

УДК 621.313.52

М.Н.Лябук, М.М.Євсюк, Ю.І.Бреднева
Луцький національний технічний університет

РІВНЯННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ РІВНОВАГИ БЕЗКОНТАКТНОГО СУМІЩЕНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

В статті розглянена математична модель електромагнітних зв'язків безконтактного суміщеного синхронного генератора.

Дослідженню підлягає безконтактний суміщений синхронний генератор (БССГ), який являє собою явнopolосну машину, у якій суміщені на одному магнітопроводі основна явнopolосна синхронна машина (ЯСМ) і її збудник. Обмотка якоря основної ЯСМ розміщена в пазах статора, а обмотка збудження – на явновиражених полюсах ротора. Обмотка збудження збудника живиться від незалежного джерела, і має полюсність у два рази меншу від полюсності основної ЯСМ та розміщена в тих же пазах, що й обмотка якоря основної ЯСМ. Обмотка якоря збудника виконується зосередженою, розміщеною на роторі і охоплює по два явновиражених полюса. Обмотка збудження основної ЯСМ живиться від обмотки якоря збудника через обертовий випрямляч.

Необхідна точність може бути забезпечена тільки за умови, що в розробленій математичній моделі будуть ураховані всі основні фактори, що впливають на електромагнітні зв'язки в машині. Такими факторами є, насамперед, насичення магнітопровода, нерівномірність повітряного проміжку, негармонічний розподіл намагнічуючих сил обмоток уздовж полюсної поділки та анізотропність магнітопровода, що спричинена явнopolосною конструкцією ротора [1].

Для електричної схеми БССГ, зображеної на рис.1, рівняння електричної рівноваги мають вигляд:

$$\begin{aligned} p\psi_A + r_A i_A - u_A &= 0 ; & p\psi_f + r_f i_f - u_f &= 0 ; \\ p\psi_B + r_B i_B - u_B &= 0 ; & p\psi_x + r_x i_x - u_x &= 0 ; \\ p\psi_C + r_C i_C - u_C &= 0 ; & p\psi_F + r_F i_F - u_F &= 0 , \end{aligned} \quad (1.1)$$

де $p = \partial / \partial t$ - оператор диференціювання за часом; u, r, i, ψ - відповідно, прикладені напруги, активні опори, струми і повні потокозчеплення контурів машини.

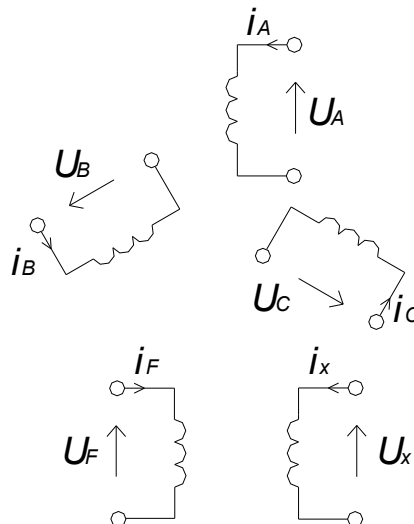


Рис.1. Електрична схема БССГ

Індекси А, В, С відповідають фазам основної обмотки статора (з числом полюсів $2p_0$);
х – якірній обмотці збудника (з числом полюсів $2p_0 / 2 = p_0$), F – основній обмотці збудника (з
числом полюсів $2p_0$), f – обмотці збудження збудника (з числом полюсів p_0).

Потокозчеплення електричних контурів є однозначними функціями струмів контурів і кута γ повороту ротора, тобто:

$$\begin{aligned} \Psi_A &= \Psi_A [i_A, i_B, i_C, i_f, i_x, i_F, \gamma]; & \Psi_f &= \Psi_f [i_A, i_B, i_C, i_f, i_x, i_F, \gamma]; \\ \Psi_B &= \Psi_B [i_A, i_B, i_C, i_f, i_x, i_F, \gamma]; & \Psi_x &= \Psi_x [i_A, i_B, i_C, i_f, i_x, i_F, \gamma]; \\ \Psi_C &= \Psi_C [i_A, i_B, i_C, i_f, i_x, i_F, \gamma]; & \Psi_F &= \Psi_F [i_A, i_B, i_C, i_f, i_x, i_F, \gamma]. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Сукупність залежностей (1.2) будемо називати явною зовнішньою електромагнітною характеристикою БССГ.

Під кутом γ будемо розуміти кут, що визначає зсув додатньої поздовжньої магнітної осі (геометричної осі полюса, на якому розташована котушка основної обмотки збудження, що створює додатню намагнічуючу силу при додатньому струмі i_f) по відношенню до осі фази А, що вимірюється в електричних радіанах для силової обмотки статора.

Отже, повні похідні потокозчеплення за часом можуть бути представлені у вигляді:

$$\begin{aligned} p\Psi_A &= \frac{\partial \Psi_A}{\partial i_A} p i_A + \frac{\partial \Psi_A}{\partial i_B} p i_B + \frac{\partial \Psi_A}{\partial i_C} p i_C + \frac{\partial \Psi_A}{\partial i_f} p i_f + \frac{\partial \Psi_A}{\partial i_x} p i_x + \frac{\partial \Psi_A}{\partial i_F} p i_F + \frac{\partial \Psi_A}{\partial \gamma} p \gamma; \\ p\Psi_B &= \frac{\partial \Psi_B}{\partial i_A} p i_A + \frac{\partial \Psi_B}{\partial i_B} p i_B + \frac{\partial \Psi_B}{\partial i_C} p i_C + \frac{\partial \Psi_B}{\partial i_f} p i_f + \frac{\partial \Psi_B}{\partial i_x} p i_x + \frac{\partial \Psi_B}{\partial i_F} p i_F + \frac{\partial \Psi_B}{\partial \gamma} p \gamma; \\ p\Psi_C &= \frac{\partial \Psi_C}{\partial i_A} p i_A + \frac{\partial \Psi_C}{\partial i_B} p i_B + \frac{\partial \Psi_C}{\partial i_C} p i_C + \frac{\partial \Psi_C}{\partial i_f} p i_f + \frac{\partial \Psi_C}{\partial i_x} p i_x + \frac{\partial \Psi_C}{\partial i_F} p i_F + \frac{\partial \Psi_C}{\partial \gamma} p \gamma; \\ p\Psi_f &= \frac{\partial \Psi_f}{\partial i_A} p i_A + \frac{\partial \Psi_f}{\partial i_B} p i_B + \frac{\partial \Psi_f}{\partial i_C} p i_C + \frac{\partial \Psi_f}{\partial i_f} p i_f + \frac{\partial \Psi_f}{\partial i_x} p i_x + \frac{\partial \Psi_f}{\partial i_F} p i_F + \frac{\partial \Psi_f}{\partial \gamma} p \gamma; \\ p\Psi_x &= \frac{\partial \Psi_x}{\partial i_A} p i_A + \frac{\partial \Psi_x}{\partial i_B} p i_B + \frac{\partial \Psi_x}{\partial i_C} p i_C + \frac{\partial \Psi_x}{\partial i_f} p i_f + \frac{\partial \Psi_x}{\partial i_x} p i_x + \frac{\partial \Psi_x}{\partial i_F} p i_F + \frac{\partial \Psi_x}{\partial \gamma} p \gamma; \\ p\Psi_F &= \frac{\partial \Psi_F}{\partial i_A} p i_A + \frac{\partial \Psi_F}{\partial i_B} p i_B + \frac{\partial \Psi_F}{\partial i_C} p i_C + \frac{\partial \Psi_F}{\partial i_f} p i_f + \frac{\partial \Psi_F}{\partial i_x} p i_x + \frac{\partial \Psi_F}{\partial i_F} p i_F + \frac{\partial \Psi_F}{\partial \gamma} p \gamma. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Часткові похідні, що входять у рівняння (1.3), мають вигляд:

$$\partial \Psi_J / \partial i_K = L_{J,K}, \quad (J, K = A, B, C, f, x, F) \quad (1.4 a)$$

за своїм фізичним змістом є диференційними індуктивностями контурів машини, а часткові похідні виду:

$$\partial \Psi_J / \partial \gamma = \Gamma_{J,\gamma}, \quad (J = A, B, C, f, x, F) \quad (1.4 б)$$

- коефіцієнтами ЕРС обертання контурів.

Введемо у розгляд вектори-стовпці: повних потокозчеплень:

$$\vec{\Psi} = \text{colon}(\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_f, \Psi_x, \Psi_F), \quad (1.5 a)$$

струмів:

$$\vec{i} = \text{colon}(i_A, i_B, i_C, i_f, i_x, i_F), \quad (1.5 б)$$

і напруг:

$$\vec{u} = \text{colon}(u_A, u_B, u_C, u_f, u_x, u_F), \quad (1.5 в)$$

діагональну матрицю активних опорів:

$$r = \text{diag}(r_A, r_B, r_C, r_f, r_x, r_F), \quad (1.5 г)$$

і вектор-стовбець:

$$\vec{m} = \text{colon}(\vec{i}, \gamma) = \text{colon}(i_A, i_B, i_C, i_f, i_x, i_F, \gamma), \quad (1.5 д)$$

що в подальшому називатиметься аргументом електромагнітної характеристики.

З урахуванням позначень (1.5), систему семи рівнянь електричної рівноваги запишемо одним векторним рівнянням:

$$p\vec{\Psi} + r\vec{i} - \vec{u} = 0, \quad (1.6)$$

а явно зовнішню електромагнітну характеристику (1.2) – одним векторним рівнянням:

© М.Н.Лябук, М.М.Євсюк, Ю.І.Бреднева

$$\bar{\psi} = \bar{\psi}[\bar{m}]. \quad (1.7)$$

Повна похідна вектора $\bar{\psi}$ за часом з врахуванням (1.7) може бути записана у вигляді:

$$p\bar{\psi} = \left(\partial\bar{\psi} / \partial\bar{m} \right) * p\bar{m} = S_{\psi} p\bar{m}, \quad (1.8)$$

де S_{ψ} - повна похідна явної зовнішньої електромагнітної характеристики, що є матрицею зовнішніх електромагнітних параметрів БССГ.

Елементи $L_{J,K}$ і $\Gamma_{J,\gamma}$ ($J,K = A,B,C,f,x,F$) цієї матриці в загальному випадку є функціями струмів усіх електричних контурів і кута γ .

Елементи $L_{J,K}$ створюють квадратну матрицю диференціальних індуктивностей, а елементи $\Gamma_{J,\gamma}$ - вектор-стовпець коефіцієнтів ЕРС обертання.

$$S_{\psi} = \begin{pmatrix} \frac{\partial\psi_A}{\partial i_A} & \frac{\partial\psi_A}{\partial i_B} & \frac{\partial\psi_A}{\partial i_C} & \frac{\partial\psi_A}{\partial i_f} & \frac{\partial\psi_A}{\partial i_x} & \frac{\partial\psi_A}{\partial i_F} & \frac{\partial\psi_A}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial\psi_B}{\partial i_A} & \frac{\partial\psi_B}{\partial i_B} & \frac{\partial\psi_B}{\partial i_C} & \frac{\partial\psi_B}{\partial i_f} & \frac{\partial\psi_B}{\partial i_x} & \frac{\partial\psi_B}{\partial i_F} & \frac{\partial\psi_B}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial\psi_C}{\partial i_A} & \frac{\partial\psi_C}{\partial i_B} & \frac{\partial\psi_C}{\partial i_C} & \frac{\partial\psi_C}{\partial i_f} & \frac{\partial\psi_C}{\partial i_x} & \frac{\partial\psi_C}{\partial i_F} & \frac{\partial\psi_C}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial\psi_f}{\partial i_A} & \frac{\partial\psi_f}{\partial i_B} & \frac{\partial\psi_f}{\partial i_C} & \frac{\partial\psi_f}{\partial i_f} & \frac{\partial\psi_f}{\partial i_x} & \frac{\partial\psi_f}{\partial i_F} & \frac{\partial\psi_f}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial\psi_x}{\partial i_A} & \frac{\partial\psi_x}{\partial i_B} & \frac{\partial\psi_x}{\partial i_C} & \frac{\partial\psi_x}{\partial i_f} & \frac{\partial\psi_x}{\partial i_x} & \frac{\partial\psi_x}{\partial i_F} & \frac{\partial\psi_x}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial\psi_F}{\partial i_A} & \frac{\partial\psi_F}{\partial i_B} & \frac{\partial\psi_F}{\partial i_C} & \frac{\partial\psi_F}{\partial i_f} & \frac{\partial\psi_F}{\partial i_x} & \frac{\partial\psi_F}{\partial i_F} & \frac{\partial\psi_F}{\partial \gamma} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} & L_{Af} & L_{Ax} & L_{AF} & \Gamma_A \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} & L_{Bf} & L_{Bx} & L_{BF} & \Gamma_B \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} & L_{Cf} & L_{Cx} & L_{CF} & \Gamma_C \\ L_{fA} & L_{fB} & L_{fC} & L_{ff} & L_{fx} & L_{fF} & \Gamma_f \\ L_{xA} & L_{xB} & L_{xC} & L_{xf} & L_{xx} & L_{xF} & \Gamma_x \\ L_{fA} & L_{fB} & L_{fC} & L_{ff} & L_{fx} & L_{fF} & \Gamma_f \end{pmatrix} = (L \quad \bar{\Gamma}) \quad (1.9)$$

З урахуванням (1.8) рівняння (1.6) набуде вигляд:

$$S_{\psi} p\bar{m} + r\bar{i} - \bar{u} = 0. \quad (1.10)$$

Алгоритм розрахунку матриці S_{ψ} для будь-якого магнітного стану машини, що задається вектором \bar{m} , є невід'ємною складовою частини алгоритму розрахунку перехідних процесів розглянутої електричної машини.

1. Фільц Р.В., Лябук М.Н. Математическое моделирование явнополюсных синхронных машин. – Львов: Свит, 1991. – 176 с.