

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НЕЛІНІЙНОСТІ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

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

### Анотація

Представлено дослідження впливу нелінійності магнітної системи електромеханічного перетворювача на основі векторно-керованого асинхронного генератора (АГ) з пропорційно-інтегральними регуляторами струму та напруги. Показано, що нехтування насиченням магнітної системи призводить до статичних похибок відпрацювання модулю вектора потокозчеплення ротора.

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

### Abstract

Presented study of the effect of nonlinearity of the magnetic system electromechanical converter based on vector-controlled induction generator with a proportional-integral control current and voltage. It is shown that neglect of saturation of the magnetic system leads to static errors in working out the rotor flux vector.

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

### Вступ

При порівнянні результатів експериментального тестування [1] з дослідженням шляхом математичного моделювання [2] виникають розбіжності, які викликані впливом нелінійності магнітного кола АГ. В загальному випадку нехтування нелінійністю магнітного кола асинхронної машини призводить до виникнення похибок регулювання модуля вектора потокозчеплення  $i$ , як наслідок, до зниження енергетичної ефективності процесів електромеханічного перетворення енергії.

### Результати дослідження

Для дослідження використано алгоритм непрямого векторного керування АГ з пропорційно-інтегральними регуляторами струму та напруги, який враховує насичення магнітної системи [3]. Параметри досліджуваного АГ серії 4А90L4У3 з номінальною потужністю 2.2 кВт, активним опором статора  $R_1 = 3.5$  Ом, активним опором ротора  $R_2 = 2.2$  Ом, індуктивністю статора  $L_1 = 0.287$  Гн, індуктивністю ротора  $L_2 = 0.287$  Гн, індуктивністю намагнічування  $L_m = 0.27$  Гн, кількістю пар полюсів  $p_n = 2$ , ємністю в ланці постійного струму  $C = 1000$  мкФ, повним моментом інерції системи генерування  $J = 0.002$  кг·м<sup>2</sup>. Система керування налаштована з наступними параметрами:  $k_{id} = k_{iq} = 500$ ,  $k_{ii} = k_{id}^2/2$  – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регуляторів струму;  $k_v = 0.2$ ,  $k_{vi} = 15$  – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складової регулятора напруги ланки постійного струму. Поліном кривої намагнічування  $L_m = f(\psi_m)$ :  $L_m = k_5\psi_m^5 + k_4\psi_m^4 + k_3\psi_m^3 + k_2\psi_m^2 + k_1\psi_m^1 + k_0\psi_m^0$ , де  $k_0 = 0.33214$ ,  $k_1 = 0.22967$ ,  $k_2 = -0.69352$ ,  $k_3 = 0.97641$ ,  $k_4 = -0.82662$ ,  $k_5 = 0.2251$ .

Дослідження проведено з використанням наступної послідовності операцій керування: первинний рушій обертає вал АГ з постійною кутовою швидкістю 140 рад/с, яка дорівнює номінальній; початкова напруга ланки постійного струму  $V_{dc}(0)$  дорівнює 310 В (57.4 % від номінальної); в початковий інтервал часу 0...0.25 с відбувається збудження з використанням траєкторії, яка зображена на рис. 1; з початкового значення  $\psi(0) = 0.02$  Вб завдання збільшується до 0.5 Вб; починаючи з 2-ої секунди завдання для модуля вектора потокозчеплення збільшується до номінального значення 0.96 Вб; до  $t = 1$  с задана напруга в ланці постійного струму дорівнює 310 В; починаючи з  $t = 1$  с за 0.5 с завдання напруги ланки постійного струму збільшується з початкового значення 310 В до номінального 540 В,

як показано на рис. 1; в момент часу  $t = 3$  с відбувається під'єднання резистивного навантаження в ланці постійного струму величиною 254 Ом (струм навантаження 2.1 А), що відповідає генеруемій потужності 1.13 кВт; в момент часу  $t = 4$  с навантаження від'єднується.

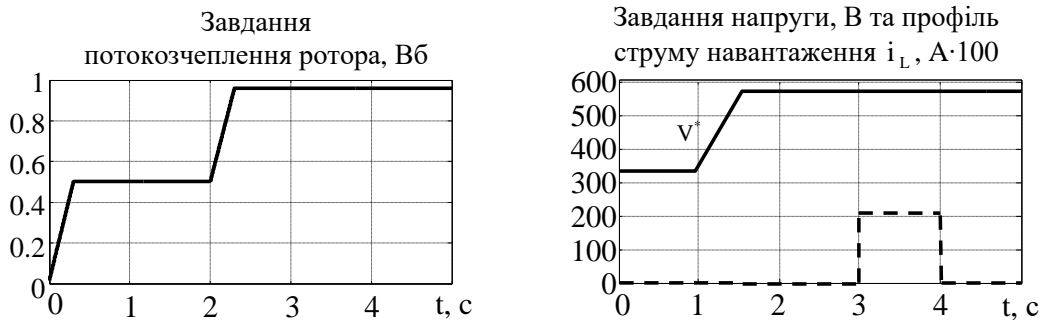


Рисунок 1 – Задані траєкторії потокозчеплення, напруги ланки постійного струму та профіль струму навантаження

Графіки перехідних процесів дослідження впливу нелінійності магнітного кола АГ представлено на рис. 2. Для цього в алгоритмі керування використано лінійне представлення магнітної системи  $L_m = \text{const}$ , а в моделі генератора враховано насичення. З рис. 2 видно, що при завданні потокозчеплення на рівні половини від номінального порушується асимптотичність відпрацювання модуля вектора потокозчеплення ротора, виникає статична похибка +0,17 Вб (в момент часу до 2 с). Після завершення процесів збудження ( $t \geq 2.5$  с) забезпечується асимптотичне регулювання модуля вектора потокозчеплення  $\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{\psi}) = 0$  і асимптотичність відпрацювання заданої траєкторії напруги  $\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{V}_{dc}) = 0$ , де  $\tilde{\psi} = \psi - \psi^*$  – похибка відпрацювання модуля вектора потокозчеплення,  $\psi$ ,  $\psi^*$  – модуль та задане значення вектора потокозчеплення ротора,  $\tilde{V}_{dc} = V_{dc} - V_{dc}^*$  – похибка відпрацювання напруги ланки постійного струму,  $V_{dc}$ ,  $V_{dc}^*$  – напруга ланки постійного струму та її задане значення.

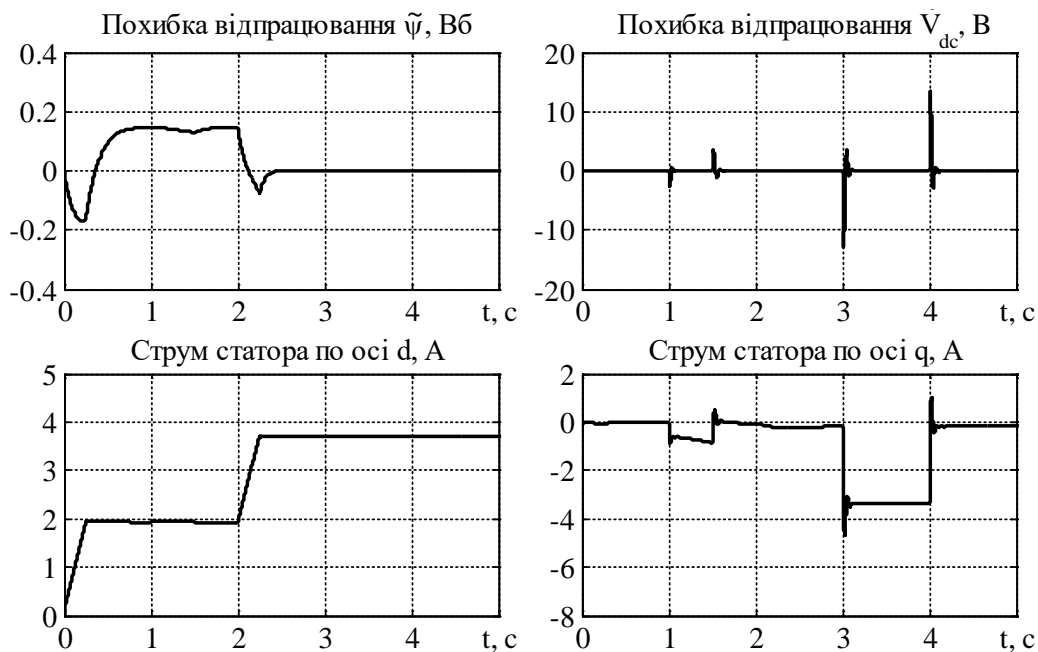


Рисунок 2 – Перехідні процеси в системі векторного керування з нелінійною магнітною системою в моделі генератора та лінійною в алгоритмі керування

Графіки перехідних процесів при врахуванні насичення магнітного кола як в моделі генератора, так і в алгоритмі керування представлено на рис. 3. З рис. 3 видно, що забезпечується асимптотичне

регулювання модуля вектора потокозчеплення  $\lim_{t \rightarrow \infty}(\tilde{\psi}) = 0$  на всьому етапі збудження (від 0...2,5 с).

При цьому, спостерігається зменшення компоненти струму збудження  $i_d$  (-26% в момент часу 0...2 с) при відпрацюванні завдання потокозчеплення, що пояснюється більшим значенням індуктивності намагнічування на ділянці кривої намагнічування з потокозчепленнями, які менші за номінальне.

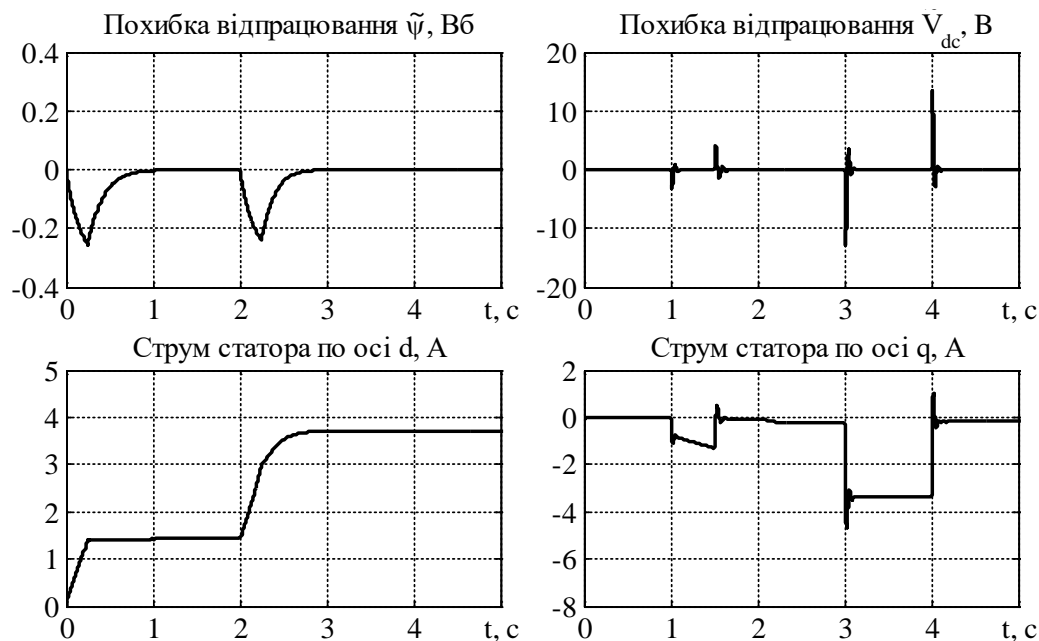


Рисунок 3 – Перехідні процеси в системі векторного керування з нелінійною магнітною системою

### Висновки

З результатів дослідження встановлено, що нехтування насиченням магнітної системи, тобто не врахуванні кривої намагнічування в алгоритмі керування, призводить до статичних похибок при відпрацюванні модуля вектора потокозчеплення ротора для значень нижче номінального. В той же час алгоритм векторного керування АГ, який враховує насичення магнітної системи забезпечує асимптотичне регулювання напруги та модуля вектора потокозчеплення ротора.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Peresada S., Kovbasa S., Korol S., Zhelinskyi N. Feedback linearizing field-oriented control of induction generator: theory and experiments. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 2. P. 48–56.
2. Peresada S., Kovbasa S., Korol S., Pechenik N., Zhelinskyi N. Indirect field oriented output feedback linearized control of induction generator. *2016 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kiev, 2016. P. 187–191.
3. Peresada S., Zhelinskyi M., Kovbasa S., Korol S. Indirect field oriented control of the saturated induction generators with linear PI regulators. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. Kyiv, 2019. P. 138–143.

**Юсин Андрій Олександрович** – студент групи ЕП-72, факультет електроенерготехніки та автоматики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, e-mail: [yusyn.andriy@lil.kpi.ua](mailto:yusyn.andriy@lil.kpi.ua).

**Димко Сергій Сергійович** – к.т.н., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, e-mail: [sdymko@ukr.net](mailto:sdymko@ukr.net).

**Желінський Микола Миколайович** – асистент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, e-mail: [mykola.zhelinskyi@gmail.com](mailto:mykola.zhelinskyi@gmail.com).

**Andriy Yusyn** – Student, Faculty of Electric Power Engineering and Automatics, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, e-mail: [yusyn.andriy@lil.kpi.ua](mailto:yusyn.andriy@lil.kpi.ua).

**Serhiy Dymko** – Ph.D., Faculty of Electric Power Engineering and Automatics, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, e-mail: [sdymko@ukr.net](mailto:sdymko@ukr.net).

**Mykola Zhelinskyi** – Research Assistant, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, e-mail: [mykola.zhelinskyi@gmail.com](mailto:mykola.zhelinskyi@gmail.com).