

УДК 621.313.332

**ПЕРЕДАТОЧНА ФУНКЦІЯ АВТОНОМНОГО АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З ВЕНТИЛЬНИМ ЗБУДЖЕННЯМ**

**Л. І. Мазуренко, В. І. Романенко, О. В. Джура**

Інститут електродинаміки НАН України  
просп. Перемоги, 56, м. Київ, 03680, Україна. E-mail: volodimir\_r@ukr.net

Асинхронний генератор з вентилями збудження можна використовувати для зварювання постійним струмом. Для налаштування контурів стабілізації напруги й струму, які забезпечують формування зовнішньої характеристики, необхідна передаточна функція генератора. Розглянуто нелінійну систему диференціальних рівнянь, що описує асинхронний генератор з вентилями збудження з навантаженням у колі постійного струму в ортогональній системі координат, орієнтованій за вектором напруги статора. Показано, що передаточну функцію генератора можна отримати при лінеаризації цих рівнянь шляхом розкладання в ряд Тейлора біля робочої точки і введенні нової змінної. Наведено вирази для обчислення коефіцієнтів передаточної функції. Показано, що отримані результати дозволяють налаштувати ПІД-регулятори струму й напруги, із застосуванням яких генератор можна використовувати для зварювання.

**Ключові слова:** асинхронний генератор, вентильне збудження, передаточна функція.

**ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ АВТОНОМНОГО АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ВЕНТИЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ**

**Л. И. Мазуренко, В. И. Романенко, А. В. Джура**

Институт электродинамики НАН Украины  
просп. Победы, 56, г. Киев, 03680, Украина. E-mail: volodimir\_r@ukr.net

Асинхронный генератор с вентилями возбуждения можно использовать для сварки постоянным током. Для настройки контуров стабилизации напряжения и тока, которые обеспечивают формирование внешней характеристики, необходима передаточная функция генератора. Рассмотрена нелинейная система дифференциальных уравнений, описывающих асинхронный генератор с вентилями возбуждением с нагрузкой в цепи постоянного тока в ортогональной системе координат, ориентированной по вектору напряжения статора. Показано, что передаточную функцию генератора можно получить при линейризации этих уравнений путем разложения в ряд Тейлора в окрестности рабочей точки и введении новой переменной. Приведены выражения для коэффициентов передаточной функции. Показано, что полученные результаты позволяют настроить ПИД-регуляторы напряжения и тока, при использовании которых генератор можно применять для сварки.

**Ключевые слова:** асинхронный генератор, вентильное возбуждение, передаточная функция.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** При використанні автономного асинхронного генератора з вентилями збудження (АГ з ВЗ) для зварювання постійним струмом (рис. 1) на виході кола постійного струму необхідно забезпечити формування зварювальної характеристики.

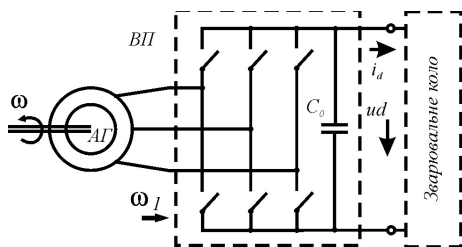


Рисунок 1 - Зварювальний автономний АГ з ВЗ

У цьому випадку генератор може працювати в режимах або регулювання напруги  $u_d$ , або струму  $i_d$ . Для цього система керування (СК) генератора виконується зі змінною структурою (має два незалежних контури: регулювання напруги КРН і струму КРС) і має програму завдання зовнішньої зварювальної характеристики (рис. 2). Залежно від положення робочої точки блоком перемикачів (БПК) вибирається контур, який формує відповідну частину характеристики [1].

Сигнали завдання напруги  $u_d^*$  і струму  $i_d^*$  формуються відповідно до програми завдання. За значенням відхилення регульованої величин у вибраному контурі формується керуючий вплив, за яким у блоці узгодження БУ визначається кутова швидкість поля  $\omega_1$  і

подається до вентильного перетворювача (ВП).

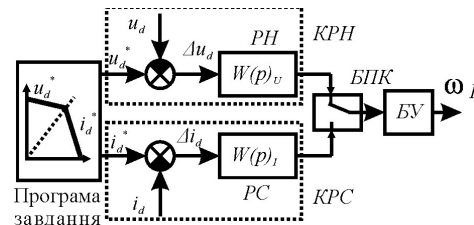


Рисунок 2 – Функціональна схема СК АГ

Головною проблемою при створенні СК є налаштування регуляторів напруги  $PH$  і струму  $PC$  відповідних контурів для забезпечення точності й швидкодії відпрацювання програми завдання при формуванні зовнішньої характеристики, що пов'язано зі складністю визначення передаточної функції АГ з ВЗ при частотному керуванні, яку б можна було використати для синтезу регуляторів.

Метою роботи є одержання передаточної функції АГ з ВЗ, які можна використовувати для налаштування регуляторів напруги і струму.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Система диференціальних рівнянь, що описує асинхронну машину в системі  $dq$ , що обертається із швидкістю поля  $\omega_1$ , має вигляд [2]:

$$\begin{cases} \dot{i}_{1d} = -\gamma i_{1d} + \omega_1 i_{1q} + \alpha \beta \psi_{2d} + \beta \omega \psi_{2q} + u_{1d} / \sigma; \\ \dot{i}_{1q} = -\omega_1 i_{1d} - \gamma i_{1q} - \beta \omega \psi_{2d} + \alpha \beta \psi_{2q} + u_{1q} / \sigma; \\ \dot{\psi}_{2d} = \alpha L_m i_{1d} - \alpha \psi_{2d} + (\omega_1 - \omega) \psi_{2q}; \\ \dot{\psi}_{2q} = \alpha L_m i_{1q} - (\omega_1 - \omega) \psi_{2d} - \alpha \psi_{2q}, \end{cases} \quad (1)$$

де  $\omega$  – швидкість обертання ротора;  $\alpha = R_2/L_2$ ;  $\beta = L_m/\sigma L_2$ ;  $\gamma = R_1/\sigma + \alpha\beta L_m$ ;  $\sigma = L_1(1 - L_m^2/L_1L_2)$ ;  $R_1, R_2$  – активні опори статора і ротора;  $L_1 = L_{1\sigma} + L_m$ ,  $L_2 = L_{2\sigma} + L_m$  – індуктивності статора і ротора,  $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$  – індуктивності розсіювання статора і ротора,  $L_m$  – індуктивність контуру намагнічування.

При частотному керуванні керуючим впливом у системі (1) є швидкість поля. У кожному з рівнянь є добуток швидкості поля на змінні, які роблять систему рівнянь нелінійною. Для лінеаризації (1) необхідно позбавитися від складових вигляду  $f_1 = i_i\omega_1$ ,  $f_2 = (\omega_1 - \omega)\psi_i$ .

Лінеаризацію функції  $f(x, y)$  виконують шляхом розкладання в ряд Тейлора біля точки  $(X_0, Y_0)$  за наступним виразом (вищими членами ряду нехтують) [3]:

$$f(x, y) = f(X_0, Y_0) + \frac{\partial f(X_0, Y_0)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f(X_0, Y_0)}{\partial y} \Delta y,$$

де  $\Delta x, \Delta y$  – відхилення аргументів від значень  $X_0, Y_0$  ( $\Delta x = x - X_0, \Delta y = y - Y_0$ ).

Функцію  $f_1 = i_i\omega_1$  (де  $i_i = i_{1d}, i_{1q}$ ) біля точок  $(I_{1i}, \Omega)$  лінеаризують наступним чином:

$$i_i\omega_1 = I_{1i} \Omega + I_{1i} \Delta\omega + \omega \Delta i_i = I_{1i} (\omega_1 - \Omega) + \Omega i_i.$$

Якщо ввести новий керуючий вплив

$$v = \frac{\Omega - \omega_1}{\Omega}, \quad (2)$$

то формула для лінеаризації функції  $f_1$  прийме вигляд  $i_i\omega_1 = -I_{1i} \Omega v + \Omega i_i$ ,

де  $\Omega$  – кутова швидкість обертання ротора;  $I_{1i}$  – значення відповідної складової струму статора в точці лінеаризації.

Виходячи з аналогічних міркувань, виконується лінеаризація функції  $f_2$ :

$$(\omega_1 - \omega)\psi_i = -\Psi_i \Omega v, \quad (4)$$

де  $\Psi_i$  – значення відповідної складової потокозчеплення ротора в точці лінеаризації.

Лінеаризовану систему диференціальних рівнянь, що описує АМ при частотному керуванні, отримують після підстановки (2)–(4) в (1):

$$\begin{cases} \dot{i}_{1d} = -\gamma i_{1d} + \Omega i_{1q} + \alpha \beta \psi_{2d} + \beta \Omega \psi_{2q} + \frac{u_{1d}}{\sigma} - I_{1q} \Omega v; \\ \dot{i}_{1q} = -\Omega i_{1d} - \gamma i_{1q} - \beta \Omega \psi_{2d} + \alpha \beta \psi_{2q} + \frac{u_{1q}}{\sigma} + I_{1d} \Omega v; \\ \dot{\psi}_{2d} = \alpha L_m i_{1d} - \alpha \psi_{2d} - \Psi_{2q} \Omega v; \\ \dot{\psi}_{2q} = \alpha L_m i_{1q} - \alpha \psi_{2q} + \Psi_{2d} \Omega v. \end{cases} \quad (5)$$

Лінеаризована система диференціальних рівнянь (5) описує АГ при частотному керуванні, де члени, що містять добуток змінних на швидкість поля, замінено еквівалентною сумою, а новим керуючим впливом є величина, що обчислюється за формулою (2).

При орієнтації системи координат  $dq$  за вектором напруги статора  $\vec{u}_1(u_{1d}, u_{1q})$  його компонента за віссю  $q$  дорівнює нулю

$$u_{1q} = 0. \quad (6)$$

У цьому випадку величина  $u_{1d}$  визначає амплітудне значення фазної напруги статора

При використанні алгоритму векторної ШІМ для перемикання ключів ВП зв'язок між напругою кола постійного струму і діючим значенням першої гармоніки фазної напруги статора визначається співвідношенням  $u_d = K_{U0}u_1$ , а величина  $K_{U0}$  залежить від глибини модуляції  $\mu$  (рис. 3)

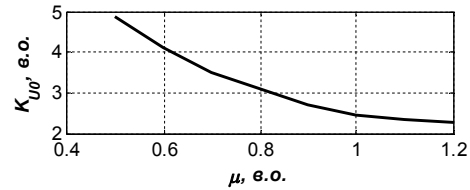


Рисунок 3 – Залежність  $K_{U0}$  від глибини модуляції при векторній ШІМ

Тоді зв'язок між напругою кола постійного струму  $u_d$  і проекцією вектора напруги статора  $u_{1d}$  визначається як

$$u_d = K_u u_{1d}, \quad (7)$$

де  $K_u = K_{U0} / \sqrt{2}$ . При частотному керуванні доцільно приймати  $\mu = 0,9 \dots 1$ , при цьому  $K_{U0} = 2,56 \dots 2,45$  (рис. 3).

Умова інваріантності активної потужності трифазної та двофазної систем координат має вигляд

$$P_{abc} = 3/2 P_{dq}. \quad (8)$$

Для зварювального АГ з ВЗ

$$P_{abc} \approx P_d = i_d u_d. \quad (9)$$

Активна потужність АГ у двофазній системі координат має вигляд

$$P_{dq} = -u_{1d} i_{1d}. \quad (10)$$

Після підстановки (7), (9) і (10) у (8) отримують вираз, що пов'язує струм кола постійного струму  $i_d$  і проекцію вектора струму статора на вісь  $d$

$$i_d = K_i i_{1d}, \text{ де } K_i = -\frac{3}{2K_u}.$$

Для отримання зв'язку між електромагнітними процесами в машині й колі постійного струму в динамічних режимах необхідно розглянути еквівалентну схему кола постійного струму (рис. 4).  $i_{in} = K_i i_{1d}$  – вхідний струм,  $C_i = K_{U0} C_0$  – ємність еквівалентного конденсатора, де  $C_0$  – ємність конденсатора в реальній схемі,  $R_{XX}$  – опір, що визначає втрати у ВП на холостому ході (можна вважати, що  $R_{XX} = 0,01u_d^2/P_d$ ).

Диференціальне рівняння, що встановлює взаємозв'язок між напругою  $u_d$  і струмом  $i_{in}$  дозволяє привести коло постійного струму до статора:

$$\frac{du_d}{dt} = -\frac{1}{C_i r_{d\Sigma}} u_d + \frac{1}{C_i} i_{in}, \quad (11)$$

де  $r_{d\Sigma} = R_{XX} R_d / (R_{XX} + R_d)$ .

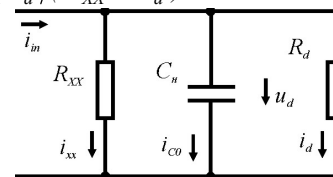


Рисунок 4 – Схема кола постійного струму

Після доповнення виразом (11) і виконання умови

(6) система (5) приймає вигляд

$$\begin{cases} \dot{i}_{1d} = -\gamma i_{1d} + \Omega i_{1q} + \alpha \beta \psi_{2d} + \beta \Omega \psi_{2q} + \frac{1}{K_u \sigma} u_d - I_{1q} \Omega v; \\ \dot{i}_{1q} = -\Omega i_{1d} - \gamma i_{1q} - \beta \Omega \psi_{2d} + \alpha \beta \psi_{2q} + I_{1d} \Omega v; \\ \dot{\psi}_{2d} = \alpha L_m i_{1d} - \alpha \psi_{2d} - \Psi_{2q} \Omega v; \\ \dot{\psi}_{2q} = \alpha L_m i_{1q} - \alpha \psi_{2q} + \Psi_{2d} \Omega v; \\ \dot{u}_d = \frac{K_i}{C_i} i_{1d} - \frac{1}{C_i r_{d\Sigma}} u_d. \end{cases} \quad (12)$$

Отримана лінійна система рівнянь описує асинхронний генератор з навантаженням кола постійного струму при частотному керуванні біля робочої точки.

Систему (12) можна записати у матричному вигляді:

$$\dot{X} = AX + BU,$$

де  $X = [i_{1d} \ i_{1q} \ \psi_{2d} \ \psi_{2q} \ u_d]^T$  – вектор стану,

$$U = v \text{ – вхідний (керуючий) вплив, } A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{15} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ a_{51} & \dots & a_{55} \end{bmatrix}$$

– матриця стану системи,  $B = [b_1 \ \dots \ b_5]^T$  – матриця, що описує керуючий вплив на змінні стану системи.

Елементи матриці  $A$  мають значення:

$$\begin{aligned} a_{11} &= -\gamma, & a_{12} &= \Omega, & a_{13} &= \alpha \beta, & a_{14} &= \beta \Omega, \\ a_{15} &= \frac{1}{K_u \sigma}, & a_{21} &= -\Omega, & a_{22} &= -\gamma, & a_{23} &= -\beta \Omega, \\ a_{24} &= \alpha \beta, & a_{25} &= 0; & a_{31} &= \alpha L_m, & a_{32} &= 0, & a_{33} &= -\alpha, \\ a_{34} &= 0, & a_{35} &= 0, & a_{41} &= 0, & a_{42} &= \alpha L_m, & a_{43} &= 0, \\ a_{44} &= -\alpha, & a_{45} &= 0, & a_{51} &= \frac{K_i}{C_i}, & a_{52} &= 0, & a_{53} &= 0, \\ a_{54} &= 0, & a_{55} &= -\frac{1}{C_i r_{d\Sigma}}. \end{aligned}$$

Елементи матриці  $B$  визначаються наступним чином:

$$b_1 = -I_{1q} \Omega, \quad b_2 = I_{1d} \Omega, \quad b_3 = -\Psi_{2q} \Omega, \quad b_4 = \Psi_{2d} \Omega, \quad b_5 = 0.$$

При керуванні напругою кола постійного струму вихідною величиною є  $u_d$ , а при керуванні струмом –  $i_d$ . Матричне рівняння, яке пов'язує вихідну змінну зі змінними простору стану, має вигляд:

$$Y = CX.$$

При керуванні напругою  $C = C_U = |0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1|$ ,  $Y = u_d$ , а при керуванні струмом  $C = C_I = |K_i \ 0 \ 0 \ 0 \ 0|$ ,  $Y = i_{in} \approx i_d$ .

Для виведення передаточної функції АГ розглянемо матричне рівняння в просторі стану, що описує АГ з навантаженням кола постійного струму при частотному керуванні

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU; \\ Y = CX, \end{cases} \quad (13)$$

де  $C$  і  $Y$  визначаються вибраною керованою величиною.

З рівнянь (13) легко отримати передаточні функції:

$$\begin{aligned} &\text{– за струмом} \\ W_I(p) &= C_I (pI - A)^{-1} B = \frac{i_{in}(p)}{v(p)}, \quad (14) \\ &\text{– за напругою} \end{aligned}$$

$$W_U(p) = C_U (pI - A)^{-1} B = \frac{u_d(p)}{v(p)}, \quad (15)$$

де  $I$  – одинична матриця, в якій всі елементи, що розміщені на головній діагоналі, дорівнюють одиниці, а інші – нулю й яка має розмірність матриці  $A$ .

Індуктивність контуру намагнічування, що необхідна для обчислення елементів матриці  $A$  визначається в робочій точці. Невідомою залишається матриця  $B$ , елементи в якій визначаються точкою лінеаризації. Їх можна знайти як розв'язок перших чотирьох рівнянь системи (12) в усталеному режимі для вибраної робочої точки  $u_d = U_d$ ,  $i_d = I_d$ , зважаючи на те, що  $I_{1d} = I_d / K_i$ :

$$\begin{cases} -\frac{\gamma}{K_i} I_d + \Omega I_{1q} (1-v) + \alpha \beta \Psi_{2d} + \beta \Omega \Psi_{2q} + \frac{1}{K_u \sigma} U_d = 0; \\ -\frac{\omega}{K_i} I_d (v-1) - \gamma I_{1q} - \beta \Omega \Psi_{2d} + \alpha \beta \Psi_{2q} = 0; \\ \frac{\alpha L_m}{K_i} I_d - \alpha \Psi_{2d} - \Psi_{2q} \Omega v = 0; \\ \alpha L_m I_{1q} - \alpha \Psi_{2q} + \Psi_{2d} \Omega v = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Система (16) нелінійна відносно змінних  $I_{1q}$ ,  $\Psi_{2d}$ ,  $\Psi_{2q}$ ,  $v$ , тому розв'язок варто знаходити в числовому вигляді. Отримані величини  $I_{1d}$ ,  $I_{1q}$ ,  $\Psi_{2d}$  і  $\Psi_{2q}$  дозволяють повністю визначити параметри передаточних функцій (14) і (15).

У розгорнутому вигляді передаточна функція за напругою має вигляд

$$W_U(p) = \frac{m_1 p^3 + m_2 p^2 + m_3 p + m_4}{d_1 p^5 + d_2 p^4 + d_3 p^3 + d_4 p^2 + d_5 p + d_6},$$

за струмом

$$W_I(p) = \frac{k_1 p^4 + k_2 p^3 + k_3 p^2 + k_4 p + k_5}{d_1 p^5 + d_2 p^4 + d_3 p^3 + d_4 p^2 + d_5 p + d_6}.$$

Варто зазначити, що передаточні функції за напругою й за струмом відрізняються лише чисельниками.

Коефіцієнти чисельників і знаменників передаточних функцій знаходяться при групуванні членів при однакових степенях  $p$  і визначаються за наступними виразами:

$$\begin{aligned} m_1 &= -a_{51} b_1; \\ m_2 &= a_{51} ((a_{22} + a_{33} + a_{44}) b_1 - a_{12} b_2 - a_{13} b_3 - a_{14} b_4); \\ m_3 &= a_{51} ((a_{24} a_{42} - a_{22} a_{44} - a_{22} a_{33} - a_{33} a_{44}) b_1 + \\ &+ (a_{12} a_{33} + a_{12} a_{44} - a_{14} a_{42}) b_2 + (a_{13} a_{22} - a_{12} a_{23} + a_{13} a_{44}) b_3 + \\ &+ (a_{14} a_{22} - a_{12} a_{24} - a_{14} a_{33}) b_4); \\ m_4 &= a_{51} ((a_{22} a_{33} a_{44} - a_{24} a_{33} a_{42}) b_1 + \\ &+ (a_{14} a_{33} a_{42} - a_{12} a_{33} a_{44}) b_2 + (a_{12} a_{24} a_{33} - a_{14} a_{22} a_{33}) b_4 + \\ &+ (a_{12} a_{23} a_{44} - a_{13} a_{22} a_{44} + a_{13} a_{24} a_{42} - a_{14} a_{23} a_{42}) b_3); \\ k_1 &= -K_i b_1; \\ k_2 &= K_i ((a_{22} + a_{33} + a_{44} + a_{55}) b_1 - a_{12} b_2 - a_{13} b_3 - a_{14} b_4); \\ k_3 &= K_i ((a_{24} a_{42} - a_{22} a_{44} - a_{22} a_{33} - a_{22} a_{55} - a_{33} a_{44} - \\ &- a_{33} a_{55} - a_{44} a_{55}) b_1 + (a_{12} a_{33} + a_{12} a_{44} - a_{14} a_{42} + a_{12} a_{55}) b_2 + \\ &+ (a_{13} a_{22} - a_{12} a_{23} + a_{13} a_{44} + a_{13} a_{55}) b_3 + \\ &+ (a_{14} a_{22} - a_{12} a_{24} + a_{14} a_{33} + a_{14} a_{55}) b_4); \\ k_4 &= K_i ((a_{22} a_{33} a_{44} - a_{24} a_{33} a_{42} + a_{22} a_{33} a_{55} + a_{22} a_{44} a_{55} - \\ &- a_{24} a_{42} a_{55} + a_{33} a_{44} a_{55}) b_1 + (a_{14} a_{33} a_{42} - a_{12} a_{33} a_{44} - \\ &- a_{12} a_{33} a_{55} - a_{12} a_{44} a_{55} + a_{14} a_{42} a_{55}) b_2 + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & +(a_{12}a_{23}a_{44} - a_{13}a_{22}a_{44} + a_{13}a_{24}a_{42} - a_{14}a_{23}a_{42} + a_{12}a_{23}a_{55} - \\
 & - a_{13}a_{22}a_{55} - a_{13}a_{44}a_{55})b_3 + (a_{12}a_{24}a_{33} - \\
 & - a_{14}a_{22}a_{33} + a_{12}a_{24}a_{55} - a_{14}a_{22}a_{55} - a_{14}a_{33}a_{55})b_4); \\
 k_5 & = K_i((a_{24}a_{42} - a_{22}a_{44})a_{33}a_{55}b_1 + \\
 & + (a_{12}a_{44} - a_{14}a_{42})a_{33}a_{55}b_2 + (a_{13}a_{22}a_{44}a_{55} - \\
 & - a_{12}a_{23}a_{44}a_{55} - a_{13}a_{24}a_{42}a_{55} + a_{14}a_{23}a_{42}a_{55})b_3 + \\
 & + (a_{14}a_{22}a_{33}a_{55} - a_{12}a_{24}a_{33}a_{55})b_4); \\
 d_1 & = -1; \\
 d_2 & = a_{11} + a_{22} + a_{33} + a_{44} + a_{55}; \\
 d_3 & = a_{15}a_{51} - (a_{11} + a_{22} + a_{33} + a_{44})a_{55} + a_{12}a_{21} - a_{11}a_{22} - \\
 & - a_{11}a_{33} + a_{13}a_{31} - a_{11}a_{44} - a_{22}a_{33} - a_{22}a_{44} + a_{24}a_{42} - a_{33}a_{44}; \\
 d_4 & = -(a_{22} + a_{33} + a_{44})a_{15}a_{51} + a_{11}a_{22}a_{33} - a_{12}a_{21}a_{33} + \\
 & + a_{12}a_{23}a_{31} - a_{13}a_{22}a_{31} + a_{11}a_{22}a_{44} - \\
 & - a_{11}a_{24}a_{42} - a_{12}a_{21}a_{44} + a_{14}a_{21}a_{42} + a_{11}a_{33}a_{44} - a_{13}a_{31}a_{44} + \\
 & + a_{22}a_{33}a_{44} - a_{24}a_{33}a_{42} + (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} + a_{11}a_{33} - \\
 & - a_{13}a_{31} + a_{11}a_{44} + a_{22}a_{33} + a_{22}a_{44} - a_{24}a_{42} + a_{33}a_{44})a_{55}; \\
 d_5 & = (a_{15}a_{22}a_{33} + a_{15}a_{22}a_{44} - a_{15}a_{24}a_{42} + a_{15}a_{33}a_{44})a_{51} + \\
 & + a_{11}a_{24}a_{33}a_{42} - a_{11}a_{22}a_{33}a_{44} + a_{12}a_{21}a_{33}a_{44} - a_{12}a_{23}a_{31}a_{44} + \\
 & + a_{13}a_{22}a_{31}a_{44} - a_{13}a_{24}a_{31}a_{42} - a_{14}a_{21}a_{33}a_{42} + a_{14}a_{23}a_{31}a_{42} + \\
 & + (a_{12}a_{21}a_{33} - a_{11}a_{22}a_{33} - a_{12}a_{23}a_{31} + a_{13}a_{22}a_{31} - a_{11}a_{22}a_{44} + \\
 & + a_{11}a_{24}a_{42} + a_{12}a_{21}a_{44} - a_{14}a_{21}a_{42} - a_{11}a_{33}a_{44} + \\
 & + a_{13}a_{31}a_{44} - a_{22}a_{33}a_{44} + a_{24}a_{33}a_{42})a_{55}; \\
 d_6 & = (a_{24}a_{33}a_{42} - a_{22}a_{33}a_{44})a_{15}a_{51} + (a_{11}a_{22}a_{33}a_{44} - \\
 & - a_{11}a_{24}a_{33}a_{42} - a_{12}a_{21}a_{33}a_{44} + a_{12}a_{23}a_{31}a_{44} - a_{13}a_{22}a_{31}a_{44} + \\
 & + a_{13}a_{24}a_{31}a_{42} + a_{14}a_{21}a_{33}a_{42} - a_{14}a_{23}a_{31}a_{42})a_{55}.
 \end{aligned}$$

Отримані передаточні функції можна використовувати для дослідження динамічних режимів регулювання напруги та струму, а також для синтезу регуляторів відповідних контурів.

Так, при використанні методу корекції ЛАХ [4] було отримано ПІД-регулятори струму й напруги. Дослідження якості перехідних процесів у скоректованих

контурах показало, що при накиданні й скиданні номінального навантаження тривалість перехідного процесу становить 0,11 с та 0,04 с і 0,23 с та 0,05 с, а максимальне перерегулювання складає 13 і 14 % для контурів стабілізації напруги й струму відповідно. Перевірка отриманих регуляторів на експериментальному стенді зварювального АГ з ВЗ показала, що при використанні отриманих регуляторів забезпечується формування зовнішньої зварювальної характеристики для всіх значень навантаження і забезпечується стійкий процес горіння дуги.

ВИСНОВКИ. Застосування розкладання в ряд Тейлора функцій добутку дозволило одержати нову змінну  $v$  і отримати лінеаризовану систему диференціальних рівнянь в ортогональній системі координат  $dq$ , орієнтованій вздовж вектора напруги статора, що описують автономний АГ з ВЗ з навантаженням у колі постійного струму. Це дало змогу встановити передаточні функції АГ з ВЗ за напругою та струмом, які можуть бути використаними для синтезу регуляторів відповідних контурів. Показано, що використання отриманих результатів дозволяє отримати ПІД-регулятори контурів напруги й струму, при яких АГ з ВЗ можна застосовувати для зварювання постійним струмом.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Мазуренко Л.І., Романенко В.І. Асинхронний вентиляторний генератор в якості керованого джерела струму // Вісник НТУ "ХПІ". – 2010. – № 28. – С. 66–67.
2. Теорія електропривода: підручник / М.Г. Попович, М.Г. Борисюк, В.А. Гаврилюк та ін. – К.: Вища школа, 1993. – 494 с.
3. Солодовников В.В., Плотников Н.Я., Яковлев А.В. Теория автоматического управления техническими системами: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ, 1993. – 492 с.
4. Теория автоматического управления: учебник. Ч. 1 / Под ред. А.В. Нетушила. – М.: Высшая школа, 1967. – 424 с.

## TRANSFER FUNCTION OF STAND ALONE INDUCTION GENERATOR WITH INVERTER EXCITATION

L. Mazurenko, V. Romanenko, O. Dzhura

Institute of Electrodynamics of UNAS

prosp. Peremohy, 56, Kyiv, 03680, Ukraine. Email: volodimir\_r@ukr.net

Induction generator with inverter excitation can be used as dc current arc welding power supply. To obtain a welding feature it is necessary to adjust voltage and current loop in control system. For this purpose transfer function of the generator is used. A non linear system of differential equations of induction generator with inverter excitation in stator voltage two phase reference frame was discussed. Due to Taylor series expansion around the operating point and introduction of a new variable a transfer function of generator is obtained. Expressions for transfer function coefficients are given. It's shown that generator can operate as arc welding power supply using voltage and current PID controllers that configured with application of obtained results.

**Key words:** induction generator, inverter excitation, transfer function.

#### REFERENCES

1. Induction generator as a controlled current source / L.I. Mazurenko, V.I. Romanenko // *Bulletin of NTU "KhPI"*. – 2010. – Iss. 28. – PP. 66–67. [in Ukraine]
2. Popovych M.G., Borysiuk M.G., Gavryliuk V.A. *Electric drive theory: Manual*. – K.: Vyshsha shkola, 1993. – 494 p. [in Ukraine]
3. Solodovnikov V.V., Plotnikov N.Ya., Yakovlev A.V. *Theory of automatic control of technical systems: Manual*. – M.: MGTU press, 1993. – 492 p. [in Russian]
4. Netushil A.V. *Automation control theory: Manual*. – Part 1. – M.: Vyshshaya shkola, 1967. – 424 p. [in Russian]

Стаття надійшла 8.06.2012.

Рекомендовано до друку  
к.т.н., доц. Шамардіною В.Н.