

## СТІЙКІСТЬ СИСТЕМ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ НАПРУГОЮ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### Анотація

В роботі представлено доведення стійкості типових структур систем векторного керування асинхронними генераторами з лінійними ПІ-регуляторами струмів і напруги ланки постійного струму, які забезпечують локальну асимптотичну стійкість за умови розділення у часі процесів регулювання напруги і моментотворюючої компоненти струму. Показано, що необхідний рівень розділення процесів у часі забезпечується за умови, коли підсистема регулювання напруги щонайменше в 2-3 рази більша повільна відносно підсистеми регулювання струму, що досягається за рахунок налаштування регуляторів системи керування асинхронного генератора.

**Ключові слова:** векторне керування, асинхронний генератор, регулятор, стійкість.

### Abstract

The paper presents the stability proof of typical structures of vector control systems with linear PI-controllers of currents and DC-link voltage which provide local asymptotic stability under the condition of time scale separation of voltage and q-current regulation processes. It is shown that the required level of time separation between the voltage control subsystem and the current control subsystem is at least 2-3 times, which is achieved by adjusting the controllers of the induction generator control system.

**Keywords:** vector control, induction generator, regulator, stability.

### Вступ

Стандартна структура системи генерування на основі асинхронного генератора (АГ) аналогічна тій, яка використовується в системах векторного керування кутовою швидкістю асинхронних двигунів, в якій ПІ-регулятор швидкості замінено ПІ-регулятором напруги ланки постійного струму [1]. Динаміка кутової швидкості асинхронного двигуна є лінійною за умови ідеальної полеорієнтації та постійного потокозчеплення, в той час як динаміка напруги ланки постійного струму є нелінійною навіть для постійного потокозчеплення та постійної швидкості обертання валу генератора через наявність нелінійних компонентів, які пропорційні активним втратам [2]. В [3] авторами представлено процедуру синтезу системи керування напругою на основі спрощених рівнянь динаміки моментного струму. Розглянуто алгоритм керування напругою з лінійними ПІ-регуляторами струмів і напруги, модифікованими для врахування насичення магнітної системи АГ. Показано, що лінійний ПІ-регулятор напруги для постійної швидкості та потокозчеплення забезпечує асимптотичність регулювання напруги, якщо активні втрати розглядати як збурення.

**Метою роботи є:** а) доведення локальної асимптотичної стійкості системи векторного керування напругою АГ шляхом застосування теорії сингулярно-вироджених систем; б) встановлення умов, за яких можливо розглядати систему керування напругою АГ зниженого порядку.

### Результати досліджень

Рівняння динаміки підсистеми напруги ланки постійного струму АГ, після завершення процесів полеорієнтування мають вигляд [1]:

$$\dot{V}_{dc} = C^{-1} \left( -(3/2) V_{dc}^{-1} (u_d i_d + u_q i_q) - i_L \right), \quad \dot{i}_q = -\gamma_m i_q - \omega_0 i_d + \alpha_m \beta_m \psi_q - \omega_p \beta_m \psi_d + \sigma_m^{-1} u_q, \quad (1)$$

де  $\mathbf{u} = (u_d, u_q)^T$ ,  $\mathbf{i} = (i_d, i_q)^T$ ,  $\boldsymbol{\psi} = (\psi_d, \psi_q)^T$  – вектори керуючих напруг, струмів статора та потокозчеплень ротора в системі координат (d-q);  $\omega$  – кутова швидкість обертання ротора,  $\omega_0$  – кутова швидкість обертання синхронної системи координат (d-q) відносно стаціонарної (a-b);  $p_n$  – число пар полюсів;  $V_{dc}$ ,  $C$  – напруга та ємність ланки постійного струму;  $i_L$  – струм навантаження. Додатні параметри в визначено наступним чином:  $\alpha_m = R_2/L_{2m}$ ,  $\sigma_m = L_{1m} - L_m^2(i_m)/L_{2m}$ ,  $\beta_m = L_m(i_m)/[L_{2m}\sigma_m]$ ,  $\gamma_m = R_1\sigma_m^{-1} + \alpha_m\beta_m L_m(i_m)$ , де  $R_1, R_2$  – активні опори статора та ротора;  $L_m$  – індуктивність намагнічування при номінальному потокозчепленні.

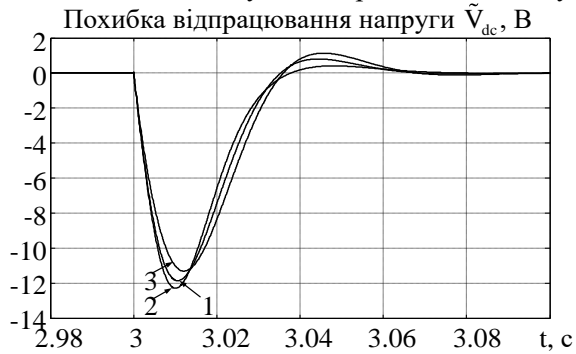


Рис. 1. Графіки перехідних процесів в системі повного і зведеного порядку

Використано регулятор струму по осі q [3]

$$u_q = \sigma_m (\omega_0 i_d - k_{i1} \tilde{i}_q + x_q), \quad \dot{x}_q = -k_{i2} \tilde{i}_q; \quad (2)$$

та регулятор напруги ланки постійного струму

$$i_q^* = -(-k_v \tilde{V}_{dc} + x_v), \quad \dot{x}_v = -k_{vi} \tilde{V}_{dc}, \quad (3)$$

де  $i_q^*$  – задана компонента струму статора по осі q;  $\tilde{i}_q = i_q - i_q^*$  – похибка відпрацювання струму;  $(k_{i1}, k_{i2}) > 0$  – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регуляторів струму;  $(k_v, k_{vi}) > 0$  – коефіцієнти пропорційної та

інтегральної складових регулятора напруги. Доведено стійкість системи генерування за умов дії алгоритму керування напруги (3). Дослідження виконано в декілька етапів: *на першому етапі* досліджено динаміку системи (рис. 1), коли підсистема потокозчеплення знаходиться у стані рівноваги, метою якого було підтвердження можливості застосування моделі зведеного порядку при синтезі, а також за умови  $\tilde{i}_q = 0$ ; *на другому етапі* експериментально досліджено динамічну поведінку контуру регулювання напруги для різних налаштувань регуляторів напруги і струму, що дало можливість визначити умову часового розділення між внутрішнім контуром моментотворюючого струму та зовнішнім контуром напруги.

### Висновки

Доведено локальну стійкість системи векторного керування асинхронними генераторами з лінійними ПІ-регуляторами струмів і напруги ланки постійного струму на основі теорії сингулярно-вироджених систем. Експериментально підтверджено, що часове розділення процесів регулювання напруги та моментотворюючої компоненти струму досягається, коли підсистема регулювання напруги щонайменше в 2-3 рази більш повільна відносно підсистеми регулювання струму. За цієї умови можливо розглядати систему регулювання напруги зведеного порядку.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] S. Peresada, S. Kovbasa, Korol S., and N. Zhelinskyi, "Feedback linearizing field-oriented control of induction generator: theory and experiments," *Технічна електродинаміка*, № 2, с. 48-56, 2017.
- [2] R. Leidhold, G. Garcia, M. I Valla, "Field-oriented controlled induction generator with loss minimization," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, pp. 147-156, 2002.
- [3] S. Peresada, M. Zhelinskyi, S. Kovbasa, and S. Korol, "Indirect field oriented control of the saturated induction generators with linear PI regulators," in *IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 2019, pp. 138-143.

**Пересада Сергій Михайлович** – професор кафедри автоматизації електромеханічних систем, електроприводу та електромобільності НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", м. Київ.

**Ковбаса Сергій Миколайович** – доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", м. Київ.

**Желінський Микола Миколайович** – асистент кафедри автоматизації електромеханічних систем, електроприводу та електромобільності НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", м. Київ.

**Ніконенко Євген Олексійович** – аспірант кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", м. Київ.

**Райчук Олексій Іванович** – асистент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", м. Київ.