

# ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ БЛОКУ ЗАВДАННЯ ПОТОКУ У СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ОСЛАБЛЕННЯМ ПОЛЯ

**Железняк В.В., Лола М.О., студенти, Приймак Б.І., к.т.н., доц.**

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

**Вступ.** У векторно-керованих асинхронних двигунах (АД) верстатів, електромобілів, трамваїв тощо діапазон регулювання швидкостей зазвичай повинен охоплювати як значно нижчі, так і в декілька разів вищі від номінальної швидкості ротора. При зростанні швидкості АД до номінальної напруга статора сягає свого обмеження, яке визначається напругою живлення інвертора, тому подальше підвищення швидкості потребує ослаблення магнітного поля двигуна. Згідно зі стандартним алгоритмом магнітний потік змінюється зворотно пропорційно до швидкості двигуна, що дозволяє підтримувати постійною е. р. с. обертання ротора [1]. Проте момент двигуна при цьому не сягає свого максимуму, чого можна досягти на основі принципів екстремального керування [2].

Відомі варіанти систем автоматичного керування (САК) АД з максимізацією моменту у зоні ослаблення поля шляхом прямого формування завдання оптимального потоку, що визначається за деяким спрощеним виразом або за отриманою числовим способом залежністю у вигляді масиву значень [3-5]. При цьому точність відтворення цієї залежності визначає рівень помилок оптимізації моменту АД. На практиці для функцій, що не мають аналітичного опису, зручно застосувати поліноміальну апроксимацію. Але у цьому разі треба дослідити зв'язок степеня поліному з точністю оптимізації моменту АД.

**Метою роботи** є дослідження питання практичної реалізації блоку завдання потоку на основі поліноміальної апроксимації оптимальних залежностей потокозчеплення від швидкості ротора у векторно-керованому АД з оптимізацією електромагнітного моменту у зоні ослаблення поля як в рушійному, так і в генераторному режимах роботи двигуна.

**Матеріали і результати досліджень.** Короткозамкнений АД у зорієнтованих за вектором потокозчеплення ротора  $\bar{\Psi}_r$  координатах  $(d, q)$  при врахуванні втрат у залізі і кривої намагнічування можна описати як [6]

$$\begin{aligned}
 dI_{sd}/dt &= L_{s\sigma}^{-1} \left[ -(R_s + R_z) I_{sd} - R_z L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{rd} + T_z^{-1} L_r L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{md} + U_{sd} \right] + \omega_0 I_{sq}; \\
 dI_{sq}/dt &= L_{s\sigma}^{-1} \left[ -(R_s + R_z) I_{sq} + T_z^{-1} L_r L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{mq} + U_{sq} \right] - \omega_0 I_{sd}; \\
 d\Psi_{rd}/dt &= T_{r\sigma}^{-1} (-\Psi_{rd} + \Psi_{md}); \\
 d\Psi_{md}/dt &= R_z \left( I_{sd} + \Psi_{rd} / L_{r\sigma} - L_r L_m^{-1} L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{md} \right) + \omega_0 \Psi_{mq}; \\
 d\Psi_{mq}/dt &= R_z \left( I_{sq} - L_r L_m^{-1} L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{mq} \right) - \omega_0 \Psi_{md}; \\
 d\omega/dt &= J^{-1} (M_e - M_L),
 \end{aligned} \tag{1}$$

де змінними є компоненти узагальнених векторів напруги статора  $\bar{U}_s$ , струму статора  $\bar{I}_s$ , потокозчеплення ротора  $\bar{\Psi}_r$ ; головного потокозчеплення  $\bar{\Psi}_m$ ;  $\omega_0$  – швидкість обертання координат  $(d, q)$ ;  $z_p$  – кількість пар полюсів;  $\omega$  – швидкість ротора;  $R_s, R_r$  – активні опори фаз статора та ротора;  $R_z = R_z(\omega_0, \omega)$  – еквівалентний опір, що відображає втрати потужності у залізі машини;  $L_m = L_m(\Psi_m)$  – взаємна індуктивність;  $L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$  – індуктивності від полів розсіювання;  $L_r = L_m + L_{r\sigma}, T_{r\sigma} = L_{r\sigma}/R_r, T_z = L_m/R_z$ ;  $M_e, M_L$  – моменти двигуна та навантаження відповідно;  $J$  – момент інерції. Враховуючи, що в зорієнтованих координатах  $\Psi_{rd} = |\bar{\Psi}_r| \equiv \Psi_r$ , електромагнітний момент двигуна та швидкість координат в (1) обчислюються як  $M_e = 1.5z_p L_{r\sigma}^{-1} \Psi_r \Psi_{mq}$ ,  $\omega_0 = z_p \omega + \Psi_{mq} / (T_{r\sigma} \Psi_r)$ .

Систему (1) слід доповнити реально існуючими в САК АД обмеженнями модуля вектора напруги статора  $U_s = |\bar{U}_s|$  на рівні номінальної напруги живлення двигуна  $U_{sn}$  (індексом “n” нижче позначатимуться номінальні значення величин) та модуля вектора струму статора  $I_s = |\bar{I}_s|$  на рівні  $I_{max}$  у вигляді

$$0 \leq U_s \leq U_{sn}; \quad 0 \leq I_s \leq I_{max}. \quad (2)$$

Функціональна схема САК АД у спрощеному вигляді зображена на рис. 1. Система призначена для регулювання швидкості АД із приєднаним до нього механізмом у широкому діапазоні як вниз, так і вгору від номінальної швидкості. У блок векторного керування БВК поступають сигнали зворотних зв'язків із давачів струму ДС та давача швидкості ДШ.

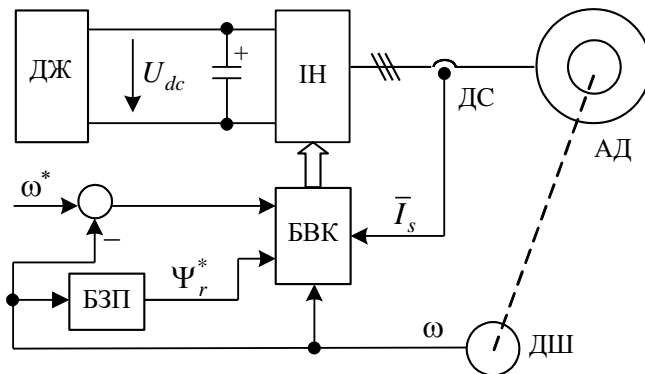


Рисунок 1 – Функціональна схема САК АД

Різниця завдання швидкості  $\omega^*$  і швидкості  $\omega$  подається на вхід регулятора швидкості, що знаходиться у БВК.

У блоці завдання потоку БЗП за певним алгоритмом формується завдання  $\Psi_r^*$  для розташованого у БВК контуру регулювання потоку, який стабілізує  $\Psi_r(t)$  на рівні  $\Psi_r^*(t)$ . Джерелом живлення ДЖ, що утворює напругу ланки постійного струму  $U_{dc}$ , може бути або мережа змінного струму з випрямлячем, або акумуляторна батарея у поєднанні із суперконденсатором. Інвертор напруги ІН з широтно-імпульсною модуляцією живить обмотки статора АД імпульсною напругою, амплітуда, частота та фаза першої гармоніки якої встановлюються сигналами керування з БВК.

У дослідженнях в статті використано дані типового чотириполюсного АД потужністю 1.5 кВт. Пошук для опису (1, 2) оптимального потокозчеплення

ротора за критерієм  $|M_e| \Rightarrow \max$  здійснено за допомогою генетичного алгоритму чисельної оптимізації при  $I_{\max} = 1.5I_{sn}$ . Отримані результати

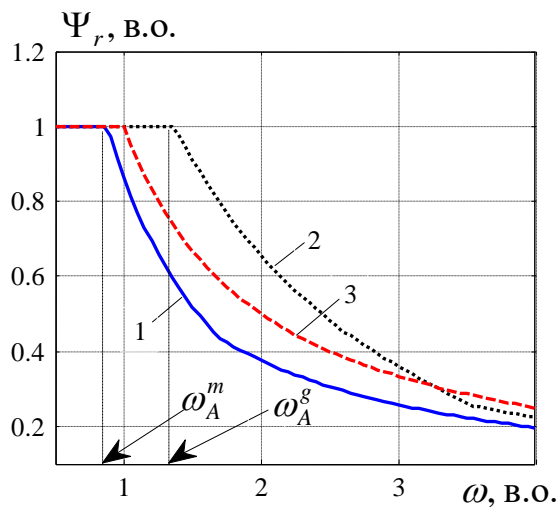


Рисунок 2 – Оптимальні (криві 1, 2) та стандартна (крива 3) залежності потокозчеплення від швидкості

наведено на рис. 2, де змінні нормовані відносно своїх номінальних значень і вимірюються у відносних одиницях (в.о.). На цьому рисунку графічно представлено оптимальні закони формування потокозчеплення ротора в рушійному режимі  $\Psi_{r,opt}^m(\omega)$  та в генераторному режимі  $\Psi_{r,opt}^g(\omega)$  (криві 1, 2 відповідно), а також стандартний закон формування потокозчеплення ротора (крива 3). Аналіз кривих показує, що вони істотно віддалені одна від одної і не є паралельними. Ці криві спочатку дещо віддаляються, а потім зближуються при зростанні швидкості

двигуна.

Важливе значення при екстремальному керуванні моментом АД має швидкість  $\omega_A$ , яка знаходиться на межі зон низьких та високих швидкостей ротора. Фізично на вказаній межовій швидкості напруга статора сягає свого максимуму, і, відповідно, в оптимальних законах формування потокозчеплення починається криволінійна ділянка зменшення  $\Psi_r$ . При цьому відповідність між заданим оптимальним та реальним значеннями  $\Psi_r$  забезпечується контуром автоматичного регулювання модуля вектора потокозчеплення ротора двигуна, що є складовою частиною системи векторного керування АД. На рис. 2 відмічено швидкості  $\omega_A^m$  та  $\omega_A^g$ , що є межовими відповідно для рушійного та генераторного режимів роботи АД. Для досліджуваного в статті двигуна межові швидкості дорівнюють  $\omega_A^m = 0.87$  в.о.,  $\omega_A^g = 1.37$  в.о., що свідчить про значну різницю між ними.

Суттєва відмінність між оптимальними законами формування потокозчеплення ротора в рушійному та генераторному режимах роботи засвідчує потребу в автономному розв'язанні для кожного з цих законів задачі апроксимації деякою аналітичною функціональною залежністю. Для апроксимації скалярних функціональних залежностей раціонально використовувати поліноміальний метод. Застосувавши метод поліноміальної апроксимації і позначивши  $\underline{\omega} = |\omega|$ , узагальнений оптимальний закон формування потокозчеплення ротора у відносних одиницях при може бути записаний як

$$\Psi_{r,opt} = \begin{cases} 1 & \text{при } \underline{\omega} \leq \omega_A; \\ a_0 \underline{\omega}^h + a_1 \underline{\omega}^{h-1} + \dots + a_{h-1} \underline{\omega} + a_h & \text{при } \underline{\omega} > \omega_A, \end{cases} \quad (3)$$

де для рушійного режиму  $\omega_A = \omega_A^m$ , для генераторного режиму  $\omega_A = \omega_A^g$ , а коефіцієнти  $a_i, i=1, \dots, h$  та степінь  $h$  поліному будуть різними для обох режимів.

Основними критеріями успішності практичного застосування аналітично апроксимованих оптимальних законів формування потокозчеплення є точність оптимізації моменту двигуна та складність обчислювальної реалізації. Щоб оцінити вплив похибок поліноміальної апроксимації на точність оптимізації моменту було проведено чисельне дослідження залежності різниці між моментом АД при використанні закону (3) та теоретично максимальним значенням моменту від степеня апроксимувального поліному для рушійного та генераторного режимів. Результати наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Точність оптимізації моменту залежно від  $h$

Степінь поліному $h$	Відносне відхилення моменту АД від оптимального значення	
	Рушійний режим	Генераторний режим
2	0.3	0.03
3	0.04	0.017
4	0.0086	0.0035

**Висновки.** При векторному керуванні АД з максимізацією моменту у зоні ослаблення поля для отримання не більшого ніж 5 % відхилення моменту від його максимально можливого значення степінь поліному, що у блоці завдання потоку апроксимує оптимальну залежність потокозчеплення від швидкості, для рушійного режиму має бути  $h \geq 3$ , а для генераторного –  $h \geq 2$ .

#### Перелік посилань

1. Novotny D.W., Lipo T.A. Vector control and dynamics of AC drives / Oxford: Clarendon Press, 2005.
2. Шрейнер Р.Т., Дмитриенко Ю.А. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами. – Кишинев.: Штиинца, 1982. – 224 с.
3. Bodson M., Chiasson J.N., Novotnak R.T. A systematic approach to selecting flux references for torque maximization in induction motors // *IEEE Trans. on Control Sys. Technol.*, Vol.3, No.4, 1995, P. 388 -397.
4. Wieser R.S. Optimal rotor flux regulation for fast accelerating induction machines in the field weakening region // Proc. IEEE Ind. Applicat. Soc. Annu. Meeting IAS, 1997, Vol.1, P. 401-409.
5. Harnefors L., Pietilainen K., Gertmar L. Torque-maximizing field-weakening control: design, analysis, and parameter selection // *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 48, No.1 , 2001, P. 161 -168.
6. Pryymak B., Moreno-Eguilaz M. Characteristics of induction motor drives with torque maximization in field weakening region // Proc. IEEE First Ukraine Conf. on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2017, pp. 508-513.