

УДК 62-83

О.І. ТОЛОЧКО (д.т.н., проф.), А.В. МЕЛЬНИК (магістрант)
 НТУУ «КПІ», кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу
tolochko_oi@mail.ru

МІНІМІЗАЦІЯ ТЕПЛОВИХ ВТРАТ ПРИ РОЗМАГНІЧУВАННІ ВЕКТОРНО-КЕРОВАНОВОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Анотація. Для системи полеорієнтованого векторного керування асинхронним двигуном методом безумовної оптимізації Ейлера виведено закон зміни потокозчеплення ротора нерухомого двигуна при його розмагнічуванні, що забезпечує мінімальні теплові втрати в обмотках двигуна. Виконано порівняння оптимального керування процесом розмагнічування з таким, що досягається стрибкоподібним зниженням потокоутворюючої складової струму статора до нуля. Розмагнічування двигуна в паузах повторно-короткочасного режиму дозволить підвищити енергоефективність векторного керування.

Ключові слова: електропривод, асинхронний двигун, потокозчеплення ротора, оптимальне керування, мінімізація теплових втрат, енергоефективність

Постановка проблеми. В системах полеорієнтованого векторного керування (ФОС) асинхронним приводом двигун спочатку намагнічують шляхом подачі сигналу завдання на потокозчеплення ротора ψ_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 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 циклу.

Аналіз попередніх досліджень. В [1] проаналізовані теплові втрати на намагнічування та розмагнічування двигуна в системі прямого векторного керування (з регулятором потокозчеплення ротора) при стрибкоподібній зміні завдання на потокозчеплення та різних рівнях обмеження i_{sd} ; 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

$$\psi_{r0} = L_m i_{sd0}, \quad (1)$$

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 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.

Метою роботи є уточнення оптимального за тепловими втратами закону регулювання потокозчеплення векторно-керованого АД під час розмагнічування 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; ψ_r^* , i_{sd}^* – сигнали завдання на потокозчеплення ротора та потокоутворюючу складову струму статора; $T_r = L_r/R_r$ – стала часу ротора; L_r, R_r – індуктивність та активний опір ротора; $k_r = L_m/L_r$ – коефіцієнт магнітного зв'язку ротора; T_ψ , T_ψ – сталі часу інтегрування розімкнених контурів струму та потокозчеплення відповідно.

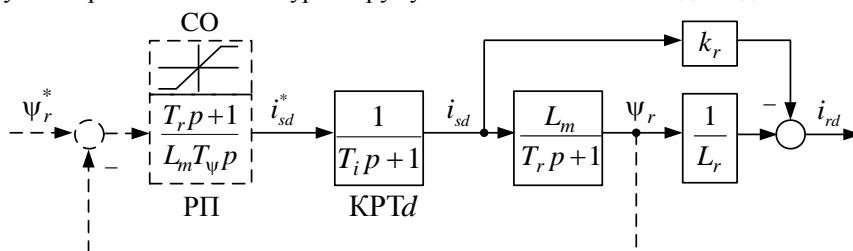


Рисунок 1 – Структурна схема системи векторного керування АД при зупиненому двигуні

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:

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

де ΔP , ΔW – 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 безумовної 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 диференційне 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

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

Позначивши

$$R_{sr} = R_s + k_r^2 R_r, \quad \lambda^2 = \frac{R_{sr}}{R_s} = 1 + k_R, \quad k_R = \frac{k_r^2 R_r}{R_s}, \quad (7)$$

та, враховуючи, що

$$L_m k_r R_r = L_m^2 / T_r, \quad k_r^2 R_r^2 = L_m^2 / T_r^2,$$

остаточно маємо

$$F = \frac{R_s}{L_m^2} \cdot [\psi_r^2 + 2T_r \psi_r \psi'_r + \lambda^2 T_r^2 (\psi'_r)^2]. \quad (8)$$

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

$$\frac{\partial F}{\partial \psi_r} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial F}{\partial \psi'_r} \right) = 0. \quad (9)$$

Знаходимо послідовно похідні останнього рівняння для функції (7).

$$\frac{\partial F}{\partial \psi_r} = \frac{2R_s}{L_m^2} (\psi_r + T_r \psi'_r), \quad (10)$$

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

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial F}{\partial \psi'_r} \right) = \frac{2R_s}{L_m^2} \cdot (T_r \psi'_r + \lambda^2 T_r^2 \psi''_r). \quad (11)$$

Після підстановки (10) і (11) у (9) і деяких перетворень отримуємо однорідне диференційне рівняння (ДР)

$$\psi_r - \lambda^2 T_r^2 \psi''_r = 0. \quad (12)$$

Позначимо $T_o^2 = \lambda^2 T_r^2$, звідки маємо

$$T_o = \lambda T_r \quad (13)$$

– стала часу оптимального перехідного процесу;

$$\lambda = \sqrt{\frac{R_{sr}}{R_s}} = \sqrt{1 + \frac{k_r^2 R_r}{R_s}} = \sqrt{1 + k_R} > 1. \quad (14)$$

ДР (11) відповідає характеристичне рівняння

$$T_o^2 p^2 - 1 = (T_o p + 1)(T_o p - 1) = 0 \quad (15)$$

з двома дійсними полюсами

$$p_{1,2} = \pm \frac{1}{T_o} = \pm \Omega_o, \quad (16)$$

через які можна записати формули перехідних процесів при розмагнічуванні двигуна, як розв'язок ДР (12):

$$\psi_r^{\text{розм}}(t) = C_1 e^{-\Omega_o t} + C_2 e^{\Omega_o t}, \quad (17)$$

$$(\psi_r^{\text{розм}})'(t) = -C_1 \Omega_o e^{-\Omega_o t} + C_2 \Omega_o e^{\Omega_o t}. \quad (18)$$

У [3] також отримані рівняння (12-18), але коефіцієнт λ у цій статті помилково визначено як величину, зворотню до величини, описаної формулою (14).

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

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

$$\psi_r^{\text{нам}}(0) = 0, \quad \psi_r^{\text{нам}}(t_k) = \psi_{r0} \quad (20)$$

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

$$(\psi_r^{\text{розм}})'(t_k) = 0, \quad (\psi_r^{\text{нам}})'(t_k) = 0; \quad (21)$$

Умови (21) можуть бути досягнуті 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 (21) в [3] отримані такі закони оптимального керування:

$$\psi_r^{\text{розм}}(t) = \psi_{r0} \frac{\text{sh}(\Omega_o(t_k - t))}{\text{sh}(\Omega_o t_k)}, \quad \psi_r^{\text{нам}}(t) = \psi_{r0} \frac{\text{sh}(\Omega_o t)}{\text{sh}(\Omega_o t_k)}. \quad (22)$$

При врахуванні першої з умов (21) аналіз виразів (17) і (18) 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

$$\psi_r^{\text{розм}}(t) = \psi_{r0} e^{-\Omega_o t}, \quad (23)$$

що відповідає відкиданню додатного полюса і перетворенню характеристичного рівняння (15) у рівняння

$$T_o p + 1 = 0.$$

Для визначення оптимальних втрат підставимо вираз (23) та першу похідну від нього

$$(\psi_r^{\text{розм}})'(t) = -\Omega_o \psi_{r0} e^{-\Omega_o t} \quad \text{у (8):}$$

$$F = \frac{R_s \psi_{r0}^2 e^{-2\Omega_o t}}{L_m^2} \cdot [1 - 2T_r \Omega_o + \lambda^2 T_r^2 \Omega_o^2] \quad (24)$$

та знайдемо функціонал (2):

$$\Delta W_o = \frac{3}{2} \int_0^{t_k} F(t) dt = -\frac{3R_s \psi_{r0}^2}{4L_m^2 \Omega_o} e^{-2\Omega_o t} \Big|_0^\infty \cdot [1 - 2T_r \Omega_o + \lambda^2 T_r^2 \Omega_o^2] = \Delta W_c \left(\frac{1}{\Omega_o T_r} - 2 + \lambda^2 T_r \Omega_o \right), \quad (25)$$

де

$$\Delta W_c = \frac{3R_s \psi_{r0}^2 T_r}{4L_m^2}. \quad (26)$$

Після підстановки у формулу (25) оптимальної частоти (16) з урахуванням виразу для оптимальної сталої часу експоненціального перехідного процесу (13) маємо формулу для розрахунку мінімально можливих теплових втрат в рамках сформульованої вище задачі оптимального керування.

$$\Delta W_o = \Delta W_c (\lambda - 2 + \lambda) = 2\Delta W_c (\lambda - 1). \quad (27)$$

Оскільки в деяких джерелах стверджується, що при розмагнічуванні найменші втрати мають місце при миттєвому зникненні струму i_{sd} , визначимо втрати ΔW_r і для цього випадку, коли в формулах (23) і (25) треба тільки замінити параметр $\Omega_o = 1/T_o$ параметром $\Omega_r = 1/T_r$:

$$\Delta W_r = \Delta W_c(1 - 2 + \lambda^2) = \Delta W_c(\lambda^2 - 1). \quad (28)$$

Знайдемо, за яких умов втрати ΔW_r перевищують ΔW_o , для чого розв'яжемо нерівність:

$$\frac{\Delta W_r}{\Delta W_o} = \frac{\lambda^2 - 1}{2(\lambda - 1)} = \frac{\lambda + 1}{2} > 1. \quad (29)$$

Після простих перетворень доводимо, що нерівність (29) є тотожною:

$$\lambda + 1 > 2, \quad \lambda > 1, \quad (30)$$

тобто справедливою при будь-яких параметрах (див. вираз (14)).

На рис. 2 показано графік залежності $\frac{\Delta W_r}{\Delta W_o}(k_R) = (\sqrt{1 + k_R} + 1)/2$, побудований на підставі формул (28) і (14),

який свідчить, що при розмагнічуванні АД за формулою (23) теплові втрати можна знизити у порівнянні зі стрибкоподібним зніманням потокоутворюючої складової струму статора. Ефективність оптимального керування зростає при підвищенні відношення опору ротора до опору статора і в області реальних параметрів становить від 12 до 37%.

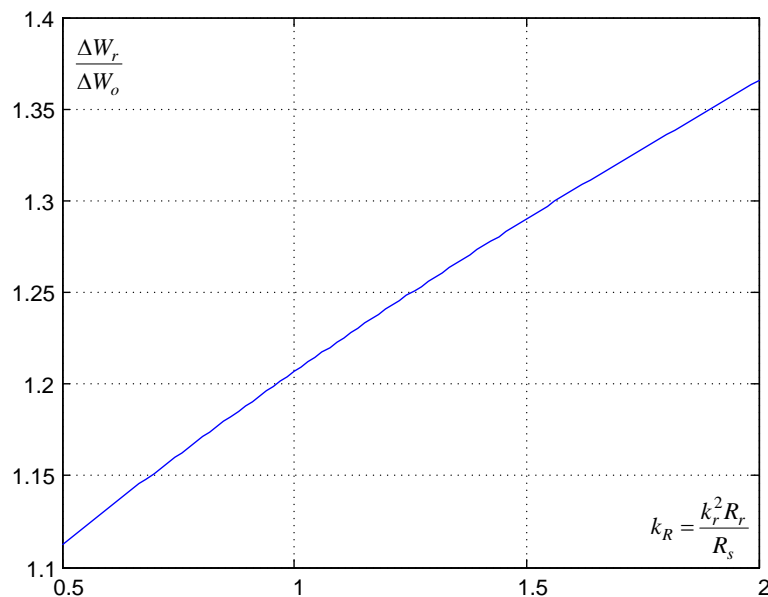


Рисунок 2 – Відношення теплових втрат на розмагнічування при стрибкоподібному зменшенні i_{sd} до 0 та при оптимальному керуванні від відношення активних опорів ротора і статора

Покажемо, що стала часу $T_o = \lambda T_r$ дійсно мінімізує теплові втрати при експоненціальному закону розмагнічування

$$\psi_r^{\text{розм}}(t) = \psi_{r0} e^{-\Omega t} = \psi_{r0} e^{-t/T}. \quad (30)$$

Для цього скористаємося формулою потужності втрат, узгодженою з (25)

$$\Delta W = \Delta W_c \left(\frac{T}{T_r} - 2 + \frac{\lambda^2 T_r}{T} \right) = \Delta W_c \left(\frac{\lambda T}{T_o} - 2 + \frac{\lambda T_o}{T} \right) = \Delta W_c \left(\lambda \bar{T} - 2 + \frac{\lambda}{\bar{T}} \right), \quad \bar{T} = \frac{T}{T_o}. \quad (31)$$

Змінюючи T в діапазоні від $T_r = T_o / \lambda$ до $2T_o$ при декількох значеннях коефіцієнта розподілення опорів k_R , через які розраховуються згідно з (14) відповідні значення λ , побудуємо за формулою (31) сімейства

залежностей $\frac{\Delta W}{\Delta W_c}(\bar{T})$, зображені на рис.3. Точки, позначені кружками, відображують втрати при $T = T_o$, а

точки, позначені квадратами, – втрати при $T = T_r$.

Аналіз отриманих графіків підтверджує наявність мінімуму втрат при зміні сталої часу експоненціального закону розмагнічування і правильність знаходження її оптимального значення.

При виборі одного з досліджуваного законів керування процесом розмагнічування треба враховувати, що при миттєвому зменшенні i_{sd} до 0 цей процес все ж таки протікає в λ раз скоріше і не супроводжується споживанням енергії із мережі.

Висновки. Як показали дослідження, використання запропонованого варіанту оптимального керування процесом розмагнічування векторно-керованого АД дозволяє мінімізувати теплові втрати в цьому режимі і зменшити їх на (12-37)% у порівнянні з миттєвим зменшенням до нуля потокуутворюючої складової струму статора. Предметом подальших досліджень може бути синтез оптимальних траєкторій з перемиканнями, який застосовують при необхідності врахування обмеження на керування і регульовані координати, та синтез оптимальних керувань процесом намагнічування. Зокрема, заслуговує на увагу узагальнення процесів формування лінійних та синус-гіперболічних траєкторій, запропонованих у [3].

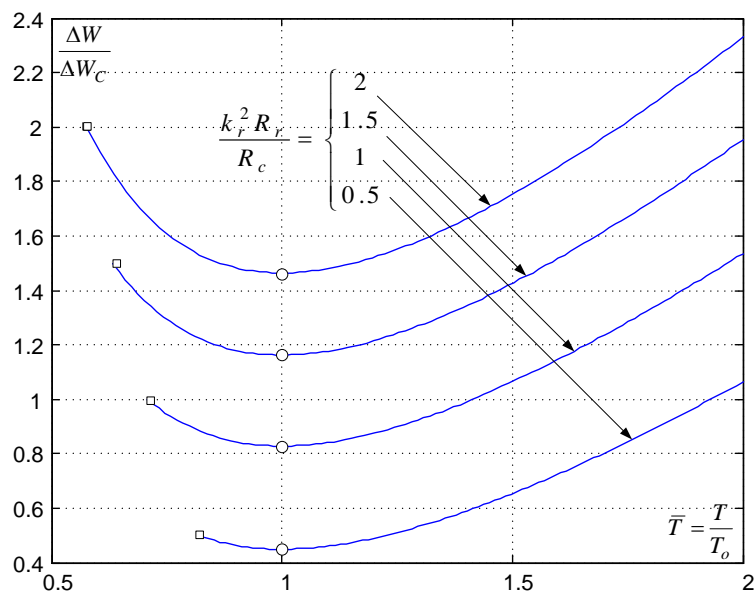


Рисунок 3 – Графіки залежностей теплових втрат від сталої часу експоненціального перехідного процесу розмагнічування

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

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. – Наукові праці ДонНТУ. – 2013. – С. 59-66.
4. Петров Ю.П. Вариационные методы теории оптимального управления / Ю.П. Петров. – Ленинград: Энергия, 1977. – 281с.

REFERENCES

1. Tolochko O. I. Energy consuming optimization for positioning electric drive with vector control of induction motor / O. I. Tolochko, P. I. Rozkaryaka, G. S. Chekavsky // Scientific works of Donetsk National Technical University. “Electrotechnique and power engineering”. – ed. 11 (186). – Donetsk: “DonNTU”, 2011. – p. 396-400.

2. Tolochko O. I. Control of processes of magnetization and demagnetization of induction motor in vector control systems / O. I. Tolochko, P. I. Rozkaryaka, G. S. Chekavsky, A. K. Zhuravel // Electromechanical and energy saving systems. Quarterly research-and-production magazine. – Kremenchuk: “KrTU”, 2011. – ed. 3/2011 (15). – p. 79-82.
3. Volkov V. A. Optimization of magnetization and demagnetization processes of frequency-controlled induction motor / V. A. Volkov // Electrotechnique and power engineering. – ed. 2. – Donetsk: Scientific works of DonNTU. – 2013. – p. 59-66.
4. Petrov U. P. Variation methods of optimal control theory / U. P. Petrov. – Leningrad: Energy, 1977. – 281 p.

Надійшла до редколегії 01.12.2015

Рецензент: С.М. Пересада

О.И.ТОЛОЧКО, А.В.МЕЛЬНИК
НТУУ «КПИ»

Минимизация тепловых потерь при размагничивании векторно-управляемого асинхронного двигателя. Для системы полеориентированного векторного управления асинхронным двигателем методом безусловной оптимизации Эйлера выведен закон изменения потокосцепления ротора неподвижного двигателя, обеспечивающий минимальные тепловые потери в обмотках двигателя. Выполнено сравнение оптимального управления процессом размагничивания с таким, которое достигается скачкообразным снижением потокообразующей составляющей тока статора до нуля.

Ключевые слова: *электропривод, асинхронный двигатель, векторное управление, размагничивание, оптимальное управление, минимизация тепловых потерь, энергоэффективность.*

O. TOLOCHKO, A. MELNIK

Heat losses minimization during demagnetization process in vector-controlled induction motor. Analysis of heat losses during demagnetization of motor windings has been done for induction machine in direct field-oriented control system. Euler's optimization method was used for solving the problem of finding the optimal in energy losses trajectory of rotor magnetic flux change for the process of demagnetization of motor windings. The exponential and step trajectories of rotor magnetic flux change were analysed. Plots of energy losses from the time-constant of exponential transient process show that it is possible to choose time-constant value that allows getting the minimum of energy losses for every certain relation between the rotor and stator resistances. This case can be achieved by choosing the time-constant equals to T_0 . Theoretical arguments and simulation results proved that exponential trajectory is the optimal in heat losses trajectory of rotor magnetic flux change during demagnetization of the motor, and the step change of rotor magnetic flux from its nominal value to zero is the optimal in processing speed trajectory.

Keywords: *electric drive, induction machine, windings demagnetization, optimal control, minimization of energy losses.*