

# УТОЧНЕННЯ ЗАКОНУ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ РОЗМАГНІЧУВАННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА В СИСТЕМІ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ

Мельник А. В., магістрант, Толочко О. І., д.т.н., проф.

НТУУ «КПІ», кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

**Вступ.** В системах полеорієнтованого (FOC) векторного керування асинхронним приводом двигун спочатку намагнічують шляхом подачі сигналу завдання на потокозчеплення ротора  $\psi_r$  або на потокоутворюючу складову струму статора  $i_{sd}$ , а потім приступають до регулювання механічних координат: моменту, швидкості або положення. При роботі електроприводу в напруженому повторно-короткочасному режимі, двигун під час паузи, як правило, не розмагнічують, що приводить до додаткових непродуктивних втрат електроенергії у вигляді теплових втрат в обмотках статора у процесі підтримки потокозчеплення ротора на бажаному рівні.

При достатній тривалості пауз ці втрати можна зменшити за рахунок розмагнічування асинхронного двигуна (АД) на початку паузи і намагнічування його перед початком нового робочого етапу.

В [1] проаналізовані теплові втрати на намагнічування та розмагнічування двигуна в системі прямого векторного керування (з регулятором потокозчеплення ротора) при різних рівнях його обмеження; показано, що мінімальні втрати мають місце при обмеженні струму на рівні струму холостого ходу статора  $i_{sd0}$  (без форсування), який забезпечує намагнічування АД до необхідної величини

$$\psi_{r0} = L_m i_{sd}, \quad (1)$$

де  $L_m$  – взаємодуктивність.

В [2] проаналізовано, при яких тривалостях пауз розмагнічування двигуна з подальшим його намагнічуванням дозволить зменшити сумарні теплові втрати. Аналіз виконано для стрибкоподібної зміни струму  $i_{sd}$  від до 0 до  $i_{sd0}$  та навпаки.

В [3] зроблено спробу знайти оптимальні, з точки зору теплових втрат, закони зміни потокозчеплення ротора при намагнічуванні та розмагнічуванні АД. Але при цьому, на наш погляд, допущено деякі неточності, в тому числі і концептуальні.

**Мета роботи.** Метою даної статті є уточнення оптимальних за тепловими втратами законів регулювання потокозчеплення векторно-керуваного АД під час знаходження його в зупиненому стані.

**Матеріали і результати досліджень.** Структурна схема системи полеорієнтованого векторного керування АД при зупиненому двигуні в обертовій ортогональній системі координат  $dq$ , орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора, зображена на рис. 1. В схемі використано такі

позначення: РП – регулятор потокозчеплення; КРТd – замкнений контур регулювання  $d$ -складової струму статора;  $\psi_r^*, i_{sd}^*$  – сигнали завдання на потокозчеплення ротора та потокоутворюючу складову струму статора;  $k_r$  – коефіцієнт магнітного зв'язку ротора;  $T_r = L_r/R_r$  – стала часу ротора;  $L_r, R_r$  – індуктивність та активний опір ротора;  $k_r = L_m/L_r$  – коефіцієнт магнітного зв'язку ротора;  $T_i, T_\psi$  – сталі часу інтегрування розімкнених контурів струму та потокозчеплення відповідно.

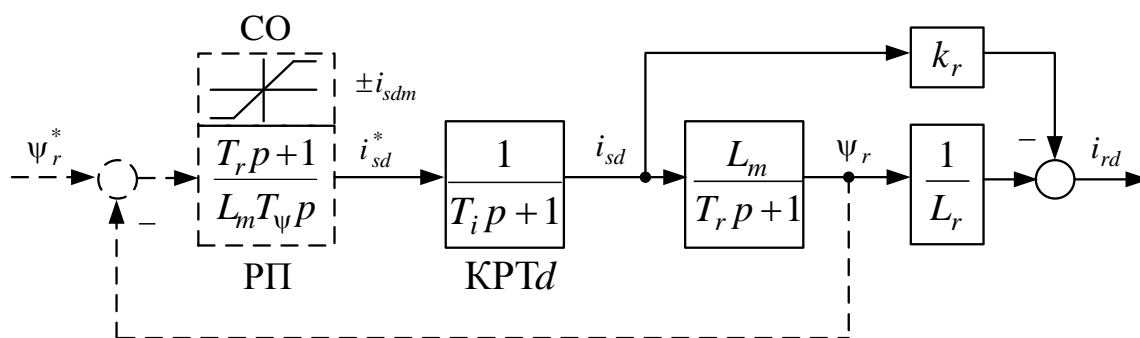


Рисунок 1 – Структурна схема системи векторного керування АД при зупиненому двигуні

При прямому керуванні (DFOC) система складається з контуру потокозчеплення і підпорядкованого йому контуру струму, а при непрямому керуванні (IFOC) регулятор потокозчеплення відсутній.

Сумарні теплові втрати в обмотках статора і ротора, зумовлені потокоутворюючими складовими струмів статора та ротора, що підлягають мінімізації, обчислюються за формулою:

$$\Delta W = \int_0^{t_k} \Delta P(t) dt = \int_0^{t_k} \frac{3}{2} [R_s i_{sd}^2(t) + R_r i_{rd}^2(t)] dt = \frac{3}{2} \int_0^{t_k} [R_s i_{sd}^2(t) + R_r i_{rd}^2(t)] dt, \quad (2)$$

де  $\Delta P, \Delta W$  – потужність та енергія втрат відповідно.

З точки зору теорії оптимального керування енергія втрат являє собою мінімізований функціонал, а потужність втрат – підінтегральну функцію цього функціоналу.

Щоб скористатися методом оптимізації Ейлера, виразимо струми статора і ротора через потокозчеплення ротора та його першу похідну.

Згідно з передавальною функцією

$$\frac{\psi_r(p)}{i_{sd}(p)} = \frac{L_m}{T_r p + 1} \quad (3)$$

запишемо диференціальне рівняння

$$i_{sd}(t) = \frac{1}{L_m} [\psi_r(t) + T_r \psi_r'(t)]. \quad (4)$$

З виразу потокозчеплення ротора через потокоутворюючі складові струмів

$$\psi_r = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \quad (5)$$

та з урахуванням (4) знаходимо  $i_{rd}$ :

$$i_{rd}(t) = \frac{1}{L_r} [\psi_r(t) - L_m i_{sd}(t)] = -\frac{T_r}{L_r} \psi'_r(t) = -\frac{\psi'_r(t)}{R_r}. \quad (6)$$

Після підстановки виразів (4) і (6) в підінтегральну функцію функціоналу (2) отримуємо

$$F = R_s i_{sd}^2 + R_r i_{rd}^2 = \frac{R_s}{L_m^2} \psi_r^2 + \frac{2R_s}{L_m k_r R_r} \psi_r \psi'_r + \frac{R_s + k_r^2 R_r}{k_r^2 R_r^2} (\psi'_r)^2. \quad (7)$$

Рівняння Ейлера, розв'язок якого забезпечує екстремум функціонала (2), має такий загальний вигляд [4]:

$$\frac{\partial F}{\partial \psi_r} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial F}{\partial \psi'_r} \right) = 0. \quad (8)$$

Знаходимо послідовно похідні останнього рівняння для функції (7).

$$\frac{\partial F}{\partial \psi_r} = \frac{2R_s}{L_m^2} \psi_r + \frac{2R_s}{L_m k_r R_r} \psi'_r, \quad (9)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \psi'_r} = \frac{2R_s}{L_m k_r R_r} \psi_r + \frac{2(R_s + k_r^2 R_r)}{k_r^2 R_r^2} \psi'_r,$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial F}{\partial \psi'_r} \right) = \frac{2R_s}{L_m k_r R_r} \psi'_r + \frac{2(R_s + k_r^2 R_r)}{k_r^2 R_r^2} \psi''_r. \quad (10)$$

Після підстановки (9) і (10) в (8) і деяких перетворень маємо однорідне диференціальне рівняння (ДР)

$$\psi_r - \frac{R_s + k_r^2 R_r}{k_r^2 R_r^2} \cdot \frac{L_m^2}{R_s} \psi''_r = \psi_r - \frac{R_s + k_r^2 R_r}{R_s} T_r^2 \psi''_r = 0. \quad (11)$$

Позначимо  $T_o^2 = \frac{R_s + k_r^2 R_r}{R_s} T_r^2$ , звідкіля маємо

$$T_o = \lambda T_r \quad (12)$$

– стала часу оптимального перехідного процесу;

$$\lambda = \sqrt{\frac{R_s + k_r^2 R_r}{R_s}} = \sqrt{1 + \frac{k_r^2 R_r}{R_s}} > 1. \quad (13)$$

ДР (11) відповідає характеристичне рівняння

$$T_o^2 p^2 - 1 = 0 \quad (14)$$

з двома дійсними полюсами

$$p_{1,2} = \pm \frac{1}{T_o} = \pm \Omega_o, \quad (15)$$

якому при розмагнічуванні відповідають перехідні функції, що є розв'язком ДР (11):

$$\psi_r^{\text{позм}}(t) = C_1 e^{-\Omega_o t} + C_2 e^{\Omega_o t}, \quad (16)$$

$$(\psi_r^{\text{позм}})'(t) = -C_1\Omega_0 e^{-\Omega_0 t} + C_2\Omega_0 e^{\Omega_0 t}. \quad (17)$$

У [3] також отримані рівняння (12) та (14-16), але коефіцієнт  $\lambda$  помилково визначено як величину, зворотню до величини, описаної формулою (13).

Далі автор статті [3] припускає ще одну неточність. Він знаходить коефіцієнти оптимальних керувань із відомих граничних умов за потокозчепленням, тобто

$$\psi_r^{\text{позм}}(0) = \psi_{r0}, \quad \psi_r^{\text{позм}}(t_k) = 0, \quad (18)$$

$$\psi_r^{\text{нам}}(0) = 0, \quad \psi_r^{\text{нам}}(t_k) = \psi_{r0}, \quad (19)$$

і не враховує граничні умови за похідною від потокозчеплення, які при досягненні основною координатою заданого значення обов'язково повинні бути нульовими:

$$(\psi_r^{\text{позм}})'(t_k) = 0, \quad (\psi_r^{\text{нам}})'(t_k) = 0; \quad (20)$$

Умова (20) може бути досягнута або за рахунок вибору початкових умов за похідною, або при застосуванні керування з обмеженням, для пошуку якого треба застосовувати більш складні методи оптимізації.

В результаті неврахування умов (20) в [3] отримані такі закони оптимального керування:

$$\psi_r^{\text{позм}}(t) = \psi_{r0} \frac{\text{sh}(\Omega_0(t_k - t))}{\text{sh}(\Omega_0 t_k)}, \quad \psi_r^{\text{нам}}(t) = \psi_{r0} \frac{\text{sh}(\Omega_0 t)}{\text{sh}(\Omega_0 t_k)}. \quad (21)$$

При врахуванні умови (20) аналіз виразів (16) і (17) при  $t = t_k$  показує, що нульові значення потокозчеплення та його похідної можуть бути досягнуті тільки при  $t_k = \infty$ ,  $C_2 = 0$  і  $C_1 = \psi_{r0}$ , тобто при

$$\psi_r^{\text{позм}}(t) = \psi_{r0} e^{-\Omega_0 t}. \quad (22)$$

Для підтвердження отриманого аналітично результату виконаємо математичне моделювання системи рис. 1 на прикладі АД з такими параметрами:  $P_n = 5$  кВт;  $I_{сн} = 13,5$  А;  $I_{с0} = 8,4$  А;  $R_s = 1,32$  Ом;  $R_r = 2,34$  Ом;  $L_m = 0,085$  Гн;  $k_r = 0,98$ . З них розраховуємо:  $L_r = L_m / k_r = 0,087$  Гн,  $T_r = L_r / R_r = 0,037$  с,  $i_{sd0} = I_{s0} \sqrt{2} = 11,88$  А,  $\psi_{r0} = L_m i_{sd0} = 1,01$  Вб,  $\lambda = 1,644$ ,  $T_o = 0,061$  с. Задаємо також  $T_i = 0,4$  мс,  $T_\psi = 2T_i = 0,8$  мс.

У процесі модельного експерименту завдання на потокозчеплення формували за законом (22), змінюючи  $\Omega_0 = 1/T$  від  $1/T_r$  до  $1/2T_o$ , і фіксували сумарні теплові втрати за формулою (2), приймаючи час перехідного процесу таким, щоб потокозчеплення ротора увійшло у 2%-ну зону, тобто  $t_k = 4T$ . За результатами побудовано графік залежності  $\Delta W(T/T_o)$ , поданий на рис. 2, з якого видно, що при  $T = T_o$  дійсно існує явно виражений мінімум досліджуваного функціонала. Крім того, видно, що при  $T = T_r$  (ліва межа графіка), коли перехідні процеси пробігають практично так само, як при стрибкоподібному зменшенні завдання на потокозчеплення або на потокоутворюючу складову струму статора до нуля, теплові втрати також виявляються більшими, ніж при виведеному оптимальному законі керування,

хоча в деяких джерелах помилково стверджується, що саме стрибкоподібне скидання струму  $d$ -складової струму статора до нуля є енергетично найбільш виправданим. Можливо такі твердження пов'язані з тим, що дослідники забувають про участь у формуванні магнітного поля  $d$ -складової струму ротора.

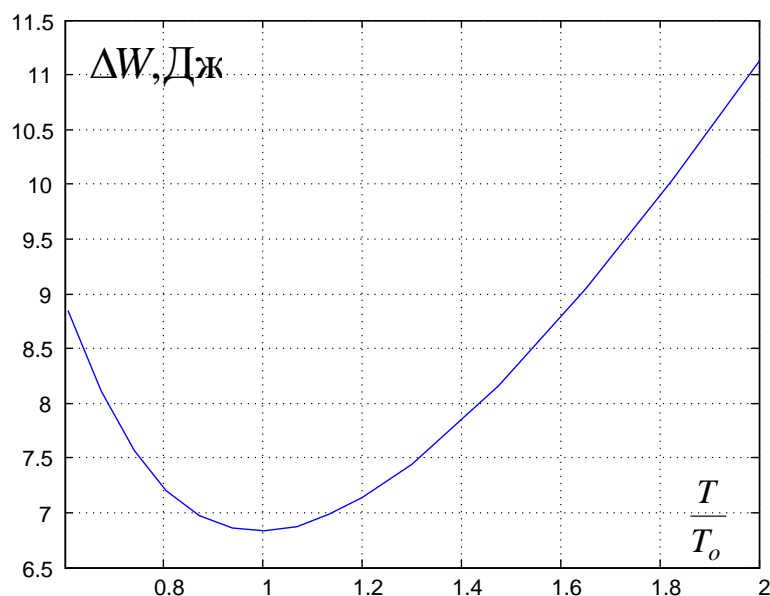


Рисунок 2 – Залежність теплових втрат при розмагнічуванні від сталого часу експоненціального процесу

**Висновки.** Як показали дослідження, використання запропонованого варіанту оптимального керування процесом розмагнічування векторно-керованого АД дозволяє мінімізувати теплові втрати в цьому режимі. Таким же способом можна вивести оптимальний закон керування процесом намагнічування. Предметом подальших досліджень може бути синтез оптимальних керувань з перемиканнями, який застосовують при необхідності врахування обмеження на керування та регульовані координати.

#### Перелік посилань

1. Толочко О.И. Оптимизация энергопотребления позиционного электропривода с векторным управлением асинхронным двигателем / О.И. Толочко, П.И. Розкаряка, Г.С. Чекавский // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: "Електротехніка і енергетика". – Вип. 11 (186). – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2011. – С. 396-400.
2. Толочко О.И. Управление процессами намагничивания и размагничивания асинхронного двигателя в системах векторного управления / О.И. Толочко, П.И. Розкаряка, Г.С. Чекавский, А.К. Кужель // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 3/2011 (15). – С. 79-82.
3. Волков В.А. Оптимизация режимов намагничивания и размагничивания частотно-регулируемого асинхронного двигателя / В.А. Волков // Електротехніка і енергетика. – Випуск 2. – Донецьк, Наукові праці ДонНТУ. – 2013. – С. 59-66.
4. Петров Ю.П. Вариационные методы теории оптимального управления / Ю.П. Петров. – Ленинград: Энергия, 1977. – 281 с.