

УДК 621.313.332

Л.І.Мазуренко, докт.техн.наук, В.І.Романенко (Інститут електродинаміки НАН України, Київ)

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З ВЕНТИЛЬНИМ ЗБУДЖЕННЯМ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ ПРИПАСОВУВАННЯ

Описано математичну модель асинхронного генератора з вентильним збудженням, яка базується на його миттєвих схемах заміщення і не потребує інформації про стан напівпровідникових елементів на кожному кроці розв'язку системи диференціальних рівнянь.

Приведено описание математической модели асинхронного генератора с вентильным возбуждением, которая базируется на его мгновенных схемах замещения и не требует информации о состоянии полупроводниковых элементов на каждом шаге решения системы дифференциальных уравнений.

На сьогодні потребу в автономних джерелах живлення задовольняють, в основному, енергоустановки на базі синхронних генераторів. Однак в останній час поширилося використання асинхронних генераторів, основною перевагою яких є надійність і простота в експлуатації, кращі масогабаритні показники і нижча собівартість. Особливо перспективним є використання асинхронних генераторів із вентильним збудженням (АГ із ВЗ) [1].

Асинхронні генератори із ВЗ та однократним алгоритмом перемикавання напівпровідникових ключів перспективні для застосування в автономних енергоустановках загальнопромислового використання для живлення споживачів без особливих вимог до форми напруги.

В математичних моделях для дослідження електромагнітних процесів таких генераторів окремими блоками моделюються асинхронна машина і вентильний перетворювач [3]. При цьому використовується модель генератора і перетворювача вентильної системи збудження в неперетворених координатах статора або електричної машини в перетворених, а перетворювача – в неперетворених координатах. Стан напівпровідникових ключів перетворювача визначається на кожному кроці інтегрування системи диференціальних рівнянь. Тому головні недоліки цих моделей - значний час, необхідний для обчислень, і складність визначення стану напівпровідникових елементів. В [6] представлено математичну модель на основі методу припасування. У цьому випадку немає необхідності визначати стан напівпровідникових елементів на кожному кроці інтегрування системи диференціальних рівнянь. Це пояснюється тим, що робота напівпровідникового перетворювача представлена послідовністю миттєвих схем заміщення, тривалість існування яких залежить від частоти керуючих імпульсів. Однак, розбіжність між розрахунковими і експериментальними даними становить близько 40 %.

Головною метою даної статті є розробка математичної моделі для розрахунку електромагнітних і електромеханічних процесів в АГ з ВЗ, що базується на методі припасування, та в якій відсутні недоліки відомих моделей, забезпечується достатня точність і зменшується тривалість моделювання.

Модель асинхронного генератора (власне електричної машини) в неперетворених координатах статора АВС. При розробці математичної моделі асинхронної машини з короткозамкненим ротором в неперетвореній системі координат статора використано наступні припущення: вектор потоку взаємодії $\vec{\Phi}_m$ і відповідний йому вектор поточкозчеплення $\vec{\psi}_m$ колінеарні вектору струму намагнічування \vec{I}_m , що дозволяє не враховувати гістерезис; індуктивні опори розсіювання обмоток статора і ротора незмінні; магнітопровід насичується рівномірно, тобто ефект явнополюсності ротора, що виникає при насиченні, не враховується; всі параметри, струми і напруги обмотки ротора приводяться до обмотки статора генератора; несиметрія може мати місце тільки в колах навантаження

або збудження. При цих допущеннях система диференціальних рівнянь, що описує асинхронний генератор в неперетвореній системі координат ABC, має вигляд [3]

$$\frac{d\psi_A}{dt} = -i_A R_1 + u_A; \quad \frac{d\psi_B}{dt} = -i_B R_1 + u_B; \quad \frac{d\psi_C}{dt} = -i_C R_1 + u_C;$$

$$\frac{d\psi_a}{dt} = -i_a R_2 - \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}}(\psi_b - \psi_c); \quad \frac{d\psi_b}{dt} = -i_b R_2 - \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}}(\psi_c - \psi_a); \quad \frac{d\psi_c}{dt} = -i_c R_2 - \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}}(\psi_a - \psi_b). \quad (1)$$

Струми статора і ротора визначають із рівнянь

$$i_{A,B,C} = c_1 \psi_{A,B,C} - c_2 \psi_{a,b,c}, \quad i_{a,b,c} = -c_2 \psi_{A,B,C} + c_3 \psi_{a,b,c}, \quad (2)$$

де $c_1 = \frac{L_1 - L_{ек}}{L_1^2}$, $c_2 = \frac{L_{ек}}{L_1 L_2}$, $c_3 = \frac{L_2 - L_{ек}}{L_2^2}$, а $L_{ек} = \frac{L_1 L_2 L_m}{L_1 L_m + L_2 L_m + L_1 L_2}$.

З урахуванням (2) система рівнянь (1) набуде вигляду

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_A}{dt} &= -c_1 R_1 \psi_A + c_2 R_1 \psi_a + u_A; & \frac{d\psi_B}{dt} &= -c_1 R_1 \psi_B + c_2 R_1 \psi_b + u_B; & \frac{d\psi_C}{dt} &= -c_1 R_1 \psi_C + c_2 R_1 \psi_c + u_C; \\ \frac{d\psi_a}{dt} &= c_2 R_2 \psi_A - c_3 R_2 \psi_a - \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} \psi_b + \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} \psi_c; & \frac{d\psi_b}{dt} &= c_2 R_2 \psi_B + \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} \psi_a - c_3 R_2 \psi_b - \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} \psi_c; \\ & & \frac{d\psi_c}{dt} &= c_2 R_2 \psi_C - \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} \psi_a + \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} \psi_b - c_3 R_2 \psi_c. \end{aligned} \quad (3)$$

У наведених рівняннях $\psi_k (k = A, B, C, a, b, c)$ - повні потокозчеплення для фаз статора і ротора, $u_k (k = A, B, C)$ - фазні напруги статора, $i_k (k = A, B, C, a, b, c)$ - струми фаз статора і ротора, R_1, R_2 та L_1, L_2 - активні опори та індуктивності розсіювання фаз статора і ротора, ω - механічна частота обертання ротора, p_n - число пар полюсів, L_m - змінна взаємоддуктивність, яка визначається по характеристиці намагнічування генератора у вигляді залежності $L_m = f(Y_m)$. Алгоритм побудови цієї залежності наведено в [3]. На кожному кроці розв'язку диференціальних рівнянь визначається величина

$$Y_m = \frac{2}{3} (I_{A\Sigma}^2 + I_{B\Sigma}^2 + I_{C\Sigma}^2 - (I_{A\Sigma} \cdot I_{B\Sigma} + I_{B\Sigma} \cdot I_{C\Sigma} + I_{C\Sigma} \cdot I_{A\Sigma}))^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

де $I_{A\Sigma} = \frac{\psi_A}{L_1} + \frac{\psi_a}{L_2}$, $I_{B\Sigma} = \frac{\psi_B}{L_1} + \frac{\psi_b}{L_2}$, $I_{C\Sigma} = \frac{\psi_C}{L_1} + \frac{\psi_c}{L_2}$. Це дозволяє разом із залежністю $L_m = f(Y_m)$ враховувати насичення генератора по робочому потоку взаємоддукції.

Аналіз роботи вентиляльного перетворювача. На рис. 1 показано принципову схему АГ із ВЗ з навантаженням змінного (L_n, R_n) і постійного (L, R) струму. При алгоритмі однократного перемикування вентилів, який наведено в [2], за період вихідної напруги роботу перетворювача можна представити чергуванням дванадцяти схем заміщення, утворених напівпровідниковими елементами, обмотками генератора і навантаженням. Кожна із схем залишається незмінною протягом 30 ел.гр.

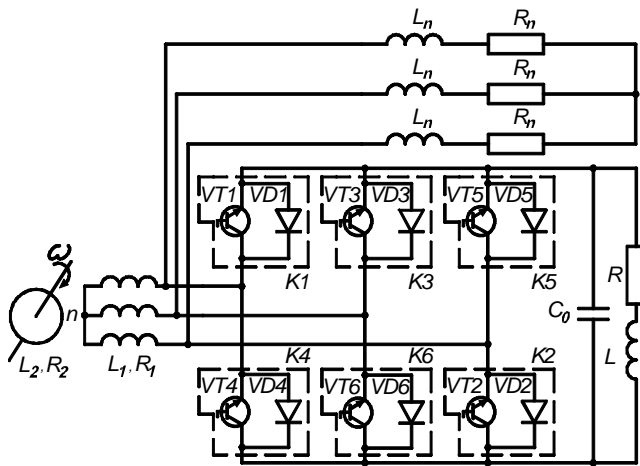


Рис. 1

Якщо не брати до уваги електричні кола, утворені навантаженням, то при навантаженні змінного струму послідовність утворення миттєвих схем заміщення залишається такою ж, як і на холостому ході (рис. 2): спостерігається чергування схеми з двома транзисторами і діодом та схеми з двома діодами і транзистором. Провідність кожного напівпровідникового елемента складає 90 ел.гр періода вихідної напруги.

При навантаженні постійного струму можливе чергування миттєвих схем з трьома діодами та схем з одним транзистором і двома діодами: $VD1 - VT6 - VD2$; $VD1 - VD3 - VD2$;

VT1–VD3–VD2; VD4–VD3–VD2; VD4–VD3–VT2; VD4–VD3–VD5; VD4–VT3–VD5;
VD4–VD6–VD5; VT4–VD6–VD5; VD1–VD6–VD5; VD1–VD6–VT5; VD1–VD6–VD2.

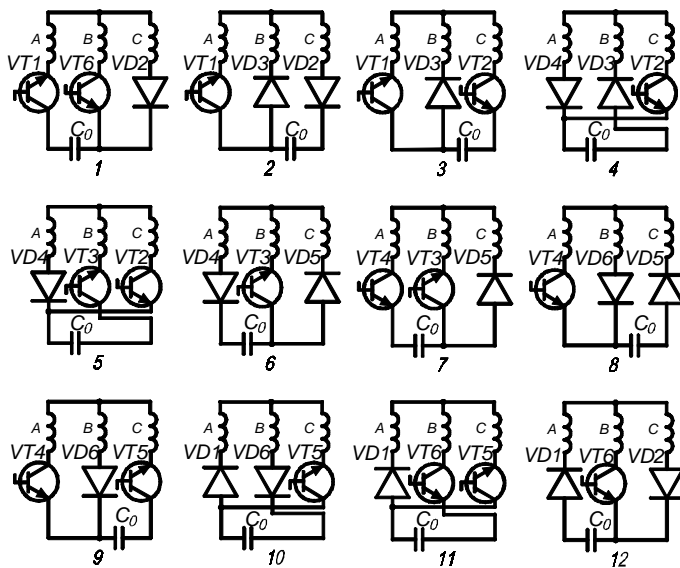


Рис. 2

пруги і моделювати паралельно ввімкнені керований напівпровідниковий ключ і діод як один елемент (ідеальний ключ). На рис. 1 єдині елементи VT–VD показано у вигляді блоків K1...K6. Тоді еквівалентні миттєві схеми АГ з ВЗ (рис. 2) для розрахунку методом припасовування можуть бути представлені у вигляді шести наступних схем: 1 – ввімкнені K1–K3–K2 (узагальнює схеми 2, 3); 2 – ввімкнені K4–K3–K2 (узагальнює схеми 4 і 5); 3 – ввімкнені K4–K3–K5 (узагальнює схеми 6 і 7); 4 – ввімкнені K4–K6–K5 (узагальнює схеми 8 і 9); 5 – ввімкнені K1–K6–K5 (узагальнює схеми 10 і 11); 6 – ввімкнені K1–K6–K2 (узагальнює схеми 12 і 1).

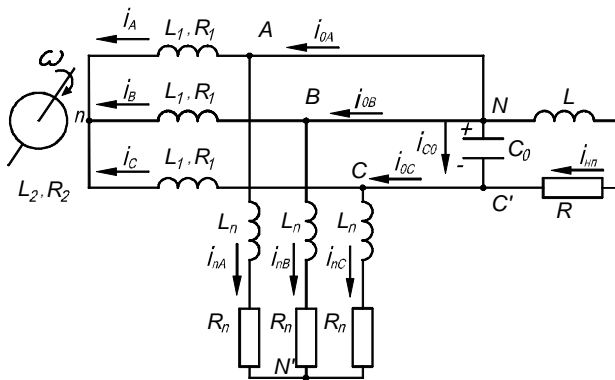


Рис. 3

Після спрощення отримаємо:

$$u_A = \frac{1}{3}(2\psi_A - \psi_B - \psi_C) = \frac{u_{C0}}{3}, \quad u_B = \frac{1}{3}(-\psi_A + 2\psi_B - \psi_C) = \frac{u_{C0}}{3}, \quad u_C = \frac{1}{3}(-\psi_A - \psi_B + 2\psi_C) = -\frac{2u_{C0}}{3}.$$

За аналогією, знаходять фазні напруги на навантаженні $u_{AN'} = u_A$, $u_{BN'} = u_B$, $u_{CN'} = u_C$.

Перехід на таке чергування схем спостерігається при навантаженні, коли коефіцієнт потужності генератора більший або дорівнює 0.55.

Порівняння миттєвих схем заміщення при навантаженнях змінного і постійного струму показує, що на одному і тому ж часовому інтервалі схеми відрізняються лише тим, що проводить струм – діод або транзистор, ввімкнені паралельно, а інші елементи однакові. Тому до обмоток статора прикладено потенціали однакової полярності і можна вважати, що в електричному відношенні ці схеми ідентичні і доцільно використовувати при їх математичному моделюванні єдині теоретичні засади. Крім того спостерігається ідентичність в електричному відношенні двох сусідніх схем (наприклад, на рис. 2 схеми 2 і 3, 4 і 5). Це дозволяє при моделюванні брати до уваги тільки шість миттєвих схем на періоді вихідної на-

Модель АГ із ВЗ для послідовності миттєвих схем. Розглянемо детально схему АГ з ВЗ із навантаженням постійного і змінного струму для випадку ввімкнених ідеальних ключів K1–K3–K2, яку показано на рис. 3. Для її моделювання необхідно одержати додаткові рівняння і доповнити ними систему рівнянь (3). Послідовність їхнього отримання наступна.

Визначається потенціал вузла C' при $\varphi_N = 0$ як $\varphi_{C'} = -u_{C0}$. Визначаються напруги обмоток генератора u_A, u_B, u_C за умови що $\varphi_A = 0$, $\varphi_B = 0$, $\varphi_C = -u_{C0}$. Потенціал нульової точки обмотки $\varphi_n = (\varphi_A + \varphi_B + \varphi_C)/3$, тому $u_A = \varphi_A - \varphi_n$; аналогічно $u_B = \varphi_B - \varphi_n$, $u_C = \varphi_C - \varphi_n$.

Для контуру $N-L-R-C'-C_0-N$ визначаємо рівняння $\frac{du_{C_0}}{dt} = \frac{i_{C_0}}{C_0}$, $L \frac{di_{nn}}{dt} + i_{nn}R = u_{C_0}$, які з урахуванням того, що $i_{C_0} = i_{0C} - i_{nn}$, а $i_{0C} = i_C + i_{nC}$, набудуть вигляду

$$\frac{du_{C_0}}{dt} = \frac{1}{C_0}(i_C + i_{nC} - i_{nn}), \quad \frac{di_{nn}}{dt} = \frac{1}{L}(u_{C_0} - i_{nn}R);$$

Для навантаження змінного струму правомірні наступні диференціальні рівняння у нормальній формі Коші:

$$\frac{di_{nA}}{dt} = -\frac{R_n}{L_n}i_{nA} + \frac{u_{AN'}}{L_n}, \quad \frac{di_{nB}}{dt} = -\frac{R_n}{L_n}i_{nB} + \frac{u_{BN'}}{L_n}, \quad \frac{di_{nC}}{dt} = -\frac{R_n}{L_n}i_{nC} + \frac{u_{CN'}}{L_n}.$$

Таким чином, система диференціальних рівнянь, що описують розглянуту миттєву схему з навантаженням змінного і постійного струму, має вигляд

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_A}{dt} &= -c_1 R_1 \psi_A + c_2 R_1 \psi_a + \frac{u_{C_0}}{3}; & \frac{d\psi_B}{dt} &= -c_1 R_1 \psi_B + c_2 R_1 \psi_b + \frac{u_{C_0}}{3}; & \frac{d\psi_C}{dt} &= -c_1 R_1 \psi_C + c_2 R_1 \psi_c - \frac{2u_{C_0}}{3}; \\ \frac{d\psi_a}{dt} &= c_2 R_2 \psi_A - c_3 R_2 \psi_a - \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} \psi_b + \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} \psi_c; & \frac{d\psi_b}{dt} &= c_2 R_2 \psi_B + \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} \psi_a - c_3 R_2 \psi_b - \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} \psi_c; \\ \frac{d\psi_c}{dt} &= c_2 R_2 \psi_C - \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} \psi_a + \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} \psi_b - c_3 R_2 \psi_c; \\ \frac{du_{C_0}}{dt} &= \frac{c_1}{C_0} \psi_A - \frac{c_2}{C_0} \psi_a - \frac{1}{C_0} i_{nn} + \frac{1}{C_0} i_{nC}; & \frac{di_{nn}}{dt} &= \frac{1}{L} u_{C_0} - \frac{R}{L} i_{nn}; \\ \frac{di_{nA}}{dt} &= \frac{1}{3L_n} u_{C_0} - \frac{R_n}{L_n} i_{nA}; & \frac{di_{nB}}{dt} &= \frac{1}{3L_n} u_{C_0} - \frac{R_n}{L_n} i_{nB}; & \frac{di_{nC}}{dt} &= -\frac{2}{3L_n} u_{C_0} - \frac{R_n}{L_n} i_{nC}. \end{aligned}$$

Розглянувши аналогічно кожен миттєву схему заміщення, повну систему диференціальних рівнянь, що описують АГ із ВЗ з навантаженням змінного і постійного струмів, можна представити у вигляді

$$\dot{X} = A \cdot X, \quad (5)$$

де $X = [\psi_A \ \psi_B \ \psi_C \ \psi_a \ \psi_b \ \psi_c \ u_{C_0} \ i_{nn} \ i_{nA} \ i_{nB} \ i_{nC}]^T$, $A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{111} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{111} & \dots & a_{1111} \end{pmatrix}$ - відповідно вектор і матриця стану

системи.

Елементи матриці, які не змінюються для всіх схем заміщення:

$$\begin{aligned} a_{12} = a_{13} = a_{15} = a_{16} = a_{18} = \dots = a_{111} = a_{21} = a_{23} = a_{24} = a_{26} = a_{28} = \dots = a_{211} = a_{31} = a_{32} = a_{34} = a_{35} = \\ = a_{38} = \dots = a_{311} = a_{42} = a_{43} = a_{47} = \dots = a_{411} = a_{51} = a_{53} = a_{57} = \dots = a_{511} = a_{61} = a_{62} = a_{67} = \dots = a_{611} = \\ = a_{77} = a_{81} = \dots = a_{86} = a_{89} = a_{810} = a_{811} = a_{91} = \dots = a_{96} = a_{98} = a_{910} = a_{911} = a_{101} = \dots = a_{106} = a_{108} = \\ = a_{109} = a_{1011} = a_{111} = \dots = a_{116} = a_{118} = a_{119} = a_{1110} = 0, \quad a_{11} = a_{22} = a_{33} = -c_1 R_1, \quad a_{14} = a_{25} = a_{36} = c_2 R_1, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{41} = a_{52} = a_{63} = c_2 R_2, & \quad a_{44} = a_{55} = a_{66} = -c_3 R_2, & \quad a_{45} = a_{56} = a_{64} = -p_n \omega / \sqrt{3}, \\ a_{46} = a_{54} = a_{65} = p_n \omega / \sqrt{3}, & \quad a_{78} = -1/C_0, & \quad a_{87} = 1/L, & \quad a_{88} = -R/L, \\ a_{99} = a_{1010} = a_{1111} = -R_n/L_n. \end{aligned}$$

Елементи матриці, які змінюють свою величину для кожної із схем заміщення, наведено у таблиці.

схема	a_{17}	a_{27}	a_{37}	a_{71}	a_{72}	a_{73}	a_{74}	a_{75}	a_{76}	a_{79}	a_{710}	a_{711}	a_{97}	a_{107}	a_{117}
1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0	0	$\frac{c_1}{C_0}$	0	0	$-\frac{c_2}{C_0}$	0	0	$\frac{1}{C_0}$	$\frac{1}{3L_n}$	$\frac{1}{3L_n}$	$-\frac{2}{3L_n}$
2	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	$-\frac{c_1}{C_0}$	0	0	$\frac{c_2}{C_0}$	0	0	$\frac{-1}{C_0}$	0	$-\frac{1}{3L_n}$	$\frac{2}{3L_n}$	$-\frac{1}{3L_n}$
3	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{c_1}{C_0}$	0	0	$-\frac{c_2}{C_0}$	0	0	$\frac{1}{C_0}$	0	0	$-\frac{2}{3L_n}$	$\frac{1}{3L_n}$	$\frac{1}{3L_n}$
4	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0	$-\frac{c_1}{C_0}$	0	0	$\frac{c_2}{C_0}$	0	0	$\frac{-1}{C_0}$	$-\frac{1}{3L_n}$	$-\frac{1}{3L_n}$	$\frac{2}{3L_n}$
5	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	$\frac{c_1}{C_0}$	0	0	$-\frac{c_2}{C_0}$	0	0	$\frac{1}{C_0}$	0	$\frac{1}{3L_n}$	$-\frac{2}{3L_n}$	
6	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{c_1}{C_0}$	0	0	$\frac{c_2}{C_0}$	0	0	$\frac{-1}{C_0}$	0	0	$\frac{2}{3L_n}$	$-\frac{1}{3L_n}$	$-\frac{1}{3L_n}$

Для моделювання АГ із ВЗ за допомогою (5) необхідно мати інформацію про часові границі існування миттєвих схем заміщення. Частота зміни повного циклу миттєвих схем заміщення визначається як

$$f_{zm} = 1/6T_i \quad \text{або} \quad f_{zm} = f_e(1-\nu), \quad (6,7)$$

де T_i - тривалість існування i -тої схеми заміщення, $f_e = \omega p_n / 2\pi$ - синхронна електрична частота статора, ν - деяка додатна величина, що визначає взаємозв'язок між електричною частотою f_e і частотою f_{zm} . Прирівнявши (6) і (7), отримуємо вираз для визначення часу існування кожної схеми заміщення

$$T_i = \pi / 3\omega p_n (1-\nu). \quad (8)$$

Використовуючи викладений підхід до моделювання АГ з ВЗ із однократним алгоритмом перемикання напівпровідникових ключів, може бути розроблена модель генератора, який керується за алгоритмом багатократного перемикання вентилів [4]. Але для цього необхідно мати інформацію про стан напівпровідникових елементів перетворювача, що дозволить виявити послідовність існування миттєвих схем АГ з ВЗ.

Алгоритм розрахунку. Розроблена математична модель може бути використана для розрахунку електромагнітних процесів в АГ із ВЗ як з частотним принципом керування, так і з фазовим.

Розрахунок електромагнітних процесів з частотним керуванням проводиться в наступній послідовності: по (8) визначається час існування i -ї схеми заміщення; з використанням (4) і залежності $L_m = f(Y_m)$ визначається індуктивність взаємоіндукції L_m ; знаходять константи c_1, c_2, c_3 ; інтегрується система рівнянь (5) для i -ї схеми заміщення; перевіряється, чи не скінчився період існування миттєвої схеми заміщення. Якщо ні, – то повтор визначення L_m , якщо так, – то перехід до наступної схеми. При цьому значення змінних стану в кінці інтервалу існування схеми є початковими для наступного $X_0 = X$.

Для отримання результатів, які б максимально співпадали з експериментальними даними, та зменшення часу обчислень необхідно використовувати метод інтегрування жорстких диференціальних рівнянь з автоматичною корекцією кроку, наприклад, L -stable метод Розенброка [7,8].

При моделюванні частота зміни схем заміщення розраховується відповідно до закону: $t < 1\text{с}$, $\nu = 0.005$ (початкове збудження виконується при фіксованій частоті);

$t \geq 1\text{с}$, $\nu = k_p(U_m^* - u_m) + \frac{1}{T_i} \int (U_m^* - u_m) dt$, де u_m і U_m^* - миттєве і задане значення напруги на виході постійного струму, k_p - коефіцієнт підсилення пропорційної складової регулятора напруги, T_i - стала часу інтегральної складової регулятора напруги.

Як приклад, що ілюструє ефективність запропонованої моделі і алгоритму розрахунку, на рис. 4 показано розрахункові криві напруги (u_ϕ) і струму (i_ϕ) та їхні перші гармоніки ($u_{\phi 1}$ і $i_{\phi 1}$) АГ з ВЗ

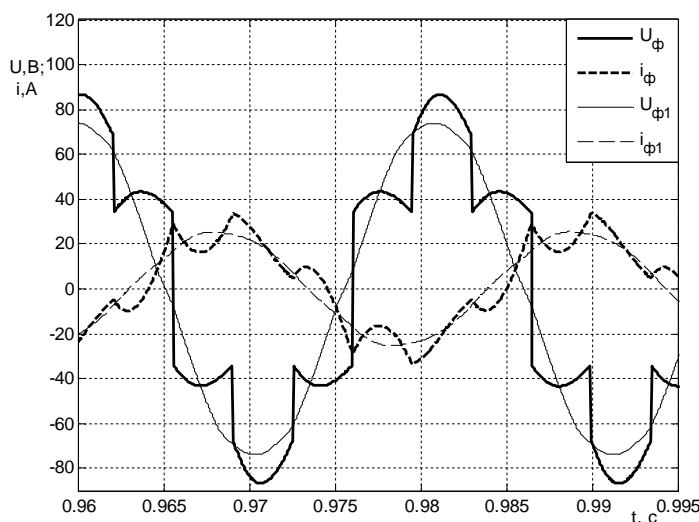


Рис. 4

математичну модель асинхронного генератора з вентильним збудженням, яка базується на його миттєвих схемах заміщення і не потребує інформації про стан напівпровідникових елементів на кожному кроці розв'язку системи диференціальних рівнянь. При використанні запропонованої моделі тривалість розрахунку в 10 -15 разів менша у порівнянні з відомими моделями без втрати точності обчислень.

1. Костырев М.Л., Скороспешкин А.И. Автономные асинхронные генераторы с вентильным возбуждением. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 160 с.
2. Лиценко А.И., Лесник В.А., Мазуренко Л.И. Математическая модель и алгоритм расчета режимов асинхронного стартер-генератора с транзисторным преобразователем // Техн. электродинамика. – 1989. – №5. – С. 55–61.
3. Лиценко А.И., Мазуренко Л.И. Математическое моделирование асинхронных генераторов с вентильным возбуждением в фазовых координатах статора // Техн. электродинамика. – 1997. – №6. – С. 31–36.
4. Мазуренко Л.И. Определение состояния полупроводниковых элементов преобразователя асинхронного генератора с вентильным возбуждением // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. Енергоефективність. – 2000. – С. 18–25.
5. Мазуренко Л.И. Электромагнитные процессы в асинхронном генераторе с вентильным возбуждением // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 1999. – Вип.1. – С. 88–96.
6. Панов А.Н. Методика исследования электромагнитных процессов в асинхронном генераторе при возбуждении от преобразователя частоты // Тр. Моск. ин-та инж. ж/д тран-та. – 1977. – Вып. 574. – С. 57–65.
7. Hairer E., Wanner G. Differential Equations II Stiff and Differential-Algebraic Problems. - New-York: Springer-Verlag, 1991. – 601 p.
8. Negrut D., Sandu A., Haug E.J., Porta F.A., Sandu C.A. Rosenbrok-Nystrom state space implicit approach for the dynamic analysis of mechanical systems: II-metho and numerical examples Proc.Instrn Mech Engrs. – 2003. – Vol. 217. – Pp. 273–281.

потужністю $P_n = 2.7$ кВт при активному навантаженні на клеммах постійного струму $0.9P_n$. Необхідно підкреслити, що при номінальних навантаженні а, відповідно, і ковзанні, форма кривої фазного струму АГ наближується до синусоїдальної, тобто із збільшенням ковзання форма кривої покращується. Розрахункові криві показують якісне і кількісне співпадання з результатами, що одержані за допомогою моделі, в якій стан напівпровідникових елементів визначається на кожному кроці інтегрування системи диференціальних рівнянь. Максимальне відхилення від експериментальних даних [5] становить близько 10% .

Висновки. Розроблено метод припасовування по відношенню до асинхронних машин з перетворювачем в колах статора та

Надійшла 07.12.2009