

# ФОРМУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ ЗАДАНОГО ПОТОКОЗЧЕПЛЕННЯ В СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМ АСИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ

Хомуйло Ю.О., магістрант, Король С.В., к.т.н., доц.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

**Вступ.** Автономні системи генерування енергії на основі асинхронних генераторів (АГ), у зв'язку з розвитком альтернативних джерел енергії, набувають все більшого розповсюдження. Перевагою таких систем є висока надійність та відносно низька ціна.

Весь потенціал таких систем розкривається при реалізації векторного керування АГ за допомогою повністю керованого перетворювача напруги, які використовують структуру, наведену на рис.1. Це дозволяє підвищити енергоефективність роботи АГ та покращити якість генерованої електричної енергії, при варіації швидкості первинного рушія. Навантаженням в таких системах, виступає споживач постійного струму або, при необхідності, навантаженням може бути інвертор змінного струму, який живить споживачів змінного струму.

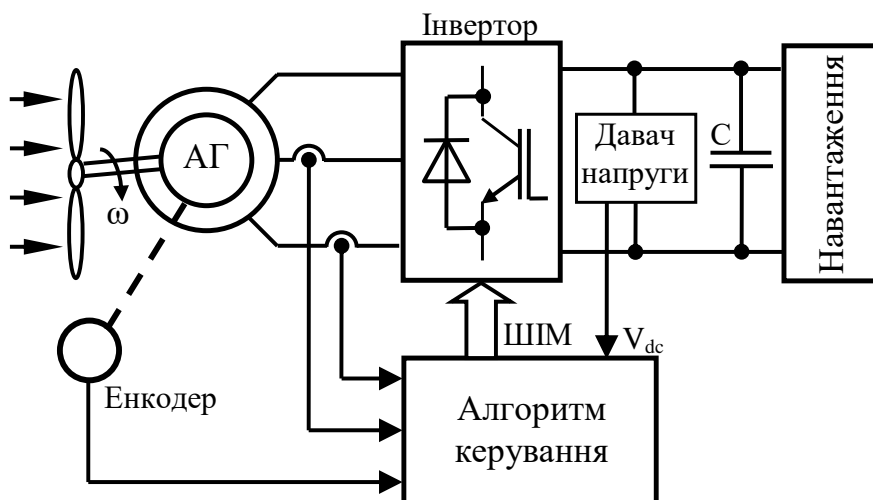


Рисунок 1 – Структура системи генерування

Завдяки особливостям асинхронних машин, системи керування асинхронним генератором з прямим або непрямым полеорієнтуванням будується по аналогії з такими самими системами керування асинхронними двигунами. Однією з головних відмінностей векторнокерованої системи АГ від систем електроприводу є те, що формування траєкторії завдання моментної складової струму реалізується

за допомогою ПІ регулятора напруги в ланці постійного струму [1], тоді як в приводі цю функцію виконує регулятор швидкості.

Дослідження проблеми векторного керування АГ з орієнтацією вектора потокозчеплення ротора чи статора представлені в [2]-[4]. Підвищення ефективності асинхронного генератора шляхом мінімізації втрат було представлено в [3], [4]. Теоретично обґрунтований лінеаризуючий контролер напруги представлено в [2]. Збільшення енергоефективності систем АГ досягається при застосуванні алгоритмів векторного керування за стратегією МТА (*Maximum Torque per Ampere*), що полягає у забезпеченні максимального співвідношення електромагнітного моменту генератора до струму статора. Використання систем векторного керування АГ на основі стратегії МТА вимагає застосування алгоритмів формування траєкторії заданого потокозчеплення з обмеженою першою похідною.

**Мета статті.** Порівняння алгоритмів формування заданого потокозчеплення при використанні стратегії МТА для керування асинхронним генератором.

#### **Матеріали дослідження.**

Для забезпечення роботи зі змінним потокозчепленням використовують різні алгоритми формування заданого потокозчеплення, що представлені в [6] та [7].

Бажане значення  $\psi_{opt}$  потокозчеплення може визначатися різними способами.

Один із найпростіших – розрахунок оптимального струму  $i_{dopt}$  через струм  $i_q$

$$i_{dopt} = -i_q. \quad (1)$$

Бажане потокозчеплення, що буде використовуватися для формування траєкторії, залежить від  $i_{dopt}$  та індуктивності намагнічування  $L_m$ :

$$\psi_{opt} = i_{dopt} \cdot L_m. \quad (2)$$

Далі, для коректної роботи алгоритму векторного керування, необхідно сформувавши траєкторію заданого потокозчеплення  $\psi^*$  і його першу похідну. Для цього може використовуватись фільтр першого порядку:

$$\dot{\psi}^* = \frac{(\psi_{dopt} - \psi^*)}{\tau_{opt}}, \quad (3)$$

де  $\tau_{opt}$  – стала часу фільтра першого порядку, що обирається для забезпечення необхідної швидкості зміни заданого потокозчеплення.

Інший спосіб формування траєкторії заданого потокозчеплення – використання фільтру 2-го порядку. Фільтр 2-го порядку сформуємо у вигляді:

$$\begin{aligned} \dot{\psi}^* &= \eta; \\ \dot{\eta} &= -k_1\eta - k_2\psi^* + k_2\psi^r. \end{aligned} \quad (4)$$

Передатна функція цього фільтра має вигляд:

$$W_{\psi^*} = \frac{k_2}{p^2 + k_1p + k_2}. \quad (5)$$

Для визначення частоти зрізу  $\omega_0$  представимо передатну функцію фільтру у такому вигляді:

$$W_{\phi 2} = \frac{k_p \cdot \omega_0^2}{p^2 + 2\xi\omega_0 + \omega_0^2}. \quad (6)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт демпфування, прийmemo рівним 1 для забезпечення аперіодичного перехідного процесу. Тоді можна визначити залежність коефіцієнта підсилення фільтру при  $\xi = 1$  від частоти зрізу:

$$k_1 = 2\omega_0; k_2 = \omega_0^2 \rightarrow k_2 = \frac{k_1^2}{4}. \quad (7)$$

Фільтр 2-го порядку являє собою послідовне з'єднання двох ланок фільтру 1-го порядку, тому коефіцієнт підсилення буде визначатися як добуток коефіцієнтів підсилення ланок 1-го порядку:

$$H_{\phi 2} = H_{\phi 1} \cdot H_{\phi 1} = \sqrt{\frac{1}{1 + T^2\omega^2}} \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + T^2\omega^2}} = \frac{1}{1 + T^2\omega^2}. \quad (8)$$

Якщо обрати постійну часу  $T = \frac{1}{\omega_0}$ , то при частоті зрізу  $\omega_0$  коефіцієнт підсилення фільтру:

$$H_{\phi 2}(\omega_0) = \frac{1}{1 + T^2\omega_0^2} = \frac{1}{2}. \quad (9)$$

Фільтр 1-го порядку (9) має передатну функцію:

$$W_{\phi 1} = \frac{1}{\tau p + 1}. \quad (10)$$

Коефіцієнт підсилення аперіодичної ланки 1-го порядку можна визначити з виразу:

$$H_{\phi 1}(j\omega) = \left| \frac{1}{1 + \tau j\omega} \right| = \sqrt{\frac{1}{1 + \tau^2\omega^2}}. \quad (11)$$

Якщо постійну часу фільтру визначити  $\tau = \frac{1}{\omega_0}$ , то коефіцієнт підсилення на частоті  $\omega_0$  буде становити:

$$H_{\phi 1}(\omega_0) = \sqrt{\frac{1}{1 + \tau^2\omega_0^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}. \quad (12)$$

Для порівняння алгоритмів формування заданих траєкторій потрібно щоб коефіцієнт підсилення для обох фільтрів при частоті  $\omega_0$  був однаковий. Тому постійну часу фільтру першого порядку задати виразом:

$$\tau = \frac{\sqrt{3}}{\omega_0}, \quad (13)$$

то коефіцієнт підсилення на частоті  $\omega_0$  буде мати значення:

$$H_{\phi 1}(\omega_0) = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{3}{\omega_0^2} \cdot \omega_0^2}} = \frac{1}{2} \quad (14)$$

Отже, для фільтру 1-го порядку, постійна часу  $\tau = \frac{\sqrt{3}}{\omega_0}$  забезпечує таку ж

швидкість, як  $T = \frac{1}{\omega_0}$  для фільтру 2-го порядку.

Тестування впливу алгоритму формування заданого потокозчеплення на якість відпрацювання координат системою векторного керування АГ проводилось для машини АИР112М4У2 потужністю 5,5 кВт з номінальною швидкістю 3000 об/хв і номінальним струмом 11,4 А. Параметри АГ:  $R_1 = 1.04 \text{ Ом}$ ,  $L_1 = 0.124 \text{ Гн}$ ,  $R_2 = 0.7 \text{ Ом}$ ,  $L_2 = 0.124 \text{ Гн}$ ,  $L_m = 0.118 \text{ Гн}$ . Початкова напруга конденсатора в ланці постійного струму прийнята 150 В, ємність  $C = 1000 \text{ мкФ}$ . Параметри налаштування регуляторів обрані,  $k_V = 0.7$ ,  $k_{V_i} = 15$ ,

$k_i = 600$ ,  $k_{ii} = \frac{k_i^2}{2}$ , щоб забезпечити однакову швидкодію обох фільтрів визначили значення постійних часу:  $T = 0.01538$  і  $\tau = 0.0266$ , тоді коефіцієнти підсилення фільтру другого порядку  $k_1 = 130$  та  $k_2 = 4225$ .

Дослідження впливу алгоритмів формування заданого потокозчеплення при використанні стратегії МТА виконано методом математичного моделювання при обертанні асинхронного генератора первинним рушієм зі швидкістю 314 рад/с. В момент часу  $t = 0.15 \text{ с}$  починається заряджання конденсатора в ланці постійного струму з 150 В до 550 В; в  $t = 2 \text{ с}$  до ланки постійного струму підключається номінальне навантаження, та в  $t = 4 \text{ с}$  знімається. При швидкості 314 рад/с номінальний струм навантаження має значення 10 А.

На рис. 2 та рис. 3 представлено траєкторії, які сформовані фільтрами першого і другого порядку –  $\psi^*$ , а також графіки відпрацювання заданого потокозчеплення:  $\psi_q$  – потокозчеплення по осі  $q$ ;  $e\psi$  – похибка відпрацювання заданого потокозчеплення. Отримані результати показали, що задані траєкторії сформовані обома фільтрами практично не відрізняються. В момент накидання навантаження похибка орієнтації системи координат (потокозчеплення по осі  $q$ ) при використанні фільтру другого порядку в двічі більша, але її значення співмірне з похибкою моделювання. Натомість алгоритм другого порядку

забезпечую точність відпрацювання модуля потокозчеплення до 0.008 Вб, що більше ніж в двічі менше за похибку при використанні алгоритму першого порядку, яка становить 0.02 Вб.

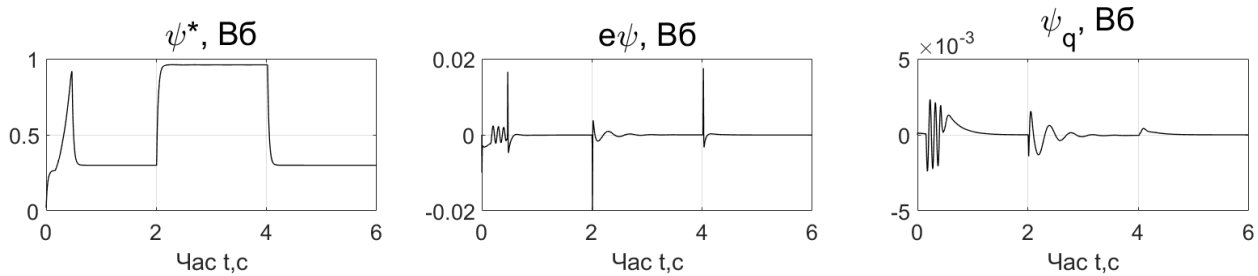


Рисунок 2 – Результати дослідження алгоритму формування заданого потокозчеплення при використанні фільтра 1-го порядку за стратегією МТА

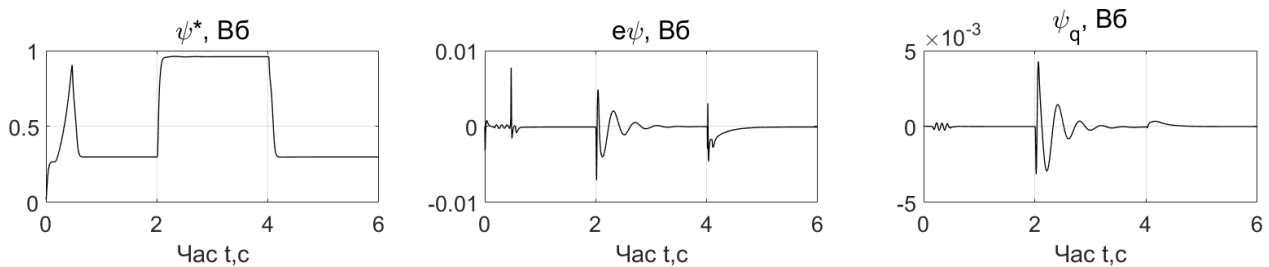


Рисунок 3 – Результати дослідження алгоритму формування заданого потокозчеплення при використанні фільтра 2-го порядку за стратегією МТА

Повний комплект змінних отриманий в результаті дослідження алгоритму керування автономним АГ [7], представлений на рис.4. Результати дослідження алгоритму [6] практично ідентичні попереднім, оскільки траєкторія потокозчеплення і точність її відпрацювання подібні, тому вони не наведені в даній статті. На графіках використано наступні позначення:  $M_G$  – момент генератора;  $U_r$  та  $U_{dc}$  – задана та вихідна напруга ланки постійного струму відповідно, навантаження;  $i_L \cdot 10$  – струм ланки постійного струму помножений на 10;  $u_d$  та  $u_q$  – напруга статора в системі координат  $d-q$ ;  $i_d$  – струм статора приведений до координат ротора;  $i_q$  – моментоутворююча складова струму ротора;  $ei_d$  та  $ei_q$  – похибки струмів в системі координат  $d-q$ .

**Висновки.** Порівняльне дослідження алгоритмів формування траєкторії заданого потокозчеплення для алгоритмів векторного керування автономним АГ з використанням стратегії МТА показало, що алгоритми як першого порядку, так і другого дозволяють досягти цілей керування. Обидва алгоритми формують дуже близькі за своєю динамікою траєкторії, тому точність відпрацювання потокозчеплення практично не відрізняється.

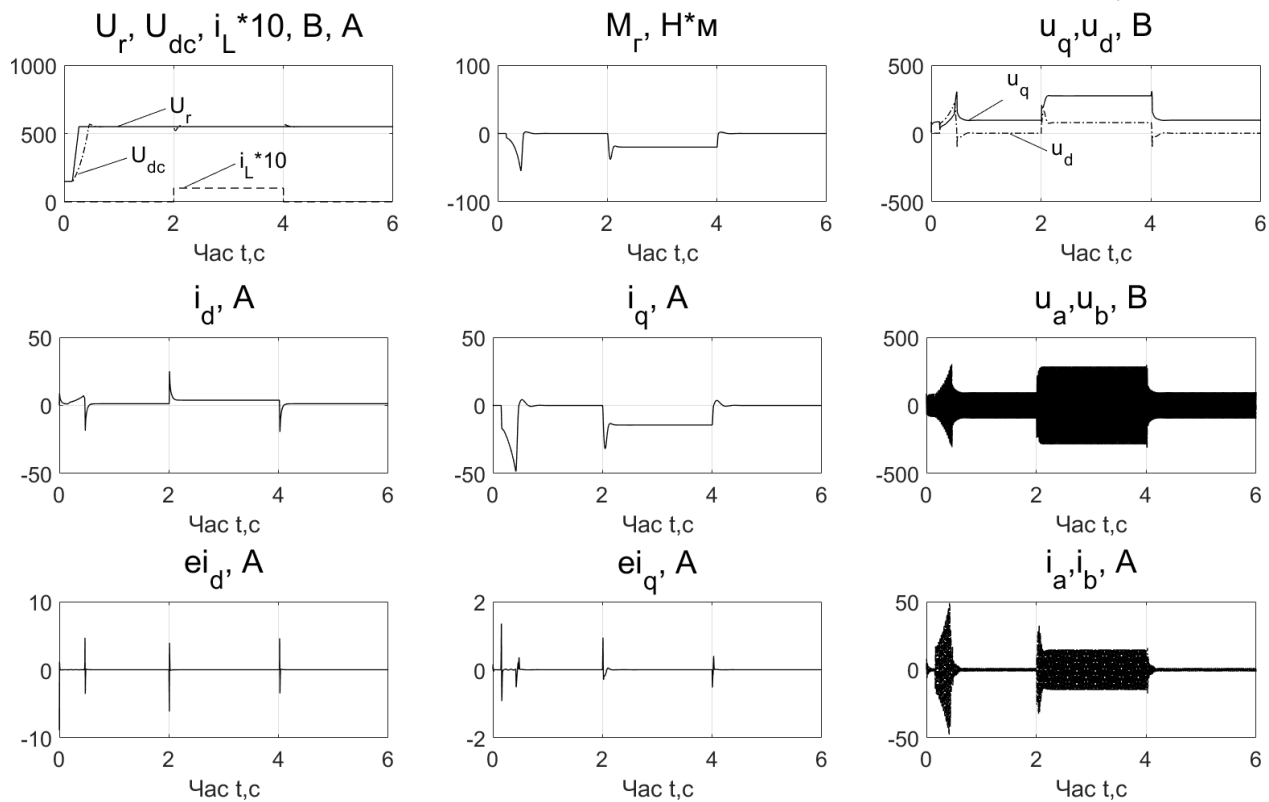


Рисунок 4 – Результати дослідження системи АГ при векторному керуванні за стратегією МТА

#### Перелік посилань

1. Feedback Linearizing Field-Oriented Control Of Induction Generator: Theory And Experiments / S. Peresada, S. Kovbasa, S. Korol, N. Zhelinskyi. // IEEE Transactions on Industry Applications.– 2017.
2. Peresada S. Indirect Field Oriented Output Feedback Linearized Control of Induction Generator / S. Peresada, S. Kovbasa, S. Korol, N. Pechenik, N. Zhelinskyi // Proceedings of 2016 IEEE 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). – 2016. – P. 187-191.
3. Leidhold R. Field-oriented controlled induction generator with loss minimization / R. Leidhold, G. Garcia, M. I. Valla // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2002. – vol. 49, № 1. – pp. 147–156.
4. A. Mesemanolis, C. Mademlis, and I. Kioskeridis, “High-Efficiency Control for a Wind Energy Conversion System With Induction Generator,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 27, no. 4, pp. 958–967, Dec. 2012.
5. Король С. В. Швидкий запуск асинхронного генератора в автономній системі живлення/ Король С. В., Шубенко О.В. // Вісник ХНТУСГ Випуск 195 "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України". – Харків: ХНТУСГ, 2018. –С.21-22.
6. Maximum Torque-per-Amp Control for Traction IM Drives: Theory and Experimental Results / S.Bozhko, S. Peresada, S. Dymko, S. Kovbasa. // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2016.
7. Король С. В. Векторне керування автономним асинхронним генератором з використанням стратегії максимізації співвідношення момент струм/ Король С. В., Шубенко О.В., Хомуйло Ю.О. // Вісник ХНТУСГ Випуск 204 "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України". – Харків: ХНТУСГ, 2019. –С.30-31.