, на клемі постійного струму якої підключено активне навантаження з опором R_n . Вентильну систему збудження виконано за схемою автономного інвертора напруги. На схемі (рис. 1) напівпровідникові вентиля перетворювача зображено у вигляді ідеальних ключів. При частотному керуванні генератором перемиканням напівпровідникових ключів ВЗ забезпечується така частота поля збудження, яка менша від електричної частоти обертання ротора. Змінюючи частоту поля збудження, а, відповідно, і ковзання генератора, можна підтримувати напругу кола постійного струму на заданому рівні для різних значень R_n .

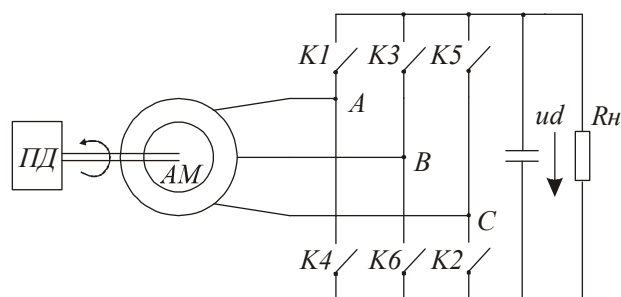


Рисунок 1 – Функціональна схема АГ з ВЗ

Можливі комбінації ключів ВЗ незалежно від алгоритму, що одночасно проводять струм, і відповідні їм величини фазних напруг наведено в табл. 1 (тут і надалі позначення виконані відповідно до [0]).

Таблиця 1 – Можливі комбінації ввімкнених ключів ВСЗ

| Комбінація ключів | v_a | v_b | v_c | Результуючий вектор |
|-------------------|----------|----------|----------|---------------------|
| K4K6K2 | 0 | 0 | 0 | V_0 |
| K1K6K2 | $2/3ud$ | $-1/3ud$ | $-1/3ud$ | V_1 |
| K1K3K2 | $1/3ud$ | $1/3ud$ | $-2/3ud$ | V_2 |
| K4K3K2 | $-1/3ud$ | $2/3ud$ | $-1/3ud$ | V_3 |
| K4K3K5 | $-2/3ud$ | $1/3ud$ | $1/3ud$ | V_4 |
| K4K6K5 | $-1/3ud$ | $-1/3ud$ | $2/3ud$ | V_5 |
| K1K6K5 | $1/3ud$ | $-2/3ud$ | $1/3ud$ | V_6 |
| K1K3K5 | 0 | 0 | 0 | V_7 |

Проекції **опорних векторів** - результуючих векторів фазних напруг для кожної можливої комбінації ключів – отримують при приведенні фазних напруг із системи координат abc до нерухомої відносно статора системи $\alpha\beta$:

$$\begin{vmatrix} V_{\alpha k} \\ V_{\beta k} \end{vmatrix} = \frac{3}{2} \begin{vmatrix} 3/2 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{vmatrix}, k=0..7.$$

Як видно із рис. 2, ненульові опорні вектори ділять площину $\alpha\beta$ на шість рівних секторів[0].

Для реалізації частотного керування асинхронним генератором необхідно сформувати фазні напруги, результуючий вектор яких обертається із заданою кутовою частотою ω^* :

$$\begin{aligned} V_s^* &= V_{sm} \cdot e^{j\omega^* t} = V_{s\alpha} + jV_{s\beta} = \\ &= V_{sm} \cos(\omega^* t) + jV_{sm} \sin(\omega^* t), \end{aligned} \quad (1)$$

де $V_{sm} = ud/\sqrt{3}$ - модуль результуючого вектора, ud - напруга на конденсаторі. Формується тільки кутова частота, а модуль визначається напругою кола постійного струму. Вираз (1) визначає **результуючий вектор завдання напруги статора**.

При алгоритмі однократного перемикання для реалізації частотного керування комбінації ввімкнених ключів змінюються так, що кінець **результуючого вектора утвореної фазної напруги статора** V_s стрибкоподібно переміщується по вершинах шестикутника (рис. 2), знаходячись у кожному секторі протягом $1/6$ періоду.

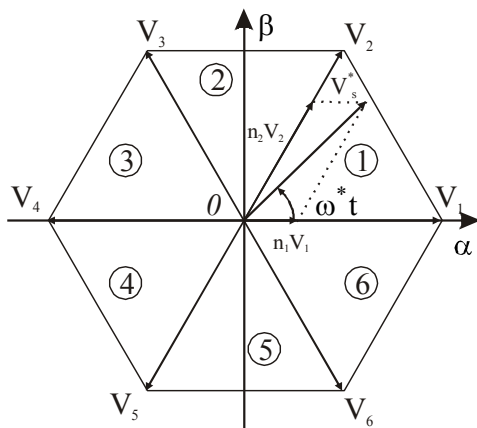


Рисунок 2 – Зображення опорних векторів напруги і вектора напруги завдання у перетвореній системі координат $\alpha\beta$

На рис. 3 (крива 2) показано отриману таким чином форму напруги для фази А.

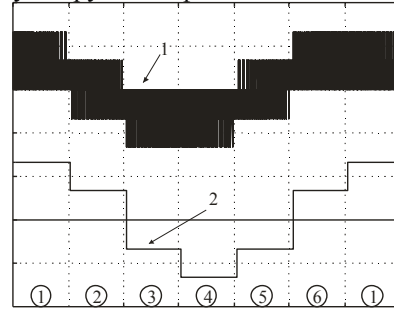


Рисунок 3 – Криві фазної напруги: 1 – при векторній ШІМ; 2 – при однократному перемиканні.

При алгоритмі однократного перемикання із-за стрибкоподібного характеру переміщення результуючого вектора утвореної напруги виникають вищі гармонічні складові у фазних струмах, а також неможливо плавно змінювати частоту. Для усунення цих недоліків використовуються алгоритми багатократного перемикання силових ключів ВСЗ.

Алгоритм векторної ШІМ широко використовується при керуванні асинхронними двигунами внаслідок простоти формування за допомогою мікропроцесорної техніки, можливості плавної зміни частоти і зниження впливу гармонічних складових, близьких до основної гармоніки, у кривих фазних струмів. Головна ідея векторної ШІМ полягає в тому, що будь-який вектор завдання напруги статора V_s^* , який знаходиться в одному із шести секторів, можна представити як лінійну комбінацію сусідніх опорних векторів, що утворюють сектор:

$$V_s^* = n_i V_i + n_{i+1} V_{i+1}, \quad (2)$$

де n_i і n_{i+1} – відносна тривалість ввімкнення ключів перетворювача, при яких формуються опорні вектори V_i і V_{i+1} відповідно ($i = 1..6$). Прирівнявши (2) і (1), отримаємо:

$$n_i V_i + n_{i+1} V_{i+1} = V_s^*. \quad (3)$$

Після запису (3) в проекціях у системі координат $\alpha\beta$ отримаємо вирази для визначення n_i і n_{i+1} [0]:

$$\begin{aligned} n_i V_{\alpha i} + n_{i+1} V_{\alpha i+1} &= V_{sm} \cos(\omega^* t); \\ n_i V_{\beta i} + n_{i+1} V_{\beta i+1} &= V_{sm} \sin(\omega^* t). \end{aligned} \quad (4)$$

На періоді несучої частоти ШІМ T_s формуються фазні напруги статора, для яких середнє значення результуючого вектора утвореної напруги статора буде $V_s = V_s^*$. Це досягається шляхом перемикання ключів: протягом часу $T_i = n_i T_s$ діє напруга V_i , а на інтервалі тривалістю $T_{i+1} = n_{i+1} T_s - V_{i+1}$. При цьому $T_i + T_{i+1} \leq T_s$. Це і забезпечує реалізацію векторної ШІМ.

На практиці для повного заповнення періоду несучої частоти використовуються додатково комбінації ключів з нульовими опорними векторами напруги V_0 і V_7 . Тривалість їх ввімкнення визначається із умови:

$$T_0 = T_7 = \frac{1 - n_i - n_{i+1}}{2} T_s. \quad (5)$$

Відомо багато способів заповнення періоду частоти модуляції ШІМ. У даній роботі розглядається методика, що мінімізує пульсації фазного струму.

На рис. 4 зображено послідовність ввімкнення ключів ВСЗ на прикладі сектора 1.

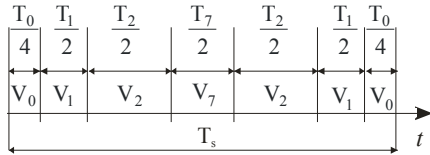


Рисунок 4 – Послідовність заповнення періоду частоти модуляції

Таким чином, при роботі ВСЗ по алгоритму багатократного перемикавання (векторна ШІМ) використовується 8 можливих комбінацій ключів, а при однократному перемикаванні - 6 (комбінації з опорними векторами V_0 і V_7 відсутні). Тому математичні моделі АГ з ВЗ при частотному керуванні на основі методу припасовування з однократним алгоритмом перемикавання й при векторній ШІМ відрізняються лише двома комбінаціями ключів і послідовністю формування миттєвих схем заміщення.

Відповідно [0] кожній комбінації ключів із табл. 1 відповідає своя схема заміщення і математична модель АГ з ВЗ представляється у вигляді:

$$\dot{X} = AX, \quad (6)$$

де $X = [\psi_A, \psi_B, \psi_C, \psi_a, \psi_b, \psi_c, ud]^T$, $A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{17} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{71} & \dots & a_{77} \end{bmatrix}$ - відповідно вектор і матриця стану системи.

Елементи матриці стану, які не змінюються при зміні комбінацій ключів:

$$a_{12} = a_{13} = a_{15} = a_{16} = a_{21} = a_{23} = a_{24} = a_{26} = a_{31} = a_{32} = a_{34} = a_{35} = a_{42} = a_{43} = a_{47} = a_{51} = a_{53} = a_{57} = a_{61} = a_{62} = a_{67} = 0,$$

$$a_{11} = a_{22} = a_{33} = -c_1 R_1, \quad a_{14} = a_{25} = a_{36} = c_2 R_1, \quad a_{41} = a_{52} = a_{63} = c_2 R_2,$$

$$a_{44} = a_{55} = a_{66} = -c_3 R_2, \quad a_{45} = a_{56} = a_{64} = -p_n \omega / \sqrt{3}, \quad a_{77} = -1 / R_H C_0.$$

Елементи матриці стану, які змінюють свою величину для кожної комбінації ключів, наведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Змінні елементи матриці стану

| Елемент матриці | V_1 | V_2 | V_3 | V_4 | V_5 | V_6 | V_7, V_0 |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------|
| a_{17} | 2/3 | 1/3 | -1/3 | -2/3 | -1/3 | 1/3 | 0 |
| a_{27} | -1/3 | 1/3 | 2/3 | 1/3 | -1/3 | -2/3 | 0 |
| a_{37} | -1/3 | -2/3 | -1/3 | 1/3 | 2/3 | 1/3 | 0 |
| a_{71} | $\frac{c_1}{C_0}$ | 0 | 0 | $\frac{c_1}{C_0}$ | 0 | 0 | 0 |
| a_{72} | 0 | 0 | $\frac{c_1}{C_0}$ | 0 | 0 | $\frac{c_1}{C_0}$ | 0 |
| a_{73} | 0 | $\frac{c_1}{C_0}$ | 0 | 0 | $\frac{c_1}{C_0}$ | 0 | 0 |
| a_{74} | $\frac{c_2}{C_0}$ | 0 | 0 | $\frac{c_2}{C_0}$ | 0 | 0 | 0 |
| a_{75} | 0 | 0 | $\frac{c_2}{C_0}$ | 0 | 0 | $\frac{c_2}{C_0}$ | 0 |
| a_{76} | 0 | $\frac{c_2}{C_0}$ | 0 | 0 | $\frac{c_2}{C_0}$ | 0 | 0 |

У системі (6) прийнято такі позначення: $\psi_k (k=A, B, C, a, b, c)$ - повні потокозчеплення для фаз

статора і ротора; C_0 - ємність конденсатора ланки постійного струму; R_1 і R_2 - активні опори обмоток статора і ротора; p_n - число пар полюсів;

$$c_1 = (L_1 - L_{ek}) / L_1^2; \quad (7)$$

$$c_1 = L_{ek} / L_1 L_2; \quad (8)$$

$$c_3 = (L_2 - L_{ek}) / L_2^2, \quad (9)$$

де $L_{ek} = L_1 L_2 L_m / (L_1 L_m + L_2 L_m + L_1 L_2)$; L_1 і L_2 - індуктивності розсіювання фаз статора і ротора; ω - механічна частота обертання ротора; L_m - змінна взаємнідуктивність, яка визначається із залежності $L_m = f(Y_m)$, побудованої із використанням характеристики намагнічування генератора. Алгоритм побудови цієї залежності наведено в [0].

Таким чином, при врахуванні роботи ВСЗ для кожної комбінації ключів на кожному кроці інтегрування системи (6) обраховуються змінні елементи матриці стану відповідно до поточної комбінації ключів ВСЗ (табл. 2). Для врахування змінної індуктивності контуру намагнічування перед початком кожного кроку інтегрування обчислюється $L_m = f(Y_m)$ і залежні від неї константи c_1 , c_2 і c_3 .

При алгоритмі однократного перемикавання інтервал існування сталої комбінації ключів визначається як

$$T_{cm} = \frac{\pi}{3\omega^*} \quad (10)$$

і є часом, протягом якого результуючий вектор напруги проходить вибраний сектор. При векторній ШІМ цей інтервал визначається відповідно до обраної методики формування ШІМ сигналу. В даній роботі - відповідно до рис. 4.

На рис. 5 і рис. 7 показано розрахункові (отримані при моделюванні з використанням методу припасовування), а на рис. 6 і рис. 8 - експериментальні осцилограми фазних струмів (крива 1) і напруг генератора (крива 2) при алгоритмі однократного перемикавання і при векторній ШІМ відповідно при однакових параметрах навантаження кола постійного струму ($m_V = 10$ В/под., $m_I = 40$ А/под., $m_t = 5$ мс/под.).

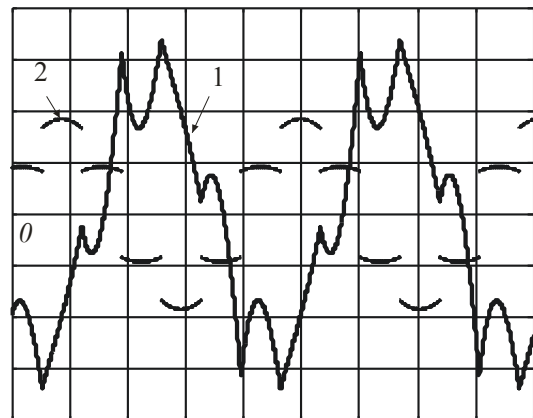


Рисунок 5 – Розрахункові фазні струм і напруга при однократному алгоритмі перемикавання вентилів

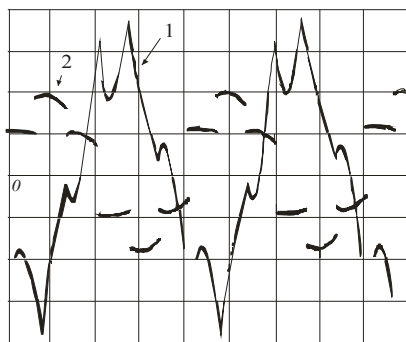


Рисунок 6 – Експериментальні фазні струм і напруга при однократному алгоритмі перемикання вентилів

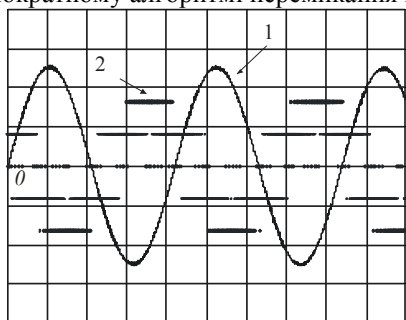


Рисунок 7 – Розрахункові фазні струм і напруга при векторній ШІМ

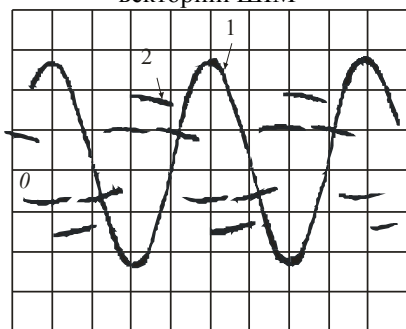


Рисунок 8 – Експериментальні фазні струм і напруга при векторній ШІМ.

Висновки. Таким чином, при моделюванні АГ з ВЗ з однократним перемиканням силових ключів і з векторною ШІМ за допомогою моделі з використанням методу припасовування можна використовувати одні й ті ж схеми заміщення, змінивши лише послідовність їх використання відповідно до вибраного алгоритму керування ВЗ. При цьому досягається якісне і кількісне співпадіння розрахункових і експериментальних даних з похибкою, що не перевищує 15 % в усталеному режимі роботи (для максимальних значень напруг і струмів).

ЛІТЕРАТУРА

1. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: Учеб. для вузов. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк. 2001. - 327 с.: ил.
2. Лищенко А.И., Мазуренко Л.И. Математическое моделирование асинхронных генераторов с вентильным возбуждением в фазовых координатах статора // Техн. электродинамика. - 1997. - № 6. - С. 31-36.
3. Мазуренко Л.И., Романенко В.И. Математична модель асинхронного генератора з вентильним збудженням з використанням метода припасовування. Техн. электродинамика. - 2010. - №4. - С. 19-24.
4. Atmel AVR49: AC induction motor control using the constant V/f principle and a space-vector PWM algorithm [Electronic Resource]. - Mode of access : URL: http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc7546.pdf/ - Title from the screen.
5. G.V.Jayaramaiah, B.G.Fernandes, Voltage controller for stand-alone induction generator using instantaneous power control. 1st International Conference on Power Electronics Systems and Applications. Proceedings. 9-11 Nov. 2004, p. 102-106.
6. L.Louze, A.L.Nemmour, A.H.Khezzer, M.E.Hacil, M.Boucherma, Cascade sliding mode controller for self-excited induction generator, Revue des Energies Renouvelables, Vol.12, №4(2009), 617-626.

Стаття надійшла 07.06.2011 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Родькіним Д.Й.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОНОМНЫХ АСИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ВЕНТИЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ АЛГОРИТМАХ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ СИЛОВЫХ КЛЮЧЕЙ

*Л. И. Мазуренко, д.т.н., проф., В. И. Романенко, асп.
Институт электродинамики НАН Украины, г. Киев
пр. Победы, 56, 03680, г. Киев, Украина
E-mail: volodimir_r@ukr.net*

Обоснована можливість математичного моделювання асинхронного генератора з вентильним збудженням з допомогою моделі на основі методу припасовування при однократних і многократних алгоритмах переключення (алгоритм векторної широтно-імпульсної модуляції) силових ключей вентильної системи збудження.

Ключевые слова: асинхронный генератор, вентильное возбуждение, моделирование, векторная широтно-импульсная модуляция.

SIMULATION OF STAND-ALONE INDUCTION GENERATORS WITH INVERTER EXCITATION FOR DIFFERENTIAL GATING SIGNAL GENERATION TECHNIQUES

*L. Mazurenko, D.Sc. (Eng.), Prof., V. Romanenko, post-grad.
Institute of Electrodynamics of UNAS, Kyiv
pr. Peremohy, 56, 03680, Kyiv, Ukraine
E-mail: volodimir_r@ukr.net*

In this article possibility of simulation of induction generator with inverter excitation with the model on cut-and-try method for both single and repeated (algorithm vector PWM) gating signal generation techniques was confirmed.

Key words: induction generator, excitation rectifier, modeling, vector PWM.