

С. М. Пересада<sup>1</sup>  
С. М. Ковбаса<sup>1</sup>  
М. М. Желінський<sup>1</sup>

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ТЕСТУВАННЯ СИСТЕМИ РОБАСТНОГО ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

*Подано результати повномасштабного порівняльного експериментального тестування алгоритмів непрямого векторного керування асинхронним генератором, робастного до варіацій активного опору ротора та стандартного векторного керування з пропорційно-інтегральним регулятором напруги у ланці постійного струму. Проаналізовано результати досліджень властивостей робастності алгоритму векторного керування асинхронного генератора, що забезпечує локальне асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій напруги ланки постійного струму та модуля вектора потокозчеплення ротора.*

*Експериментальне тестування проводилося на станції швидкого прототипного тестування алгоритмів керування. Вимірювання струмів виконувалося за допомогою двох давачів струму, принцип роботи яких оснований на ефекті Хола. Швидкість вимірювалася імпульсним давачем, що має роздільну здатність 1024 імпульси на оберт. Дослідження алгоритмів відбувалося за однакових налаштувань контурів регулювання струму.*

*Порівнюючи перехідні процеси, виявлено, що розроблений алгоритм непрямого векторного керування напругою ланки постійного струму та модулем вектора потокозчеплення ротора забезпечує властивості робастності до варіацій активного опору ротора. Подані результати порівняльного тестування двох алгоритмів непрямого векторного керування асинхронного генератора: стандартного з пропорційно-інтегральним регулятором напруги в ланці постійного струму та робастного до варіацій активного опору ротора. Експериментально показано, що на відміну від стандартного алгоритму, розроблений авторами алгоритм векторного керування асинхронним генератором забезпечує стабілізацію показників якості регулювання потокозчеплення та напруги ланки постійного струму, а також показників енергетичної ефективності, в умовах варіацій активного опору роторного кола.*

**Ключові слова:** векторне керування, асинхронний генератор, варіації активного опору ротора, енергетична ефективність.

### Вступ

Стійкість та показники якості систем генерування (СГ) на основі асинхронних генераторів (АГ) з короткозамкненим ротором залежать від властивостей алгоритму керування, що застосовується для керування АГ. Конфігурація таких СГ передбачає, що ротор генератора приводиться в рух за допомогою первинного рушія (вітро- чи гідроколеса), а статор підключено до IGBT перетворювача. Генерована енергія надходить в ланку постійного струму, звідки вона може напряму віддаватися споживачам постійної напруги, або перетворюватися в змінну напругу з використанням додаткового інвертора.

Відомо, що активний опір ротора в АГ з короткозамкненим ротором є недоступним для безпосереднього вимірювання та може змінюватися в межах від  $-50\%$  до  $+100\%$  від номінального значення під час роботи генератора під навантаженням в наслідок нагріву або неточності визначення параметрів електричної машини за ініціалізації системи [1]. В загальному випадку варіації активного опору ротора викликають порушення умов полеорієнтування, що призводить до деградації динамічних показників якості алгоритмів векторного керування, збільшення додаткових втрат в електричній машині та навіть до втрати стійкості системи [2].

Для компенсації негативного впливу варіацій активного опору ротора використовують підходи робастних, інваріантних та адаптивних систем [3].

Метою роботи є аналіз результатів експериментальних досліджень властивостей робастності розробленого авторами алгоритму векторного керування АГ [4], який гарантує локальне асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій напруги ланки постійного струму та модуля вектора потокозчеплення ротора.

### Матеріали дослідження

Порівняльне експериментальне тестування проводилося для стандартного алгоритму векторного керування з пропорційно-інтегральним регулятором напруги у ланці постійного струму [5] та робастного [4]. Ці алгоритми мають подібну базову структуру, яка включає внутрішні контури регулювання струму в системі координат, асимптотично орієнтованої по вектору потокозчеплення ротора, а також зовнішній контур регулювання напруги в ланці постійного струму.

Експериментальне тестування проводилося на станції швидкого прототипного тестування алгоритмів керування, функціональна схема якої показана на рис. 1. До складу станції входять: керувальний контролер на основі 32-х розрядного цифрового сигнального процесора з рухомою комою TMS320F28335, в якому реалізуються досліджувані алгоритми; трифазний інвертор 20А/380В з частотою ШІМ 5 кГц, персональний комп'ютер, що використовується для програмування, відлагодження та завантаження програм, візуального спостереження та запису перехідних процесів під час експериментів. Вимірювання струмів виконувалося за допомогою двох давачів струму, принцип роботи яких оснований на ефекті Хола. Швидкість вимірювалася імпульсним давачем, що має роздільну здатність 1024 імпульси на оберт. Період квантування за часом при цифровій реалізації алгоритмів керування складав 200 мкс. Ємність ланки постійного струму 1000 мкФ. Для інтегрування використовувався метод Ейлера.

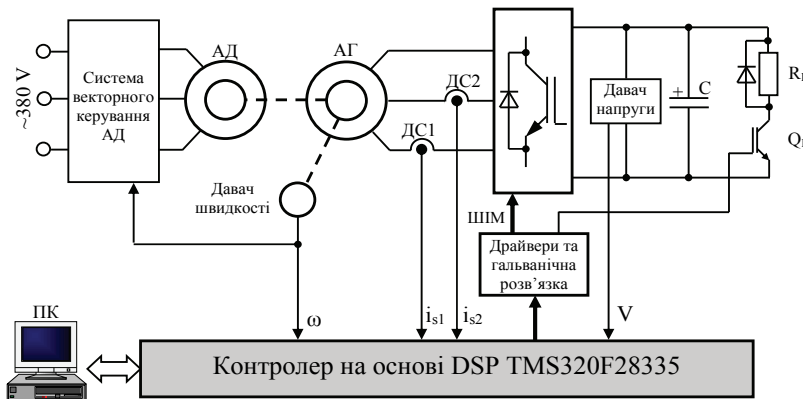


Рис. 1. Функціональна схема станції швидкого прототипного тестування алгоритмів керування

Дослідження алгоритмів відбувалося за однакових налаштувань контурів регулювання струму. Налаштування контуру регулювання напруги ланки постійного струму двох алгоритмів виконано для швидкості 140 рад/с так, щоб показники якості регулювання були однаковими. Використовувалися такі параметри налаштування алгоритмів векторного керування: коефіцієнти пропорційної (П) та інтегральної (І) складових регулятора напруги для стандартного алгоритму —  $k_v = 0,2$ ;  $k_{vi} = 15$ , а для запропонованого алгоритму [4] —  $k_v = 140$ ,  $k_{vi} = 9800$ ; коефіцієнти П та І складових регуляторів струму —  $k_i = 500$ ,  $k_{ii} = 125000$ . Корегувальні коефіцієнти підсистеми потокозчеплення в [4] взяті такі:  $k_1 = 100$ ;  $\gamma_1 = 0,001$ ;  $\gamma_2 = 0,02$ . В дослідженні використовувалася послідовність операцій керування, яка включає такі етапи (рис. 1):

- на початку експерименту первинний рушій стабілізує швидкість АГ на рівні 140 рад/с, в той час як напруга ланки постійного струму складає 320 В;
- в початковий момент часу 0...0,3 с генератор збуджується по траєкторії з початкового значення 0,02 Вб та досягає значення 0,4 Вб з першою похідною рівною 3,84 Вб/с;
- на інтервалі часу  $t = 0,5...1$  с необхідно відпрацювати задану траєкторію напруги, яка починається від початкового значення 320 В і досягає 540 В з першою похідною рівно 880 В/с<sup>2</sup>;
- починаючи з  $t = 1,25$  с за 0,3 с задане потокозчеплення нарощується до номінального значення 0,96 Вб;

– на інтервалі часу  $t = 2...3,5$  с до ланки постійного струму під'єднується навантаження величиною 193 Ом, що відповідає споживаній номінальній потужності.

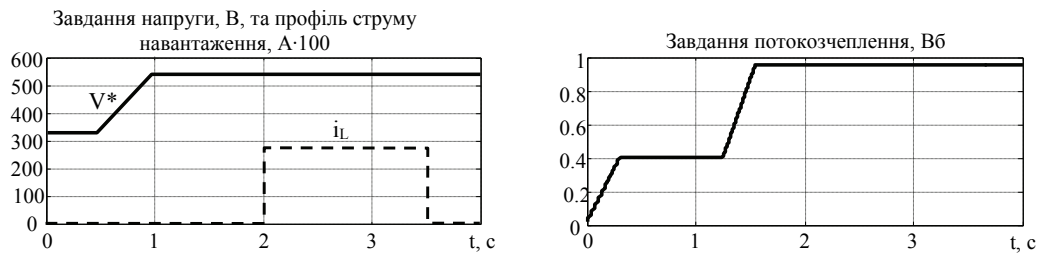


Рис. 1. Задані траєкторії напруги, модуля вектора потокозчеплення ротора та профіль струму навантаження

Оскільки АГ має короткозамкнений ротор, то для порівняння динамічних процесів під час використання досліджуваних алгоритмів варіація активного опору роторного кола вводилася в керувальний контролер, тобто замість фактичного  $R_2$  в алгоритмі використовувався параметр  $\hat{R}_2 = k_R R_2$ .

На рис. 3 показано перехідні процеси алгоритму векторного керування напруги з пропорційно-інтегральним регулятором напруги в ланці постійного струму (стандартне векторне керування — СВК), а на рис. 4 — робастного (робастне векторне керування — РВК) за номінального значення опору ротора, тобто з  $k_R = 1$ . З графіків на рис. 3, та рис. 4 випливає, що при відпрацюванні заданої траєкторії зміни напруги ланки постійного струму та при відпрацюванні постійного струму навантаження поведінка двох систем є однаковою, тобто максимальні значення динамічної похибки регулювання напруги у разі під'єднання та від'єднання навантаження становлять близько 14 В. Для компенсації струму навантаження для обох алгоритмів необхідна однакова величина струму по осі  $q$ , яка дорівнює 5,4 А.

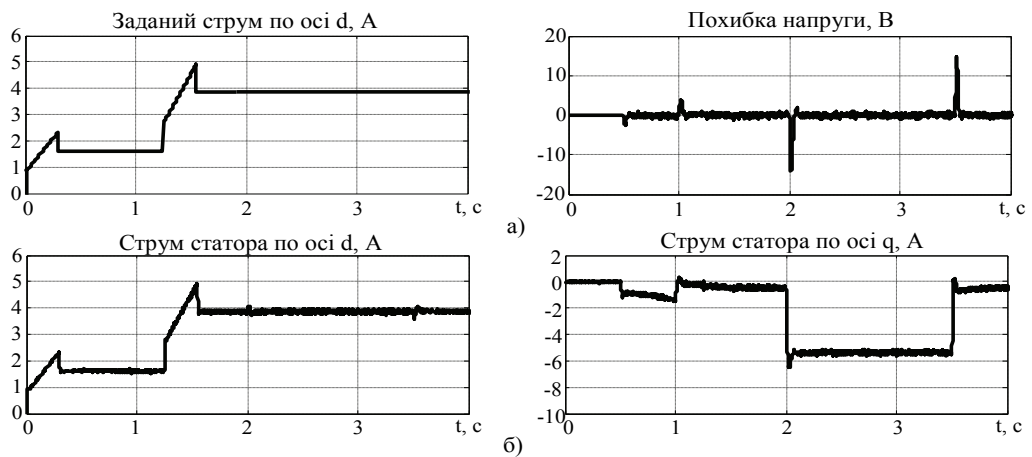


Рис. 3. Перехідні процеси при СВК без варіації  $R_2$

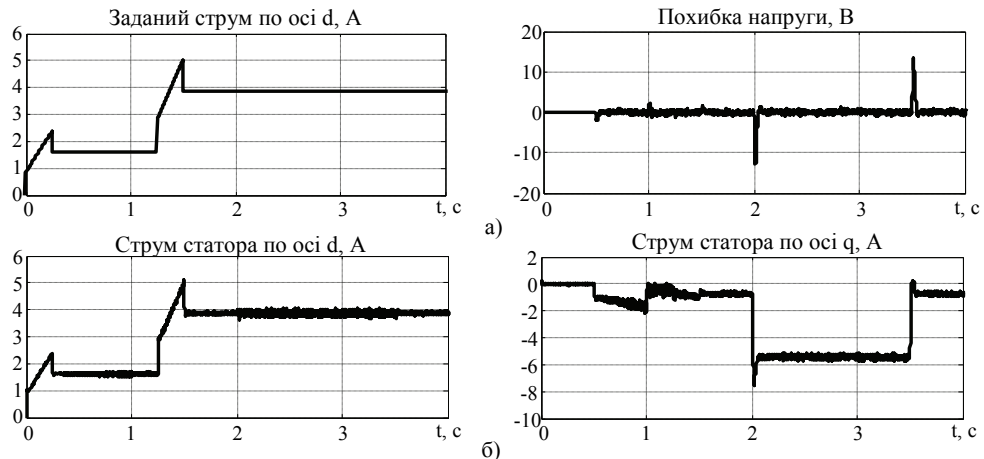


Рис. 4. Перехідні процеси при РВК без варіації  $R_2$

На рис. 5 показані перехідні процеси, що демонструють роботу системи СВК для значень  $\hat{R}_2 = 0,6R_2$  та  $\hat{R}_2 = 1,6R_2$  під час виконання такого ж тесту. В процесі проведення експериментальних досліджень встановлено, що за межами вказаного діапазону варіації  $\hat{R}_2$  алгоритм СВК втрачає стійкість.

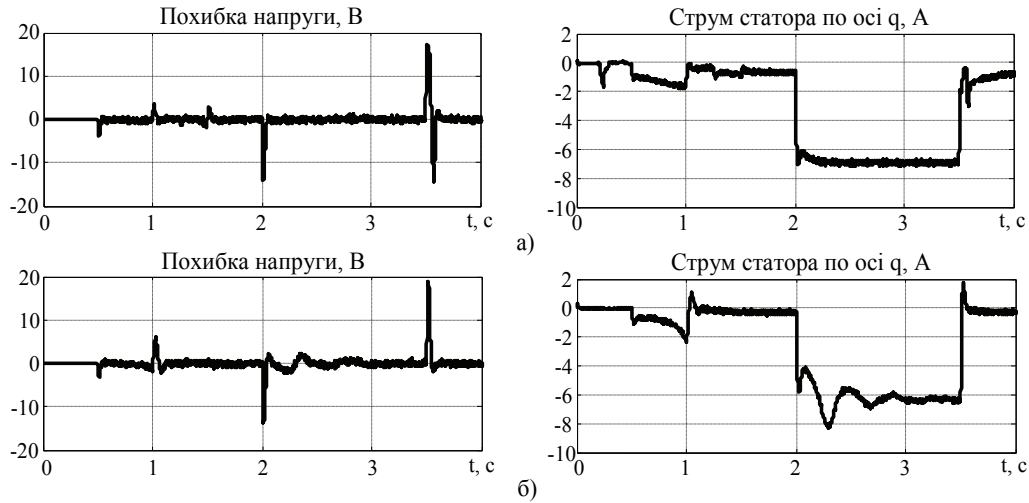


Рис. 5. Перехідні процеси в системі СВК з варіаціями  $R_2$

З графіків перехідних процесів, показаних на рис. 5 видно, що у разі варіації активного опору ротора за використання СВК відбувається значне погіршення динамічних показників якості керування напругою з одночасним збільшенням усталеного значення струму по осі  $q$ . Як показано в [5], варіація  $\hat{R}_2 > R_2$  призводить до зменшення величини магнітного потоку ротора, що вимагає збільшення моментотворювального струму статора. Коли  $\hat{R}_2 < R_2$ , то — до збільшення потокозчеплення, як наслідок, електромагнітна система входить у зону насичення, при цьому АГ працює з майже постійним модулем потокозчеплення, але з порушеним полеорієнтуванням.

Результати аналогічного випробування для системи РВК показані на рис. 6. Порівнюючи перехідні процеси на рис. 3, 4, 5, 6, можна зробити висновок, що розроблений алгоритм непрямого векторного керування напругою ланки постійного струму та модулем вектора потокозчеплення ротора [4] забезпечує властивості робастності до варіацій активного опору ротора. Тобто показники якості регулювання напруги та величина моментотворювальної компоненти вектора струму статора за використання РВК практично не змінюються за умов варіацій активного опору ротора.

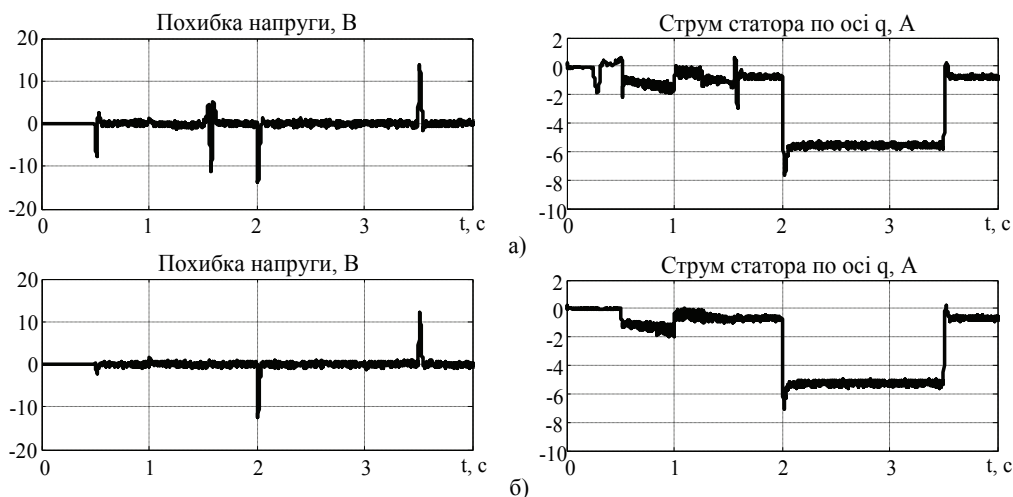


Рис. 6. Перехідні процеси в системі РВК з варіаціями  $R_2$

На останньому етапі виконано дослідження енергетичних характеристик двох алгоритмів керування. В умовах попереднього тесту, задавалася варіація активного опору роторного кола в діапазоні від  $0,5R_2$  до  $2R_2$ . В усталеному режимі роботи під навантаженням фіксувалися значення моментотворювальної компоненти струму статора та механічної потужності первинного рудія.

На рис. 7 струм  $i_q$  та механічна потужність первинного рушія при стандартному алгоритмі позначені чорною пунктирною лінією, а при робастному — суцільною червоною. З рис. 7 випливає, що застосування робастного алгоритму векторного керування АГ, навіть за великих відхилень опору ротора від номінального значення, дозволяє підтримувати моментоутворювальну компоненту струму статора  $i_q$  на постійному рівні, в той час як з використанням стандартного алгоритму ця компонента значно зростає зі зміною опору ротора від його реального значення. В результаті цього в більшості режимів роботи АГ для компенсації струму навантаження необхідна менша механічна потужність первинного рушія, що свідчить про підвищений ККД системи генерування на основі ПВК в умовах варіацій активного опору роторного кола.

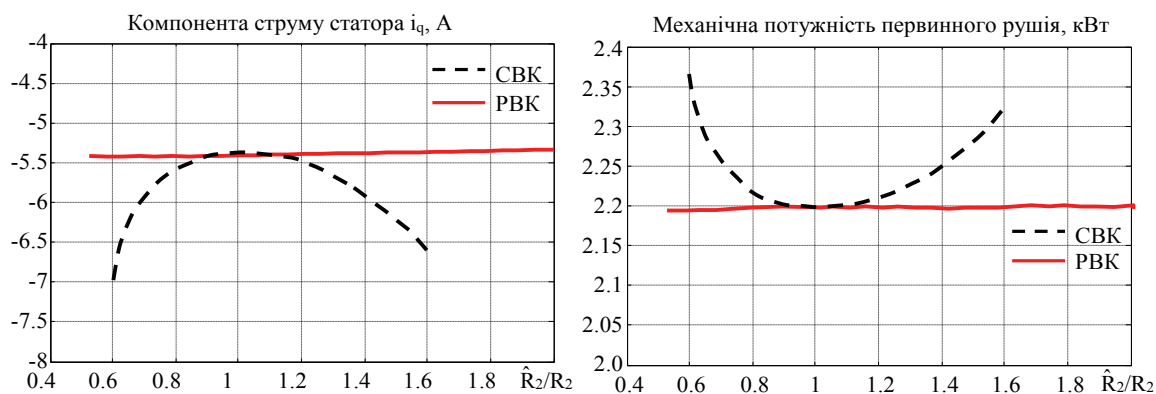


Рис. 7. Енергетичні характеристики у разі варіацій активного опору ротора

Виконані експериментальні дослідження, як і результати моделювання в [4], підтверджують, що застосування робастного до варіацій активного опору ротора алгоритму векторного керування АГ дозволяє значно покращити як динамічні показники при відпрацюванні заданої напруги в ланці постійного струму та модуля вектора потокозчеплення ротора, так і енергетичну ефективність системи у порівнянні зі стандартним рішенням.

### Висновки

Подані результати порівняльного тестування двох алгоритмів непрямого векторного керування АГ: стандартного з пропорційно-інтегральним регулятором напруги в ланці постійного струму та робастного до варіацій активного опору ротора. Експериментально встановлено, що на відміну від стандартних рішень, розроблений авторами алгоритм векторного керування АГ забезпечує робастність до варіацій активного опору ротора та гарантує збереження динамічних показників якості керування у внутрішніх контурах регулювання струму та зовнішніх — модуля потокозчеплення та напруги ланки постійного струму, а також, зниження додаткових втрат системи генерування у разі дії обмежених варіацій активного опору ротора.

#### Номінальні параметри досліджуваного АГ

Механічна потужність	2,2 кВт	Опір статора	$R_s = 3,5$ Ом
Момент	15 Нм	Опір ротора	$R_r = 1,9$ Ом
Частота	50 Гц	Індуктивність намагнічувального контуру	$L_m = 0,248$ Гн
Число пар полюсів	2	Індуктивність статора	$L_s = 0,266$ Гн
Номінальний струм	5 А	Індуктивність ротора	$L_r = 0,266$ Гн

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] R. Marino, P. Tomei, and C. M. Verrelli, *Induction motor control design*. London : Springer, 2010, 351 p.
- [2] R. Krishnan, *Electric Motor Drives. Modeling, Analysis and Control*. New Jersey, Upper Saddle River: Prentice Hall, 626 p, 2001.

[3] С. М. Пересада, С. Н. Ковбаса, и В. Н. Трандафилов «Инвариантный к вариациям активного сопротивления ротора алгоритм прямого векторного управления асинхронными двигателями при питании от источника тока,» *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, вип. 3 (27), с 10-19, 2014.

[4] S. Bozhko, S. Peresada, S. Kovbasa, and M. Zhelinskyi, "Robust Indirect Field Oriented Control of Induction Generator," in *Int Conf. on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles and the International Transportation Electrification Conference, ESARS ITEC 2016*, 2-4 Nov, France, pp. 1-6, 2016.

[5] S. Peresada, S. Kovbasa, S. Korol, N. Pechenik, and N. Zhelinskyi, "Indirect Field Oriented Output Feedback Linearized Control of Induction Generator," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Intel. Energy and Power Systems, IEPS-2016*, 07-09 Jun., Kyiv, pp. 187-191, 2015.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 21.05.2018

**Пересада Сергій Михайлович** — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизації електромеханічних систем і електропривода, e-mail: sergei.peresada@gmail.com ;

**Ковбаса Сергій Миколайович** — канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем і електропривода, e-mail: skovbasa@ukr.net ;

**Желинский Микола Миколайович** — аспірант кафедри автоматизації електромеханічних систем і електропривода, e-mail: mykola.zhelinskyi@gmail.com

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ

**S. M. Peresada<sup>1</sup>**  
**S. M. Kovbasa<sup>1</sup>**  
**M. M. Zhelinskyi<sup>1</sup>**

## Experimental Investigation of Robust Indirect Field Oriented Control for Induction Generator

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

*The paper presents the results of comparative experimental study of algorithms of indirect vector control asynchronous generator, robust to variations of active resistance of a rotor and standard vector control with a proportional-integral voltage regulator in a DC link. The results of research on the robustness properties of the vector control algorithm of the asynchronous generator, which provides the local asymptotic development of the given trajectories of the voltage of the direct current line and the module of the vector of the connection of the rotor, are analyzed.*

*Experimental testing was carried out at the fast prototype testing station of the control algorithms. Measurement of currents was carried out with the help of two current sensors, the principle of which is based on the Hall Effect. The speed was measured by an impulse sensor having a resolution of 1024 pulses per revolution. The research of algorithms occurred at the same settings of current control circuits.*

*When comparing transient processes, it was discovered that the developed algorithm of indirect vector control of the voltage of the direct current link and the module of the vector of the connection of the rotor provides the robustness properties to the variations of the active resistance of the rotor. The results of the comparative testing of two algorithms of indirect vector control AG: standard with a proportional-integral voltage regulator in the DC link and robust to variations of the active resistance of the rotor are presented. It has been shown experimentally that unlike the standard algorithm developed by the authors, the algorithm for vector control by an asynchronous generator provides stabilization of the quality parameters of the regulation of the connection and voltage of the DC link, as well as the indicators of energy efficiency, in the conditions of variations of the active resistance of the rotor circle.*

**Keywords:** field-oriented control, induction generator, rotor resistance variations, control performance, efficiency.

**Peresada Serhii M.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Electromechanical Systems Automation and Electrical Drives, e-mail: sergei.peresada@gmail.com ;

**Kovbasa Serhii M.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Electromechanical Systems Automation and Electrical Drives, e-mail: skovbasa@ukr.net ;

**Zhelinskyi Mykola M.** — Post-Graduate Student of the Chair of Electromechanical Systems Automation and Electrical Drives, e-mail: mykola.zhelinskyi@gmail.com

С. М. Пересада<sup>1</sup>  
С. М. Ковбаса<sup>1</sup>  
Н. Н. Желинский<sup>1</sup>

## Экспериментальное тестирование системы робастного векторного управления асинхронным генератором

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

*Представлены результаты полномасштабного сравнительного экспериментального тестирования алгоритмов косвенного векторного управления асинхронным генератором, робастного к вариациям активного сопротивления ротора и стандартного векторного управления с пропорционально-интегральным регулятором напряжения в звене постоянного тока. Проанализированы результаты исследований свойств робастности алгоритма векторного управления асинхронного генератора обеспечивает локальное асимптотическое отработку заданных траекторий напряжения звена постоянного тока та модуля вектора потокосцепления ротора.*

*Экспериментальное тестирование проводилось на станции быстрого прототипного тестирования алгоритмов управления. Измерение токов выполнялось с помощью двух датчиков тока, принцип работы которых основан на эффекте Холла. Скорость измерялась импульсным датчиком, имеющим разрешение 1024 импульсов на оборот. Исследование алгоритмов происходило при одинаковых настройках контуров регулирования тока.*

*При сравнении переходных процессов было выявлено, что разработанный алгоритм косвенного векторного управления напряжением звена постоянного тока и модулем вектора потокосцепления ротора обеспечивает свойства робастности к вариациям активного сопротивления ротора. Представлены результаты сравнительного тестирования двух алгоритмов косвенного векторного управления асинхронного генератора: стандартного с пропорционально-интегральным регулятором напряжения в звене постоянного тока и робастного к вариациям активного сопротивления ротора. Экспериментально показано, что в отличие от стандартного алгоритма, разработанный авторами алгоритм векторного управления асинхронным генератором обеспечивает стабилизацию показателей качества регулирования потокосцепления и напряжения звена постоянного тока, а также показателей энергетической эффективности, в условиях вариаций активного сопротивления роторного круга.*

**Ключевые слова:** векторное управление, асинхронный генератор, вариации активного сопротивления ротора, энергетическая эффективность.

*Пересада Сергей Михайлович* — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации электромеханических систем и электропривода, e-mail: sergei.peresada@gmail.com ;

*Ковбаса Сергей Николаевич* — к-т техн. наук, доцент кафедры автоматизации электромеханических систем и электропривода, e-mail: skovbasa@ukr.net ;

*Желинский Николай Николаевич* — аспирант кафедры автоматизации электромеханических систем и электропривода, e-mail: mykola.zhelinskyi@gmail.com