

РОЗДІЛ 5. АВТОМАТИЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ТА ЕЛЕКТРОПРИВОД

МЕТОД ОСЛАБЛЕННЯ ПОЛЯ В СИСТЕМАХ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Ніконенко Є. О., асп., асист., Пересада С. М., д.т.н., проф., Бугайчук Б. В., студ.

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

Вступ. У більшості типових використань векторно-керованих асинхронних електроприводів вимагається забезпечити постійний момент (до максимального значення) для кутових швидкостей нижче номінальної і функціонування приблизно з постійною потужністю для більших значень швидкості. Ослаблення поля асинхронних двигунів (АД) дозволяє підвищити кутову швидкість в межах встановленої потужності двигуна і інвертора.

Стандартним способом ослаблення поля є регулювання модуля вектора потокозчеплення інверсно до кутової швидкості двигуна [1] – [3]. Таке розімкнене керування має декілька недоліків, головними з яких є завищене значення струму, необхідне для формування моменту, неповне використання інвертора по напрузі і струму. Починаючи з 1990-х років було відновлено інтерес до розробки оптимізованих стратегій керування ослабленням поля [4], [5]. Наприклад, в [5] розроблено метод регулювання потоку за рахунок непрямого керування струмом, який є не тільки складним, але й вимагає складних розрахунків, а також табличного представлення інформації.

В загальному випадку розглядається декілька оптимізацій режимів ослаблення поля: стандартна стратегія МТРА (максимізація моменту на Ампер); максимальної потужності, яка еквівалентна максимізації моменту для даної швидкості. На сьогодні для усіх стратегій немає аналітичного розв'язку в умовах фізичних обмежень АД та інвертора.

Метою роботи є розробка методу керування моментом і потокозчепленням АД, який гарантує відпрацювання заданих траєкторій в статичних і динамічних режимах роботи електроприводу в режимі ослаблення поля з урахуванням фізичних обмежень АД і інвертора.

Матеріали дослідження. Математична модель АД і алгоритм прямого векторного керування моментом і потокозчепленням АД надано в [6].

Обмеження за струмом і напругою. Швидкісні режими роботи АД мають три регіони: постійного моменту ($\omega_0 < \omega_{об}$), постійної потужності ($\omega_{об} \leq \omega_0 < \omega_{ос}$) і постійного ковзання ($\omega_0 \geq \omega_{ос}$) [2], де $\omega_{об}$ і $\omega_{ос}$ визначають як базову і критичну частоти струму статора, як це показано на рис. 1.

Максимальне значення моменту АД визначається обмеженнями за струмом і напругою інвертора, а також термальним струмом АД. Базуючись на моделі АД, записаній в струмах статора в синхронній системі координат (d – q),

яка обертається з синхронною кутовою швидкістю ω_0 , обмеження за струмом мають вигляд

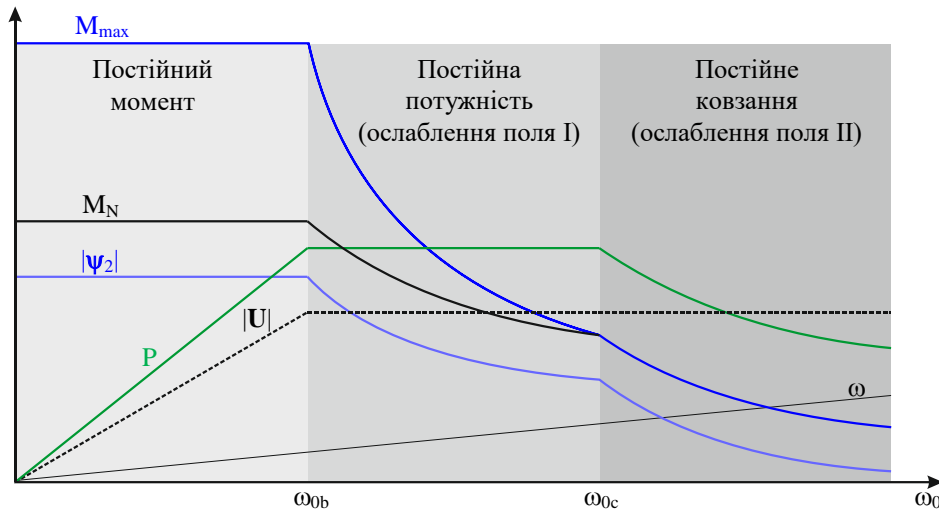


Рисунок 1 – Характеристики АД в режимі постійного і ослабленого потоку

$$i_{1d}^2 + i_{1q}^2 \leq I_{\max}^2, \quad (1)$$

де (i_d, i_q) – компоненти вектора струмів статора, I_{\max} – максимальний струм інвертора. Обмеження (1) має вигляд кола на площині струмів з радіусом I_{\max} .

Відповідно обмеження за напругою визначаються виразом

$$u_{1d}^2 + u_{1q}^2 \leq U_{\max}^2, \quad (2)$$

де (u_d, u_q) – компоненти вектора напруги; максимальне значення вихідної напруги інвертора $U_{\max} = \eta V_{dc} / \sqrt{3}$, V_{dc} – напруга ланки постійного струму, $\eta = 0.9 - 0.95$ – коефіцієнт запасу.

Формалізація обмеження (2) встановлюється з розгляду усталених режимів електричної частини АД за умови полеорієнтування і $R_1 = 0$ [4]:

$$U_{\max}^2 = \omega_0^2 \left[(\sigma i_{1q})^2 + (L_1 i_{1d})^2 \right], \quad (3)$$

де $\sigma = L_1(1 - L_m^2 / L_1 L_2)$, L_1, L_2 – індуктивності статора і ротора; L_m – індуктивність намагнічуючого контура; R_1 – активний опір статора.

Рівняння (3) визначає еліпс на площині струмів, який за умов збільшення ω_0 або зменшення напруги ланки постійного струму звужується відносно початку координат.

Виходячи з обмеження (1) для номінального струму $i_{1dN} = \psi_N^* / L_m$, де ψ_N^* номінальне задане потокозчеплення, маємо обмеження для моментного струму

$$i_{1q\max} \leq \sqrt{I_{\max}^2 - i_{dN}^2}. \quad (4)$$

Обмеження (4) визначає, що для номінального потокозчеплення ψ_N^* максимальний момент в першій зоні завжди однаковий, оскільки відсутнє обмеження за напругою.

Зі зростанням кутової швидкості, а відповідно і зростанням ω_0 , еліпс (4) звужується і настає момент, коли обмежуюче коло (2) і еліпс (4) мають спільну точку. Вона визначає частоту ω_{0b} , яку прийнято називати базовою для початку ослаблення поля. Після перетворень з (3) можна визначити

$$\omega_{0b} = \frac{U_{\max}}{L_1 \sqrt{i_{1dN}^2 (1 - \sigma^2) - \sigma^2 I_{\max}^2}}, \quad (5)$$

а також базову кутову швидкість

$$\omega_b = \omega_{0b} - \omega_2, \quad (6)$$

де ω_2 – частота ковзання для струму I_{\max} .

Режим постійної потужності ($\omega_{0b} \leq \omega_0 \leq \omega_{0c}$) – ослаблення поля №1.

У цьому режимі АД розвиває приблизно номінальну потужність (в усталеному режимі), тому момент описується виразом $M = P_N / \omega$, де P_N – номінальна вихідна потужність. Режим ослаблення починається з частоти ω_{0b} і закінчується в точці критичної частоти ω_{0c} , після якої відсутні точки перетину еліпса (для ω_{0c}) і кривої постійного моменту $M = M_N (\omega_{0b} / \omega_{0c})$. Відповідно до встановлених робочих зон АД важливо відмітити, що в режимах з постійним потоком обмеження за моментом визначаються $I \leq I_{\max}$, в зоні I ослаблення поля встановлюються обмеження за струмом $I \leq I_{\max}$ і напругою $U \leq U_{\max}$.

Режим постійного ковзання ($\omega_0 \geq \omega_{0c}$) – ослаблення поля №2. Зона ослаблення поля №2 відома також як зона постійного ковзання. В [7] показано, що максимальна частота ковзання в зоні №2 за умови нехтування активним опором статора $R_1 = 0$ дорівнює

$$\omega_{2\max} = \frac{R_2 L_1}{L_2 \left(L_1 - \frac{L_m^2}{L_2} \right)} = \frac{L_1}{\left(L_1 - \frac{L_m^2}{L_2} \right) \tau_r}, \quad (7)$$

де $\tau_r = L_2 / R_2$ – стала часу роторного кола, R_2 – активний опір ротора, а критична частота струму статора буде:

$$\omega_{0c} = \frac{U_{\max} \sqrt{2(\sigma_o^2 + 1)}}{2\sigma_o L_1 \omega_0 I_{\max}}, \quad (8)$$

де $\sigma_o = (1 - L_m^2 / L_1 L_2)$ – повний фактор розсіювання.

Максимальне значення моментного струму статора може бути розраховано з використанням виразу [3]

$$i_{1q\max} = \omega_{2\max} i_{1d} \tau_r = \frac{L_1 L_2}{(L_1 L_2 - L_m^2)} \frac{|\psi_2|}{L_m}, \quad (9)$$

де $|\boldsymbol{\psi}_2|$ – модуль вектора потокозчеплення ротора, інформація про який отримується за допомогою спостерігача потокозчеплення.

Максимальний момент в зоні II ослаблення поля дорівнює

$$M_{\max} = \frac{3 L_m}{2 L_2} |\boldsymbol{\psi}_2| i_{1q \max} = \frac{3 L_m}{2 L_2} |\boldsymbol{\psi}_2|^2 \frac{L_1}{(L_1 L_2 - L_m^2)}. \quad (10)$$

Алгоритм формування фізичних обмежень (1), (2) для забезпечення функціонування контурів регулювання струмів статора має наступний вигляд: 1) для напруги по осі d: $u_{1d \max} = U_{\max}$; 2) для напруги по осі q: $u_{1q \max} = \sqrt{U_{\max}^2 - u_{1d}^2}$; 3) для завдання струму по осі d: $i_{1d \max} = i_{1dN}$; 4) для завдання струму по осі q: $i_{1q \max} = \sqrt{I_{\max}^2 - i_{1d}^2}$. Якщо ці сформовані обмеження гарантуються, то контури регулювання струмів здійснюють безперервне регулювання і системи векторного керування забезпечують регулювання моменту (швидкості) і модуля вектора потокозчеплення в умовах асимптотичного полеорієнтування. Необхідно відмітити, що відповідно до запропонованого методу, для заданих параметрів АД, напруги ланки постійного струму і встановлення обмежень 1) – 4) відпрацювання моменту і модуля вектора потокозчеплення ротора забезпечується *одночасним* формуванням заданих функцій моменту $M^*(t)$ і потоку $\boldsymbol{\psi}^*(t)$.

Результати дослідження розробленої системи керування. Базову структурну схему системи прямого векторного керування моментом-потокозчепленням АД, яка реалізує алгоритм керування [6] з урахуванням обмежень, розглянутих в даній роботі, представлено на рис. 2. Для виходів усіх регуляторів встановлено алгоритм anti-windup. На рис. 2 формування завдання $\boldsymbol{\psi}^*$ здійснює задавач потоку. Відповідно до методу формування динамічних режимів ослаблення поля, задана траєкторія потокозчеплення $\boldsymbol{\psi}^*(t)$ конструюється виходячи з номінального значення $\boldsymbol{\psi}_{\text{ref}} = \boldsymbol{\psi}_N^*$ і базової частоти ω_{0b} , яка знаходиться з умови $|\mathbf{u}_1| < U_{\max}$ в усіх режимах ослаблення поля. Індикативне значення ω_{0b} (5) при цьому корегується з метою більш повного використання напруги для моментів більших за номінальний.

Номінальні дані досліджуваного двигуна 30 кВт: момент $M_N = 97$ Нм, швидкість $\omega_N = 308$ рад/с, потокозчеплення $\boldsymbol{\psi}_N = 0.95$ Вб, струм $I_{1N} = 56$ А.

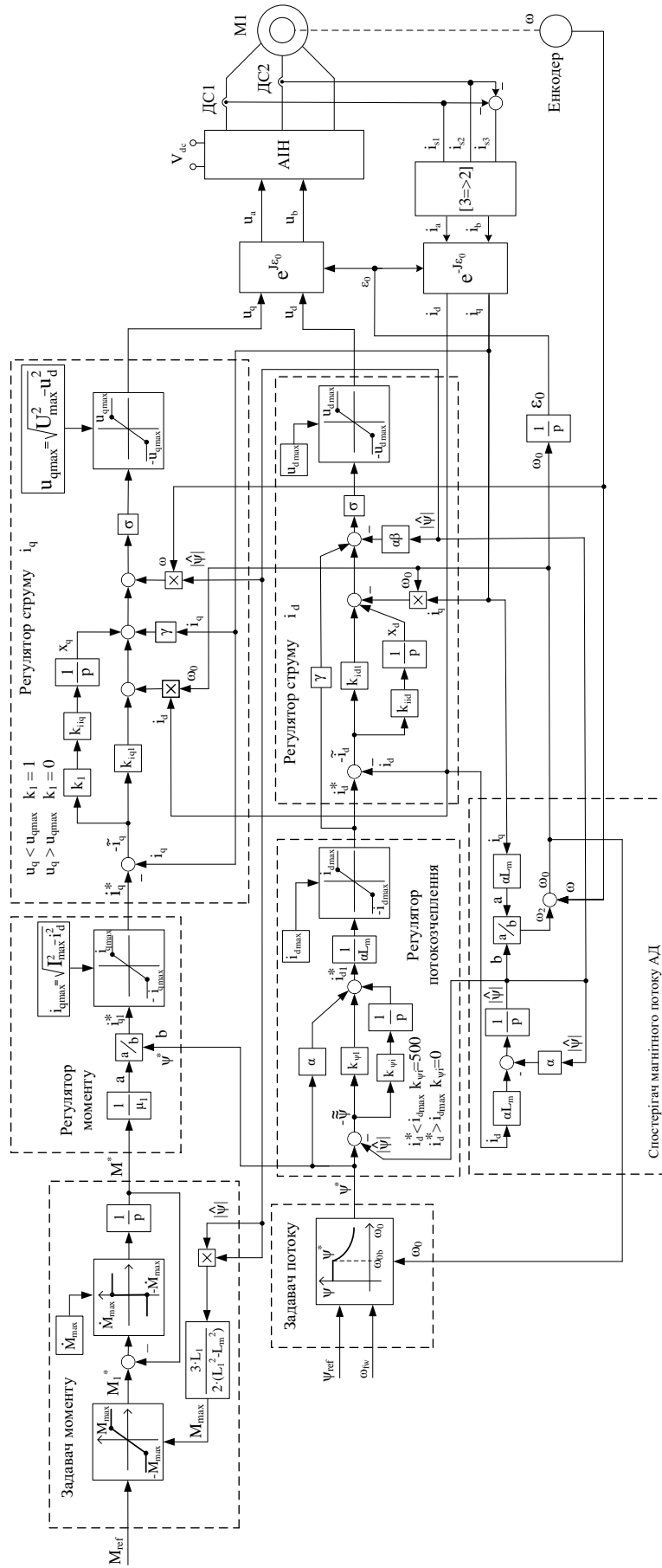


Рисунок 2 – Структурна схема системи прямого векторного керування моментом АД з розробленим алгоритмом ослаблення поля

Графіки перехідних процесів системи керування з режимом ослаблення поля для розгону з динамічним моментом $M_N = 97$ Нм до кутової швидкості 870 рад/с ($2.8\omega_N$) з наступним гальмуванням до нуля показано на рис. 3.

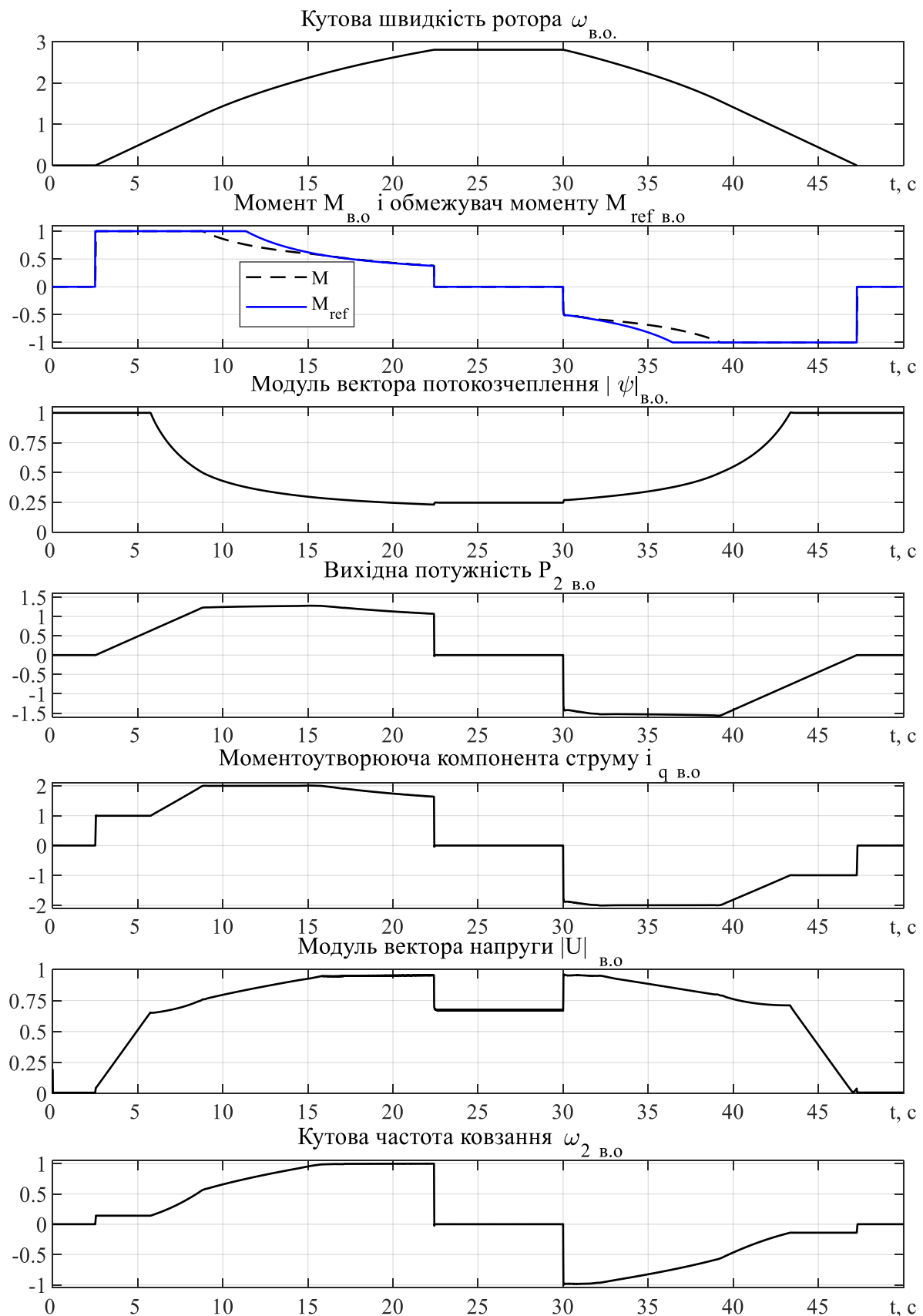


Рисунок 3 – Графіки перехідних процесів в системі з ослабленням поля

Параметри Т-подібної схеми заміщення двигуна наступні: повний момент інерції $J = 1.61 \text{ кгм}^2$, активний опір статора $R_1 = 0.116 \text{ Ом}$, приведений опір ротора $R_2 = 0.068 \text{ Ом}$, індуктивності статора і ротора $L_1 = L_2 = 0.049 \text{ Гн}$, індуктивність намагнічуючого контуру $L_m = 0.048 \text{ Гн}$.

В умовах тесту встановлено $i_{dN} = 20 \text{ А}$, $I_{\max} = 2.5I_{1N} = 140 \text{ А}$, $U_{\max} = 310 \text{ В}$. На рис. 3 представлено графіки перехідних процесів змінних (у відносних одиницях) кутової швидкості, моменту, потокозчеплення, потужності, струму i_q , модуля напруги і ковзання. Вони відповідають теоретично визначеним, вміщують зони постійного моменту, постійної потужності і постійного ковзання. Напруга інвертора не перевищує максимальне значення, в процесі розгону обмежується максимальне значення моменту M_{\max} відповідно до (10), а також максимальне значення струму i_q .

Висновки. Розроблено новий метод формування динамічних режимів ослаблення поля АД, який передбачає одночасне конструювання заданих траєкторій потокозчеплення і моменту в функції оціненого спостерігачем модуля вектора потокозчеплення ротора. Алгоритм керування забезпечує асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій моменту та потокозчеплення в умовах встановлених обмежень за струмами і напругою.

Перелік посилань

1. W. Leonhard. *Control of electrical drives*. Springer Science & Business Media. 2001. 241 p.
2. M.P. Kazmierkowski, H. Tunia. *Automatic control of converter-fed drives*. Elsevier: Electronic Engineering. 1994. 560 p.
3. D.W. Novotny, T.A Lipo. *Vector control and dynamics of AC drives*. Oxford University Press. 1996. 440 p.
4. S. H. Kim, S. K. Sul, "Maximum torque control of an induction machine in the field weakening region," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, no. 4, pp. 787-794, July-Aug. 1995, doi: 10.1109/28.395288.
5. G. Gallegos-Lopez, F. S. Gunawan, J. E. Walters, "Current Control of Induction Machines in the Field-Weakened Region," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, no. 4, pp. 981-989, July-aug. 2007, doi: 10.1109/TIA.2007.900459.
6. Пересада С.М. Обобщенная теория косвенного векторного управления асинхронным двигателем. Часть II. Синтез алгоритма обработки модуля потока и угловой скорости. *Технічна електродинаміка*. 1999. № 4. С. 26-31.
7. P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, S. D. Pekarek. *Analysis of electric machinery and drive systems*. 3rd edition. IEEE Press: John Wiley & Sons. Vol. 75. 2013. 680 p.