

УДК 621.313.332

### ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З ВЕНТИЛЬНИМ ЗБУДЖЕННЯМ ТА ВЕКТОРНИМ КЕРУВАННЯМ

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

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

Розглянуто автономний асинхронний генератор з вентильним збудженням і векторним керуванням, який забезпечує стабілізацію вихідної напруги кола постійного струму. Надано математичну модель генератора й залежність між струмами та потокозчепленням у машині та напругою кола постійного струму при орієнтації за вектором потокозчеплення ротора. Сигнал завдання проєкції струму статора, що керує моментом, запропоновано визначати з умов балансу активної потужності в машині та колі постійного струму. Надано загальну процедуру синтезу регуляторів, закони керування для кожної змінної стану з рекомендаціями щодо їх налаштування, загальну структуру системи векторного керування. Наведено результати експериментальних досліджень, що підтверджують точність і високу динамічну швидкодію запропонованої системи керування за умов зміни частоти обертання та навантаження генератора.

**Ключові слова:** асинхронний генератор, вентильне збудження, векторне керування, синтез регуляторів.

### ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ВЕНТИЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ И ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

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

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

Рассмотрен автономный асинхронный генератор с вентильным возбуждением и векторным управлением, который стабилизирует выходное напряжение цепи постоянного тока. Представлена математическая модель генератора и зависимость между токами и потокосцеплением в машине и выходным напряжением цепи постоянного тока при ориентации по вектору потокосцепления ротора. Сигнал задания проекции тока статора, который управляет моментом, предложено находить из условия баланса активной мощности в машине и цепи постоянного тока. Изложены общая процедура синтеза регуляторов, законы управления для каждой переменной состояния с рекомендациями по их настройке, общая структура системы векторного управления. Приведены результаты экспериментальных исследований, которые подтверждают точность и высокое динамическое быстродействие предложенной системы управления при условиях переменной частоты вращения и нагрузки генератора.

**Ключевые слова:** асинхронный генератор, вентильное возбуждение, векторное управление, синтез регуляторов.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Останнім часом поширюється тенденція використання асинхронних генераторів з вентильним збудженням (АГ з ВЗ) у вітроенергетиці, на транспорті й в інших галузях, де є змінна частота обертання. Використання простих і надійних асинхронних машин, доступних швидкодіючих напівпровідникових елементів і потужних мікроконтролерів дозволяє створювати асинхронні генератори з векторним керуванням, які можуть успішно конкурувати з іншими типами генераторів [1, 2]. Значна увага приділяється використанню АГ з ВЗ у вітроустановках, що працюють на мережу [3–7]. Задача керування генератором зводиться до формування моменту, при якому коефіцієнт корисної дії вітротурбіни максимальний. При цьому відпадає задача стабілізації напруги, оскільки вона задається мережею. Проте в автономному режимі (мережа відсутня або має співрозмірну потужність) першочерговим є підтримка вихідної напруги на заданому рівні, незалежно від зміни величини навантаження й частоти обертання вала генератора. Ця особливість автономного режиму не дозволяє використовувати схемотехнічні рішення, які застосовуються при роботі АГ на мережу. Ця відмінність між автономним і неавтономним АГ з ВЗ при векторно-

му керуванні зумовлює різні підходи до обчислення сигналу завдання компоненти струму статора, що керує моментом (проєкція  $i_{1q}^*$  у системі координат  $dq$ ). Ця складова залежить від частоти обертання, напруги кола постійного струму й потокозчеплення ротора. Неврахування одного із цих факторів може призвести до значної динамічної похибки або до втрати самозбудження АГ з ВЗ. Так, у [4] величина сигналу завдання струму  $i_{1q}^*$  розраховується за заданою потужністю, а у [8] для цього використовують складний контур із ПІ-регулятором, налаштований для робочої точки з урахуванням коефіцієнтів модуляції проєкцій фазних напруг. Потрібно підкреслити, що вибір способів оцінки потокозчеплення й частоти обертання вала генератора суттєво впливають на якість процесів у генераторі.

Метою роботи є розробка алгоритму векторного керування автономним асинхронним генератором із вентильним збудженням та його експериментальні дослідження.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** *Математична модель АГ з ВЗ.* Система диференціальних рівнянь, що описує асинхронну машину (АМ) у системі координат  $dq$ , яка обертається з довідною швидкістю  $\omega_0$ , має вигляд [10]:

$$\begin{aligned} \dot{i}_{1d} &= -\gamma i_{1d} + \omega_0 i_{1q} + \alpha \beta \psi_{2d} + \beta p_n \omega \psi_{2q} + u_{1d} / \sigma; \\ \dot{i}_{1q} &= -\omega_0 i_{1d} - \gamma i_{1q} - \beta p_n \omega \psi_{2d} + \alpha \beta \psi_{2q} + u_{1q} / \sigma; \\ \dot{\psi}_{2d} &= \alpha L_m i_{1d} - \alpha \psi_{2d} + (\omega_0 - p_n \omega) \psi_{2q}; \\ \dot{\psi}_{2q} &= \alpha L_m i_{1q} - (\omega_0 - p_n \omega) \psi_{2d} - \alpha \psi_{2q}; \\ \dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $i_{1d}$ ,  $i_{1q}$ ,  $u_{1d}$ ,  $u_{1q}$ ,  $\psi_{2d}$  та  $\psi_{2q}$  – відповідно до проекції просторових векторів струму й напруги статора та потокозчеплення ротора;  $p_n$  – число пар полюсів;  $\omega$  – кутова частота обертання ротора;  $\varepsilon_0$  – кут повороту системи координат  $dq$ ;  $L_m$  – індуктивність контуру намагнічування;  $\alpha = R_2 / L_2$ ,  $\beta = L_m / \sigma L_2$ ;  $\gamma = R_1 / \sigma + \alpha \beta L_m$ ,  $\sigma = L_1 (1 - L_m^2 / L_1 L_2)$ ;  $L_1 = L_m + L_{1\sigma}$ ,  $L_2 = L_m + L_{2\sigma}$  – повні індуктивності статора й ротора;  $L_{1\sigma}$  і  $L_{2\sigma}$  – індуктивності розсіювання статора та ротора;  $R_1$  і  $R_2$  – активні опори фаз статора й ротора.

При орієнтації системи координат по вектору потокозчеплення ротора ( $|\psi| = \psi_{2d}$ ,  $\psi_{2q} = 0$ ) вихідна активна потужність на клеммах машини обчислюється як [8]

$$P_1 = 1,5 \left( \omega_0 \psi_{2d} i_{1q} L_m / L_2 + (i_{1d}^2 + i_{1q}^2) R_1 \right). \quad (2)$$

Активна потужність, що передається в коло постійного струму генератора (рис. 1) без урахування втрат у перетворювачі, знаходиться за виразом

$$P_d = u_d i_0, \quad (3)$$

де  $u_d$  – напруга кола постійного струму;  $i_0$  – вихідний струм перетворювача.

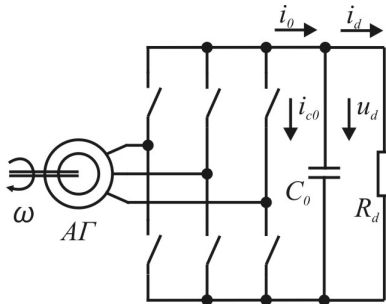


Рисунок 1 – Схема АГ з ВЗ

Привіняємо праві частини виразів (2), (3) і отримуємо залежність між вихідним струмом перетворювача  $i_0$  і змінними в машині

$$i_0 = -1,5 \left( \omega_0 \psi_{2d} i_{1q} L_m / L_2 + (i_{1d}^2 + i_{1q}^2) R_1 \right) / u_d. \quad (4)$$

Якщо знехтувати активними втратами в обмотках статора, то (4) спроститься до вигляду

$$i_0 = -1,5 \omega_0 \psi_{2d} i_{1q} L_m / (L_2 u_d). \quad (5)$$

Реальний характер зміни струму  $i_0$  в АГ з ВЗ показано на рис. 2,а. Рівняння (4) визначає постійну складову цього струму (середнє значення за період широтно-імпульсної модуляції (ШІМ)). Результати розрахунків за виразом (5), який також базується на припущенні про передачу всієї енергії від машини в коло постійного струму, якісно повторюють результати розрахунків за (4) для різних режимів, хоча й з

відхиленням у числових значеннях (рис. 2,б; накидання номінального навантаження). Тому, незважаючи на похибку, для синтезу законів керування в подальшому доцільно використовувати рівняння (5), яке є простішим за вираз (4).

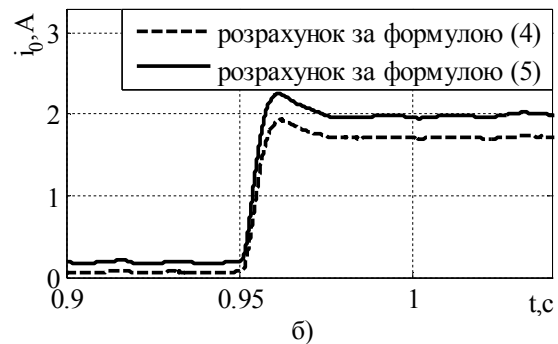
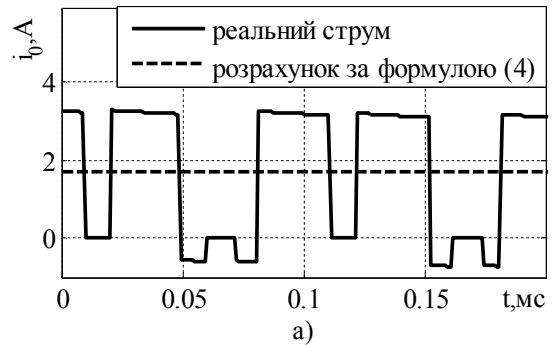


Рисунок 2 – Характер зміни струму  $i_0$

Рівняння (1), записані у системі координат, орієнтованій по вектору потокозчеплення ротора, і вираз (5) встановлюють основні співвідношення в АГ з ВЗ

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_{2d} &= \alpha L_m i_{1d} - \alpha \psi_{2d}; \\ \dot{i}_{1d} &= -\gamma i_{1d} + \omega_0 i_{1q} + \alpha \beta \psi_{2d} + u_{1d} / \sigma; \\ \dot{i}_{1q} &= -\omega_0 i_{1d} - \gamma i_{1q} - \beta p_n \omega \psi_{2d} + u_{1q} / \sigma; \\ \dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0; \\ \dot{u}_d &= (i_0 - i_d) / C_0; \quad i_0 = 1,5 L_m \omega_0 \psi_{2d} i_{1q} / L_2 u_d, \end{aligned} \quad (6)$$

де  $C_0$  – ємність конденсатора в колі постійного струму;  $i_d$  – струм навантаження (рис. 1). Перші чотири рівняння в (6) описують безпосередньо асинхронну машину, а останні два – вихідне коло постійного струму вентильного перетворювача з навантаженням.

Аналіз рівнянь, що описують коло постійного струму генератора, показує, що для регулювання його вихідної напруги необхідно належним чином формувати струм  $i_0$ . Цей струм можна регулювати шляхом відповідної зміни добутку  $\psi_{2d} i_{1q}$ , що аналогічно керуванню частотою обертання асинхронного двигуна. Тому останнє рівняння з (6) має важливе значення, оскільки відкриває можливість синтезувати закони керування АГ з ВЗ на добре відомих принципах векторного керування асинхронними двигунами.

*Синтез системи керування АГ з ВЗ.* У даній роботі для синтезу регуляторів АГ з ВЗ використовується так звана процедура «зворотного синтезу регуляторів» («backstepping control design»), яка засто-

совується й для асинхронних двигунів [10]. Суть підходу можна пояснити, розглянувши об'єкт керування, для якого правомірно рівняння

$$\dot{x} = -ax + f_1 + f_n + bu, \quad (7)$$

де  $x$ ,  $a$ ,  $b$  – координата стану й параметри об'єкта;  $u$  – керуючий вплив;  $f_1, f_n$  – вимірювана й невимірювана складові збурення. Задача керування полягає в тому, щоб сформувати такий керуючий вплив  $u$ , який повинен забезпечити бажаний характер протікання перехідних процесів і виконання умови  $\lim_{t \rightarrow \infty} x = 0$ . Для цього пропонується надати керуючий вплив як

$$u = (-f_1 + u_1)/b, \quad (8)$$

що компенсує відоме збурення  $f_1$ , після чого (7) запишеться у вигляді

$$\dot{x} = -ax + u_1 + f_n. \quad (9)$$

Відповідно до [6], керуючий вплив мінімального порядку, що забезпечить  $\lim_{t \rightarrow \infty} x = 0$  і бажаний перехідний процес, матиме вигляд

$$u_1 = -K_1 x + \xi; \quad \dot{\xi} = -K_2 x. \quad (10)$$

Після підстановки (8) і (10) у (7) отримаємо рівняння для системи, динамічну поведінку якої визначають корені характеристичного поліному  $\lambda^2 + K\lambda + K_2 = 0$ , де  $K = K_1 + a$ . Якщо  $K = \sqrt{2}\omega_1$  і  $K_2 = \omega_1^2$ , де  $\omega_1$  – бажана власна частота контуру регулювання, то маємо розподіл коренів по Батерворту (перерегулювання при дії одиничного ступінчатого впливу становить 4 %, а час наростання вихідного сигналу до 90 % від усталеного значення складає близько  $2,6/\omega_1$ ). Випадок  $K=2\omega_1$  і  $K_2=\omega_1^2$  відповідає розподілу коренів по Ньютону (перерегулювання при дії одиничного ступінчатого впливу відсутнє, а час наростання вихідного сигналу до 90 % від усталеного значення складає близько  $4/\omega_1$ ). Необхідно відмітити, що відповідно до [6] величина  $\xi$  у (10) забезпечує оцінку невимірюваної складової збурення  $f_n$  і компенсує її за рахунок формування керуючого впливу у вигляді (8).

Таким чином, остаточно керуючий вплив для об'єкта (7), що забезпечує  $\lim_{t \rightarrow \infty} x = 0$ , визначається

виразами (8) і (10). Налаштування динамічних властивостей об'єкта здійснюється відповідним вибором  $K$  і  $K_2$ .

Використаний підхід до синтезу законів керування АГ з ВЗ передбачає надання кожного диференціального рівняння системи (6) у формі (7), виділення змінної, яка є керуючим впливом, вимірюваної та невимірюваної складової збурення. Підстановка цих величин у (8) і (10) визначає рівняння регулятора відповідної змінної, а вибір коефіцієнтів  $K$  і  $K_2$  – динамічну поведінку скоректованого контуру.

*Контур керування потокозчепленням.* Динаміку зміни потокозчеплення в асинхронній машині описує перше рівняння системи (6), відповідно до якого керуючим впливом у контурі є струм  $i_{1d}$ . Ввівши

поняття похибки потокозчеплення  $\tilde{\psi}_{2d} = \psi_{2d} - \psi^*$ , де  $\psi^*$  – задане значення потокозчеплення, можна записати рівняння динаміки похибок відпрацювання  $\dot{\tilde{\psi}}_{2d} = -\alpha \tilde{\psi}_{2d} - \alpha \psi^* - \dot{\psi}^* + \alpha L_m i_{1d}$ , яке має форму (7):  $x = \tilde{\psi}_{2d}$ ,  $u = i_{1d}$ ,  $f_1 = -(\alpha \psi^* + \dot{\psi}^*)$ ,  $a = \alpha$ ,  $b = \alpha L_m$ ,  $f_n$  – визначає збурення, пов'язані з неточністю параметрів і іншими чинниками, які не враховуються в моделі (1).

Відповідно до (8) і (10), сигнал завдання струму  $i_{1d}^*$  (керуючий вплив у контурі потокозчеплення) визначається у вигляді

$$i_{1d}^* = (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^* - K_{1\psi} \tilde{\psi}_{2d} + \xi_{\psi}) / \alpha L_m; \quad (11)$$

$$\dot{\xi}_{\psi} = -K_{2\psi} \tilde{\psi}_{2d}.$$

Рівняння (11) описують регулятор потокозчеплення, входом якого є сигнали заданого значення потокозчеплення  $\psi^*$  та швидкості його зміни  $\dot{\psi}^*$ , а виходом – сигнал завдання струму  $i_{1d}^*$ , який є сигналом входу регулятора струму.

Для синтезу регулятора струму аналогічним чином вводиться похибка відпрацювання струму  $\tilde{i}_{1d} = i_{1d} - i_{1d}^*$ , де  $i_{1d}^*$  обчислюється за (11). Після цього рівняння похибок відпрацювання струму приймає вигляд

$$\dot{\tilde{i}}_{1d} = -\gamma \tilde{i}_{1d} - \gamma i_{1d}^* - \dot{i}_{1d}^* + \omega_0 i_{1q} + \alpha \beta \psi_{2d} + u_{1d} / \sigma.$$

Це рівняння має форму (7), де змінною стану є  $\tilde{i}_{1d}$ , керуючим впливом – напруга  $u_{1d}$ , вимірюваним збуренням  $f_1 = -\gamma i_{1d}^* - \dot{i}_{1d}^* + \omega_0 i_{1q} + \alpha \beta \psi_{2d}$ ,  $a = \gamma$ ,  $b = 1/\sigma$ ,  $f_n$ , аналогічно попередньому випадку, враховує параметричну невизначеність та інші невраховані чинники. Відповідно до (8) і (10) рівняння, що визначає керуючу напругу  $u_{1d}^*$ , яка забезпечує досягнення умови  $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{i}_{1d} = 0$ , має вигляд

$$u_{1d}^* = \sigma(\gamma i_{1d}^* + \dot{i}_{1d}^* - \omega_0 i_{1q} - \alpha \beta \psi_{2d} - K_{1id} \tilde{i}_{1d} + \xi_{id}); \quad (12)$$

$$\dot{\xi}_{id} = -K_{2id} \tilde{i}_{1d}.$$

Таким чином, (11) і (12) є рівняннями регуляторів, які шляхом відповідної зміни напруги  $u_{1d}$  дозволяють забезпечувати потокозчеплення в машині на заданому рівні.

*Контур керування вихідною напругою.* Для синтезу законів керування напругою використовуються третє, п'яте й шосте рівняння із (6). Керуючим впливом у рівнянні напруги кола постійного струму є вихідний струм перетворювача  $i_0$ . Після введення позначення  $\tilde{u}_d = u_d - u_d^*$  рівняння похибок відпрацювання напруги приймає вигляд:  $\dot{\tilde{u}}_d = -\dot{u}_d^* - i_d / C_0 + i_0 / C_0$ .

Це рівняння також має форму (7), де змінною стану є  $\tilde{u}_d$ , керуючим впливом – струм  $i_0$ ,

$f_1 = -\dot{u}_d^*$ ,  $a = 0$ ,  $b = 1/C_0$ ,  $f_n = -i_d/C_0$ . Відповідно до (8) і (10), для забезпечення  $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{u}_d = 0$  струм  $i_0$  повинен визначатися як

$$i_0^* = C_0(\dot{u}_d^* - K_{1u} \tilde{u}_d + \xi_u); \quad \dot{\xi}_u = -K_{2u} \tilde{u}_d. \quad (13)$$

Сигнал завдання струму  $i_{1q}^*$  визначається відповідно до останнього рівняння у (6):

$$i_{1q}^* = -2i_0^* u_d L_2 / (3L_m \psi_{2d} \omega_0). \quad (14)$$

Для нормальної роботи генератора необхідно, щоб виконувалася нерівність

$$i_{1q}^* \geq -0,5 \omega_p \psi_{2d} L_m / (\alpha L_m^2 + R_1 L_2),$$

яка продиктована особливостями роботи асинхронної машини в генераторному режимі.

Аналогічно (12) визначається керуюча напруга  $u_{1q}$ , яка забезпечує досягнення умови  $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{i}_{1q} = 0$ , де

$$\begin{aligned} \tilde{i}_{1q} &= i_{1q} - i_{1q}^*; \\ u_{1q}^* &= \sigma(\gamma \dot{i}_{1q}^* + i_{1q}^* + \omega_0 i_{1d} + \beta p_n \omega \psi_{2d} - K_{1iq} \tilde{i}_{1q} + \xi_{iq}); \\ \dot{\xi}_{iq} &= -K_{2iq} \tilde{i}_{1q}. \end{aligned} \quad (15)$$

Варто зазначити, що рівняння (11), (12) і (15) у різноманітних модифікаціях наведені в літературі, присвяченій векторному керуванню асинхронними машинами, наприклад, у [10]. Тому процедура їх виведення приведена для кращого сприйняття матеріалу й глибшого розуміння алгоритмів керування АГ.

*Оцінка потокозчеплення й частоти обертання.* Для обрахунку рівнянь регуляторів (11)–(15) необхідно визначити сигнали потокозчеплення  $\psi_{2d}$ , частоти поля  $\omega_0$  і частоти обертання ротора  $\omega$ , які недоступні для прямого вимірювання. Тому замість реальних вимірювань використовуються оцінені значення ( $\hat{\psi}_{2d}$  – оцінене значення потокозчеплення,  $\hat{\omega}_0$  – частоти поля,  $\hat{\omega}$  – частоти обертання).

У роботі їх отримують із використанням модифікації спостерігача, описаного в [1], який базується на системі рівнянь асинхронної машини, записаній у нерухомій системі координат  $\alpha\beta$ , і є різновидом естиматорів на основі «струмової» моделі АМ. Для стійкого інтегрування в естиматорі використано методику, наведену в [5]. Перевагами такого естиматора є те, що для визначення потокозчеплення не потрібна частота обертання ротора.

*Визначення сигналу завдання потокозчеплення.* Структурна схема системи керування АГ з ВЗ. При зміні частоти обертання ротора для підтримки переважувальної здатності генератора на постійному рівні необхідно змінювати величину магнітного потоку таким чином, щоб виконувалася рівність  $\psi_{2d} \omega = const$  [3]. Тому сигнал завдання потокозчеплення запропоновано визначати за виразом  $\psi^* = \psi_n \omega_n / \hat{\omega}$ , де  $\psi_n$  і  $\omega_n$  – номінальні значення потокозчеплення й частоти обертання генератора. Для забезпечення плавності перехідних процесів і нечутливості до шумів, що виникають при оцінці частоти обертання, заданий сигнал завдання потокозчеплення необхідно пропустити через фільтр низьких частот із сталою часу  $\mu_1 \approx 2 \dots 3(K_{1\psi} + \alpha)$ , яка повинна бути меншою за швидкодію контролера потокозчеплення (11). Остаточний сигнал завдання потокозчеплення визначатиметься згідно з виразом

$$\hat{\psi}^* = (-\psi^* + \psi_i \omega_i / \hat{\omega}) / \mu_1. \quad (16)$$

Запропонована система векторного керування АГ з ВЗ має структурну схему, яка показана на рис. 3. Для роботи генератора необхідно вимірювати два фазних струми й напругу кола постійного струму. Частота обертання валу й потокозчеплення визначається за допомогою естиматора, який згадувався вище. Система керування реалізує вирази (11)–(16).

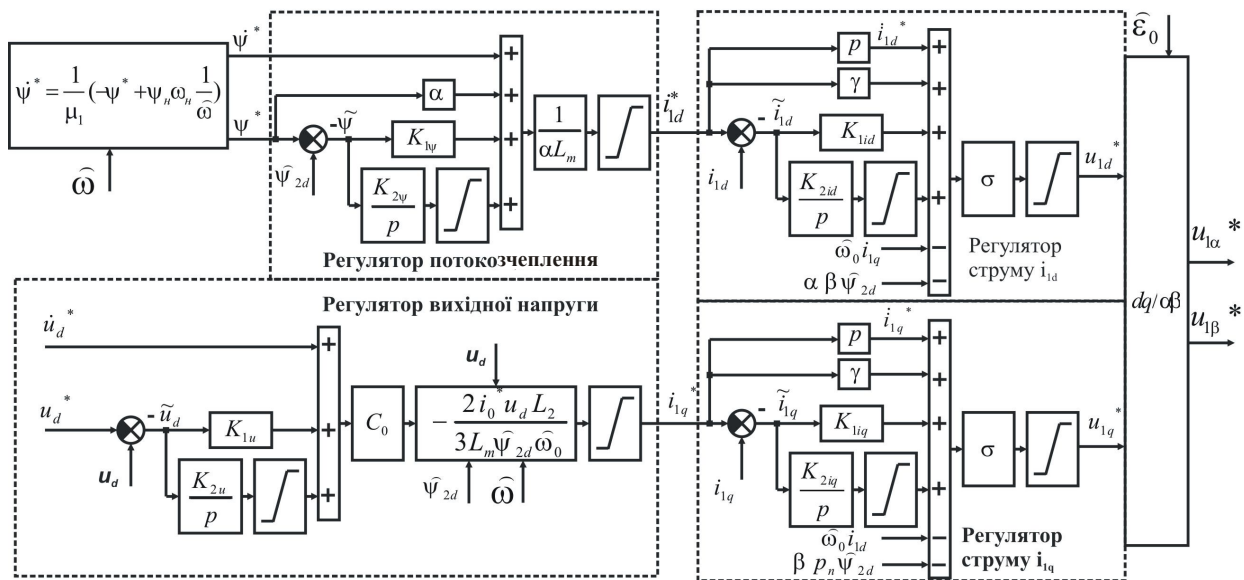


Рисунок 3 – Структурна схема системи керування АГ з ВЗ

Вихідні сигнали  $u_{1\alpha}^*$  і  $u_{1\beta}^*$  визначають проєкції заданого результуючого вектора напруги статора в системі координат  $\alpha\beta$ , який формується вентильним перетворювачем системи збудження.

*Результати експериментальних досліджень.* Експериментальний зразок запропонованого АГ з ВЗ було створено на основі серійної асинхронної машини 4АМ80В6УЗ номінальною потужністю 1,1 кВт і синхронною частотою обертання 1000 об/хв. Система керування виконана на базі 32-розрядного контролера TMS320F28069 фірми Texas Instruments, який підтримує виконання операцій із плаваючою точкою. Тривалість вимірювання й фільтрації сигналів, обрахунку запропонованих законів керування та рівнянь естиматора становить близько 3000 періодів тактової частоти процесора. Для процесора, який працює на частоті 90 МГц, це становить близько 30 мкс, що при несучій частоті

ШІМ 10 кГц складає 30 % від періоду модуляції. При цьому процесор завантажений на 30 %.

На експериментальному стенді самозбудження АГ здійснюється від залишкової намагніченості ротора [9], і якщо частота обертання валу вища за 70 % від номінальної, то початковий заряд конденсатора кола постійної напруги не потребується. Під час збудження генератора система керування працює від акумуляторної батареї малої ємності, що відключається після наростання напруги до номінального значення. Після цього генератор переходить в автономний режим, забезпечуючи електроенергією систему керування й навантаження.

Експериментальні дослідження запропонованого АГ підтвердили його високу динамічну швидкість, точність стабілізації вихідної напруги та стійкість у різних режимах роботи, що демонструють осцилограми на рис. 4 і 5.

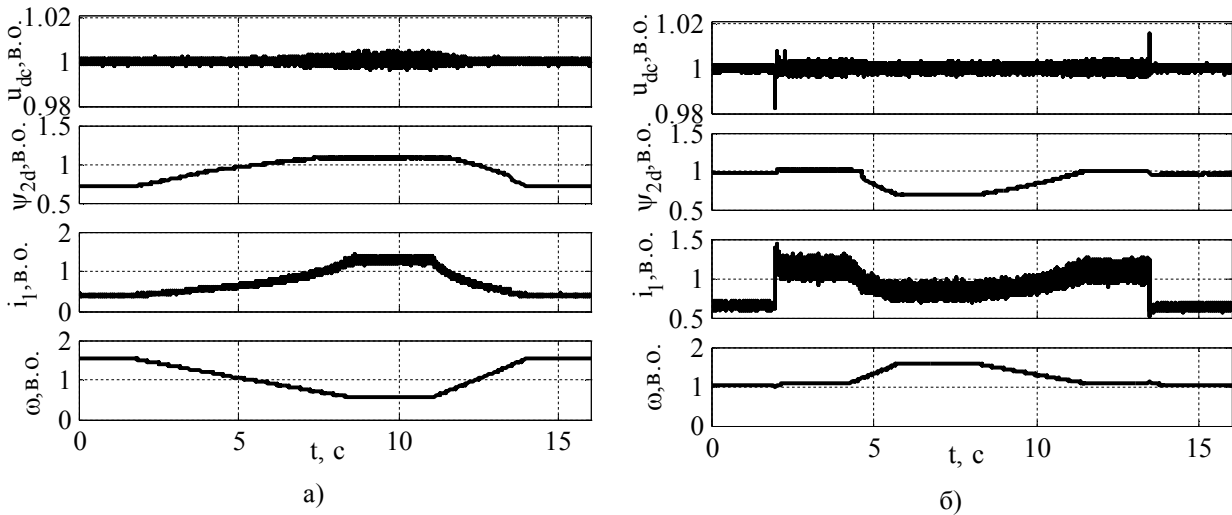


Рисунок 4 – Перехідні процеси генератора при зміні частоти обертання

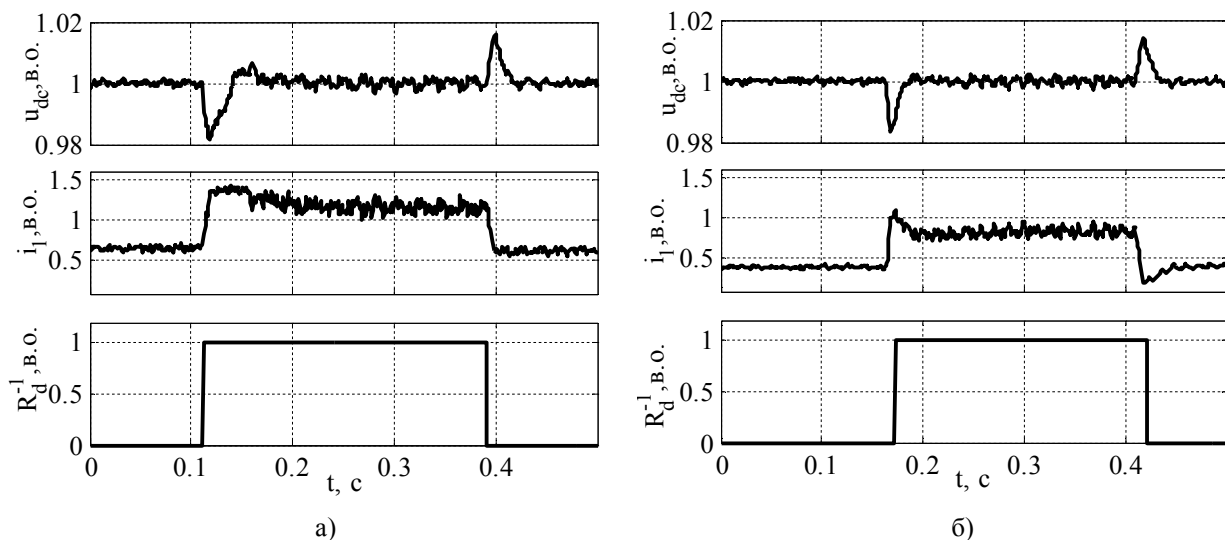


Рисунок 5 – Перехідні процеси генератора при накиданні/скиданні номінального навантаження

На рис. 4 показано осцилограми вихідної напруги, оціненого значення потокозчеплення ротора, значення фазного струму та частоти обертання ротора на неробочому ходу (а) та при номінальному навантаженні, яке підключено протягом часу 2–13,5 с (б). На рис. 5 зображено характер зміни вихідної напруги та фазного струму статора при раптовому накиданні/скиданні номінального навантаження за номінальної частоти обертання (а) і частоти, що становить  $1,5 \omega_n$  (б). Для зручності сприйняття всі величини надані у відносних одиницях (номінальні значення:  $U_{dch}=600$  В,  $\Psi_{2dh}=0,85$  Вб,  $I_{1n}=3,1$  А,  $\omega_n=104,7$  рад/с,  $R_{dh}=400$  Ом). Із рис. 4, а видно, що на неробочому ходу вихідна напруга підтримується на заданому рівні при зміні частоти обертання в діапазоні 1:3. На низьких частотах обертання спостерігається збільшення пульсацій напруги, проте вони мають незначну амплітуду ( $<0,5\%$ ). Зміна частоти обертання від номінальної до  $1,5 \omega_n$  не впливає на якість стабілізації вихідної напруги при роботі з номінальним навантаженням в колі постійного струму (рис. 4,б). Відповідно до (16), при збільшенні частоти обертання знижується значення потокозчеплення в машині, що, у свою чергу, сприяє зменшенню амплітуди струму статора через зменшення проекції струму  $i_{1d}$ . Тому теоретично запропонований генератор може працювати й при вищій частоті обертання. Обмеженням є механічна міцність підшипників і зростаючі втрати в сталі.

При частоті обертання нижче від номінальної, відповідно до (16), необхідно збільшувати потокозчеплення за рахунок зростання проекції  $i_{1d}$ , що спричиняє зростання амплітуди струму статора, який обмежується при досягненні свого номінального значення. Обмеження струму статора призводить до неможливості підтримувати потокозчеплення в машині на відповідному рівні й забезпечувати необхідну вихідну потужність. Унаслідок цього при зниженні частоти обертання може спостерігатись провал напруги при навантаженні. Так, в машині, що використовувалася в експерименті, струм статора на неробочому ходу складав 80 % від номінального значення. Унаслідок цього при неробочому ході цей струм обмежувався вже при зниженні частоти обертання на 20 % від номінального значення (рис. 4,а). А за номінальним навантаженням при частоті обертання, що складає 50 % від номінального значення, з'являлася статична похибка стабілізації напруги (до 40 %). Проте при використанні більш потужних АГ (5–100 кВт) зовнішня характеристика при роботі на низьких частотах обертання буде більш жорсткою, оскільки для них струм холостого ходу становить 25–30 % від номінального значення.

При раптовій зміні навантаження для частот обертання, що належать діапазону  $(1-1,5) \omega_n$  значення, тривалість перехідного процесу стабілізації напруги становить близько 0,02–0,03 с, її відхилення від заданого значення не перевищує 2 % (рис. 5).

Дослідження показали, що при зменшенні частоти обертання характер протікання перехідних процесів змінюється внаслідок обмежень, що накладаються на струм статора. При раптовій зміні навантаження при частоті обертання, що становить 50 % від номінального значення, тривалість перехідних процесів складає близько 0,15–0,2 с, а відхилення напруги від заданого значення досягає 40 % від номінального навантаження (за причини, що й у квазісталих режимах). Проте дуже важливим є те, що незалежно від значення частоти обертання перехідні процеси мають стійкий аперіодичний характер.

Окремо варто зауважити, що при налаштуванні контурів керування використовувалися постійні значення параметрів асинхронної машини, отримані з дослідів неробочого ходу та короткого замикання. Експериментально встановлено, що синтезована векторна система керування нечутлива до змін параметрів машини (теплової зміни активних опорів ротора і статора, варіації індуктивних параметрів машини, що мають місце за неточності ідентифікації параметрів та насичення магнітопроводу).

**ВИСНОВКИ.** Розглянуто автономний АГ з ВЗ, який працює при змінній частоті обертання. При синтезі векторної системи керування генератор розглядається як регульоване джерело струму  $i_0$ , до якого підключено навантаження й вихідний конденсатор. Отримано вираз для визначення сигналу струму завдання  $i_{1q}^*$  (проекція струму статора, яка керує моментом) у функції вихідної напруги й змінних у машині за припущення, що вся енергія, яка надходить до повітряного проміжку, передається в коло постійного струму без втрат. Розроблена система керування забезпечує стабілізацію напруги з максимальним відхиленням 2 % під час перехідних режимів та нульовою статичною похибкою при номінальному навантаженні та зміні частоти обертання в діапазоні  $(1-1,5) \omega_n$ .

Запропонована система керування нечутлива до зміни параметрів, що виникають у процесі роботи (теплової зміни активних опорів ротора і статора, варіації індуктивних параметрів машини, що мають місце при неточності ідентифікації параметрів та насиченні магнітопроводу).

При частоті обертання нижче номінального значення з'являється статична похибка, яка може досягати 40 % від номінального навантаження й частоті обертання  $0,5 \omega_n$ . При частоті обертання вище за номінальне значення зменшується потокозчеплення, а отже й струм намагнічування, що розвантажує напівпровідникові елементи системи збудження.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Rehman Habib-ur, Derdiyok Adnan, K. Guven Mustafa, Longya Xu. A New Current Model Flux Observer for Wide Speed Range Sensorless Control of an Induction Machine // IEEE Transactions on Power Electronics. – Iss. 17/2002 (6). – PP. 1041–1048.
2. Baroudi Jamal A., Dinavahi Venkata, Knight Andrew M. A review of power converter topologies for

wind generators // *Renewable Energy*. – Iss. 32/2007. – PP. 2369–2385.

3. Vukadinovi'c Dinko, Ba'si'c Mateo. A stand-alone induction generator with improved stator flux oriented control // *Journal of Electrical Engineering*. – Iss. 62/2011 (2). – PP. 65–72.

4. Louze L., Nemmour A.L., Khezzar A. et al. Cascade sliding mode controller for self-excited induction generator // *Revue Des Energies Renouvelables*. – Iss. 12/2009 (4). – PP. 617–626.

5. Jun Hu, Bin Wu. New integration algorithms for estimating motor flux over a wide speed range // *IEEE Transactions On Power Electronics*. – Iss. 13/1998 (5). – PP. 969–977.

6. Davison E.J., Smith H.W. Pole Assignment in Linear Time-Invariant Multivariable Systems with Constant Disturbances // *Automatica*. – Iss. 7/1971. – PP. 489–498.

7. Cárdenas Roberto, Peña Rubén. Sensorless Vector Control of Induction Machines for Variable-Speed Wind Energy Applications // *IEEE Transactions On Energy Conversion*. – Iss. 19/2004 (1). – PP. 196–205.

8. Hazra S., Sensarma P. Vector approach for self-excitation and control of induction machine in stand-alone wind power generation // *Iet Renewable Power Generation*. – Iss. 5/2011 (5). – PP. 397–405.

9. Мазуренко Л.И., Лищенко А.И. Асинхронные генераторы с вентильным и вентильно-емкостным возбуждением для автономных энергоустановок. – К.: Наукова думка, 2011. – 270 с.

10. Пересада С.М. Обобщенная теория косвенного векторного управления асинхронным электродвигателем. Часть II. Синтез алгоритма обработки модуля потока и угловой скорости // *Технічна електродинаміка*. – 1999. – Вип. 4. – С. 26–31.

### IMPLEMENTATION AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE INDUCTION GENERATOR WITH VECTOR CONTROL

**L. Mazurenko, V. Romanenko, O. Dzura**

Institute of Electric Dynamic National Academy of Science of Ukraine

prosp. Peremohy, 56, Kyiv, 03680, Ukraine. E-mail: volodimir\_r@ukr.net

The article deals with variable speed stand-alone induction generator with vector control. This system is used for DC-side voltage stabilization. In this paper the mathematical model of such generator was presented. The proposed control technique is based on relationship between output DC side voltage and currents and fluxes in machine in rotor flux oriented reference frame. Reference value of “torque” stator current component is calculated from active power balance between generator and DC side circuit. The general approach for controllers design as well as individual control structures and their adjustment for each loop have been discussed. The experiment results prove the high dynamic performance and accuracy due to variable speed operation and load disturbance, which confirm the validity of this control scheme.

**Key words:** induction generator, inverter excitation, vector control, design of controllers.

#### REFERENCES

1. Rehman, H., Derdiyok, A., K. Guven, M. and Longya, X. (2002), "A New Current Model Flux Observer for Wide Speed Range Sensorless Control of an Induction Machine", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 17, no. 6, pp. 1041–1048.

2. Baroudi, J.A., Dinavahi, V. and Knight, A.M. (2007), "A review of power converter topologies for wind generators", *Renewable Energy*, Vol. 32, pp. 2369–2385.

3. Vukadinovi'c, D. and Ba'si'c, M. (2011), "A stand-alone induction generator with improved stator flux oriented control", *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 62, no. 2, pp. 65–72.

4. Louze, L., Nemmour, A.L., Khezzar A. et al. (2009), "Cascade sliding mode controller for self-excited induction generator", *Revue Des Energies Renouvelables*, Vol. 12, no. 4, pp. 617–626.

5. Jun, H. and Bin, W. (1998), "New integration algorithms for estimating motor flux over a wide speed range", *IEEE Transactions On Power Electronics*, Vol. 13, no. 5, pp. 969–977.

6. Davison, E.J. and Smith, H.W. (1971), "Pole Assignment in Linear Time-Invariant Multivariable

Systems with Constant Disturbances", *Automatica*, Vol. 7, pp. 489–498.

7. Cárdenas, R. and Peña, R. (2004), "Sensorless Vector Control of Induction Machines for Variable-Speed Wind Energy Applications", *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol. 19, no. 1, pp. 196–205.

8. Hazra, S. and Sensarma, P. (2011), "Vector approach for self-excitation and control of induction machine in stand-alone wind power generation", *Iet Renewable Power Generation*, Vol. 5, no. 5, pp. 397–405.

9. Mazurenko, L.I. and Lishhenko, A.I. (2011), *Asinkhronnyye generatory s ventilnym i ventilno-ymkostnym vozbuzhdeniyem dlya avtonomnykh energoustanovok* [Induction generators with inverter and capacitor-inverter excitation for stand-alone power plant], Naukova dumka, Kiev. (in Russian)

10. Peresada, S.M. (1999), "General theory of indirect vector control of induction motors. Part II. Flux and angular speed controller development", *Tekhnichna elektrodynamika*, Vol. 4, pp. 26–31. (in Russian)

Стаття надійшла 15.10.2015.