

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ НАМАГНІЧУВАННЯ ТА РОЗМАГНІЧУВАННЯ ВЕКТОРНО-КЕРОВАНОВОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

О.І. Толочко*, докт. техн. наук; Д.В. Калугін**
НТУ України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»,
пр. Перемоги 37, м. Київ, 03056, Україна,
e-mail: tolochko.ola@gmail.com

Знайдено оптимальні сталі часу експоненціальних законів намагнічування та розмагнічування векторно-керованого асинхронного двигуна, що забезпечують мінімізацію теплових втрат від потокоутворюючих складових струмів статора і ротора, та наведено формули для розрахунку цих втрат. Виконано порівняння досліджуваних процесів за загально прийнятим та оптимальним керуванням за експоненціальним та лінійним законами методом математичного моделювання. Бібл. 9, рис. 2, табл. 1.

Ключові слова: асинхронний двигун, намагнічування, розмагнічування, оптимізація

Постановка проблеми. Відомо, що на теперешній час більш ніж 50% виробленої електроенергії споживається електроприводами. Тому зниження втрат потужності в електроприводах за рахунок оптимізації їхніх систем керування є актуальною проблемою, обговоренню якої присвячена багато джерел. Для прикладу можна ознайомитися з аналітичним оглядом [1], який стосується керування асинхронними двигунами (АД), та наведеними в ньому посиланнями.

Серед електричних приводів з високими вимогами до динаміки електроприводи постійного струму та системи векторного керування асинхронними двигунами виділяються загальною особливістю – наявністю двох каналів керування. Спочатку ці двигуни намагнічують у нерухомому стані (перший канал керування), а потім приводять їх до руху через канал управління електромагнітним моментом, швидкістю або кутовим положенням двигуна. Під час пауз повторно-короткочасного режиму двигуни, як правило, не розмагнічують, що призводить до додаткових втрат у міді. Тому проблема мінімізації втрат зазвичай вирішується для двигуна [2-4], що рухається, в усталених режимах, нехтуючи процесами регулювання магнітного потоку. Такий підхід є розумним для електроприводів постійного струму, в якому струм збудження, зазвичай, набагато менший, ніж струм якоря. Для асинхронних двигунів співвідношення струму холостого ходу, що створює магнітне поле, до номінального струму може перевищувати 60%. У цьому випадку знизити теплові втрати у двигуні можна за рахунок розмагнічування двигуна в нерухомому стані з подальшим його намагнічуванням перед наступним циклом руху. Регулювання потокозчеплення ротора здійснюють також за малим навантаженням двигуна, що рухається, задля збільшення його ККД. З наведеного аналізу виникає задача синтезу оптимального закону регулювання потокозчеплення ротора ψ_r^* з метою мінімізації сумарних втрат в обмотках статора і ротора АД на регулювання потокозчеплення.

У статті [5] запропоновано пошуковий підхід до вирішення цієї проблеми. Така оптимізація вимагає 5-7 тисяч ітерацій із симуляцією перехідного процесу, що виконується під час кожної з них. У роботі [6] представлено порівняння втрат в міді нерухомого АД у разі стрибкоподібної зміни ψ_r^* за різних обмежень $i_{sd} \geq i_{sd \max}$ на потокоутворюючу складову струму статора. У [7] здійснено спробу з визначення оптимального режиму керування потокозчепленням ротора нерухомого АД та порівняння втрат тепла у разі оптимального керування та більш простих (лінійний і стрибкоподібний) законах зміни потокозчеплення, але щодо виведення рівняння екстремалі методом Ейлера допущено помилку у визначенні сталої часу оптимального процесу. Внаслідок цього зроблено хибний висновок про те, що залежності втрат від часу керування «мають V-образний вигляд та явно виражений екстремум». У роботі [8] виправлено визначену вище помилку, отримано узагальнені рівняння та графіки залежності втрат за оптимального (синусгіперболічного) керування та знайдено оптимальні значення часів намагнічування і розмагнічування АД у разі лінійного закону зміни потокозчеплення ротора. У роботі [9] також виправлено помилки статті [7], знайдено оптимальний час керування потокозчеплення за лінійним законом та побудовано залежності втрат при синусгіперболічному та лінійному законах зміни потокозчеплення, знайдено оптимальні параметри параболічного закону.

Синусгіперболічний та параболічний закони зміни потокозчеплення ротора зручно використовувати тільки для нерухомого двигуна, коли завдання на усталене значення цієї координати залишається незмінним. Якщо ж завдання на потокозчеплення змінюється у функції електромагнітного моменту та/або швидкості задля оптимізації ККД двигуна, то найбільш зручними є лінійний та експоненціальний закони керування рівнем намагніченості, тому що вони реалізуються шляхом простого включення в канал керування потокозчепленням задатчика інтенсивності або аперіодичної ланки відповідно.

Метою роботи є визначення оптимальних параметрів експоненціальних законів розмагнічування та намагнічування, виведення аналітичних виразів для розрахунку мінімально можливих втрат в обмотках АД за умов експоненціального керування та порівняння їх із втратами у разі лінійного керування.

Матеріали і результати досліджень. Спрощену структурну схему системи полеорієнтованого векторного керування АД на зупиненому двигуні в обертовій ортогональній системі координат dq , орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора, наведено на рис. 1. У схемі використано такі позначення: РП – регулятор потокозчеплення; КРСd – замкнений контур регулювання d -складової струму статора; ψ_r^* , i_{sd}^* – сигнали завдання на потокозчеплення ротора та потокоутворюючу складову струму статора; $\tau_r = L_r / R_r$ – стала часу ротора; L_r , R_r – індуктивність та активний опір ротора; $k_r = L_m / L_r$ – коефіцієнт магнітного зв'язку ротора; τ_i , τ_ψ – сталі часу інтегрування розімкнених контурів струму та потокозчеплення відповідно.

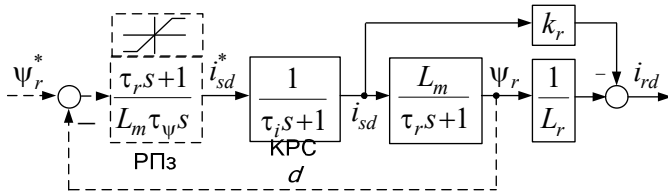


Рис. 1

За прямого керування (DFOC) система складається з контуру потокозчеплення і підпорядкованого йому контуру струму, а у випадку непрямого керування (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

$$\Delta W = \int_0^{t_f} \Delta P(t) dt = 3 \int_0^{t_f} [R_s I_s^2(t) + R_r I_r^2(t)] dt = \frac{3}{2} \int_0^{t_f} [R_s i_{sd}^2(t) + R_r i_{rd}^2(t)] dt, \quad (1)$$

де ΔP , ΔW – потужність та енергія втрат відповідно; t_f – час закінчення перехідного процесу; I_s , I_r – ефективні значення фазних струмів статора і ротора; i_{sd} , i_{rd} – потокоутворюючі складові струмів статора і ротора, які у разі нерухомого двигуна (за умов $i_{sq}=0$, $i_{rq}=0$) дорівнюють амплітудним значенням цих струмів, внаслідок чого $i_{sd} = \sqrt{2} I_s$, $i_{rd} = \sqrt{2} I_r$.

Щоб перейти від двох змінних у рівнянні (1) до однієї, виразимо струми статора та ротора через потокозчеплення ротора та його першу похідну

$$i_{sd}(t) = \frac{1}{L_m} [\psi_r(t) + \tau_r \psi_r'(t)], \quad i_{rd}(t) = \frac{1}{L_r} [\psi_r(t) - L_m i_{sd}(t)] = -\frac{\tau_r}{L_r} \psi_r'(t) = -\frac{\psi_r'(t)}{R_r}. \quad (2)$$

Після підстановки виразів (2) в рівняння (1) та здійснення деяких перетворень отримуємо

$$\Delta P = \frac{3R_s}{2L_m^2} [\psi_r^2 + 2\tau_r \psi_r \psi_r' + \tau_o^2 (\psi_r')^2], \quad \Delta W = \frac{3R_s}{2L_m^2} \int_0^{t_f} [\psi_r^2 + 2\tau_r \psi_r \psi_r' + \tau_o^2 (\psi_r')^2], \quad (3)$$

де

$$\tau_o = \lambda \tau_r, \quad \lambda = \sqrt{(R_s + k_r^2 R_r) / R_s} = \sqrt{1 + k_r^2 R_r / R_s} > 1. \quad (4)$$

Перехідні процеси розмагнічування та намагнічування за експоненціальним законом та їхні похідні описуються рівняннями

$$\psi_{r \text{ exp}}^{\text{розм}}(t) = \psi_{r0} e^{-\Omega_e t}, \quad \psi_{r \text{ exp}}^{\text{нам}}(t) = \psi_{r0} (1 - e^{-\Omega_e t}), \quad (\psi_{r \text{ exp}}^{\text{розм}})'(t) = -\Omega_e \psi_{r0} e^{-\Omega_e t}, \quad (\psi_{r \text{ exp}}^{\text{нам}})'(t) = \Omega_e \psi_{r0} e^{-\Omega_e t}, \quad (5)$$

де $\psi_{r0} = L_m i_{sd0}$ – потокозчеплення холостого ходу ротора; i_{sd0} – струм намагнічування; $\Omega_e = 1/\tau_e$, τ_e – стала часу експоненти.

Визначимо миттєві та інтегральні втрати для цих випадків підстановкою (5) у рівняння (3)

$$\Delta W_{\text{exp}}^{\text{розм}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{R_s \Psi_{r0}^2}{L_m^2} \cdot \left[1 - 2\tau_r \Omega_e + \tau_o^2 \Omega_e^2 \right] \int_0^\infty e^{-2\Omega_e t} = \frac{\Delta W_c}{2} \left[\frac{1}{\tau_r \Omega_e} - 2 + \lambda^2 \tau_r \Omega_e \right], \quad \Delta W_c = \frac{3}{2} \cdot \frac{R_s \Psi_{r0}^2 \tau_r}{L_m^2} = \frac{3}{2} R_s i_{sd0}^2 \tau_r; \quad (6)$$

$$\Delta W_{\text{exp}}^{\text{нам}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{R_s \Psi_{r0}^2}{L_m^2} \cdot \int_0^{4/\Omega_e} \left[1 + 2(\tau_r \Omega_e - 1)e^{-\Omega_e t} + (1 - 2\tau_r \Omega_e + \tau_o^2 \Omega_e^2)e^{-2\Omega_e t} \right] dt.$$

Після інтегрування останнього виразу і перетворень отримуємо

$$\Delta W_{\text{exp}}^{\text{нам}} = \frac{\Delta W_c}{2} \left[\frac{(5 + 4e^{-4} - e^{-8})}{\tau_r \Omega_e} + 2(1 - 2e^{-4} + e^{-8}) + \lambda^2 \tau_r \Omega_e (1 - e^{-8}) \right]. \quad (7)$$

Для визначення оптимальних сталих часу знаходимо похідні від енергії втрат і прирівнюємо їх до нуля. Після спрощень маємо

$$\Omega_{eopt}^{\text{розм}} = 1/\tau_o, \quad \tau_{eopt}^{\text{розм}} = \tau_o; \quad W_{\text{expopt}}^{\text{розм}} = \Delta W_c (\lambda - 1); \quad (8)$$

$$\tau_{eopt}^{\text{нам}} = \tau_o \sqrt{\frac{1 - e^{-8}}{5 + 4e^{-4} - e^{-8}}} \approx 0.44 \tau_o; \quad W_{\text{expopt}}^{\text{нам}} = \Delta W_c \left[\lambda \sqrt{(5 + 4e^{-4} - e^{-8})(1 - e^{-8})} + (1 - 2e^{-4} + e^{-8}) \right] \approx \Delta W_c (2.25\lambda + 0.96). \quad (9)$$

У типових системах векторного керування намагнічування і розмагнічування АД здійснюють за стрибкоподібної зміни сигналу i_{sd}^* . У цьому разі потокозчеплення ротора змінюється за експоненціальним законом зі сталою часу, що дорівнює електромагнітній сталій часу роторного кола τ_r

$$\Psi_{rer}^{\text{розм}}(t) = \Psi_{r0} e^{-t/\tau_r}, \quad \Psi_{rer}^{\text{нам}}(t) = \Psi_{r0} (1 - e^{-t/\tau_r}). \quad (10)$$

Після підстановки у (3) виразів (10) та їхніх похідних маємо

$$\Delta W_{er}^{\text{розм}} = \Delta W_c (\lambda^2 - 1)/2, \quad \Delta W_{er}^{\text{нам}} = \Delta W_c [7 + e^{-8} + \lambda^2 (1 - e^{-8})]/2 \approx \Delta W_c (\lambda^2 + 7)/2. \quad (11)$$

В роботі [9] таким же чином визначено оптимальні параметри лінійних законів намагнічування та розмагнічування

$$\Psi_{rlin}^{\text{розм}}(t) = \Psi_{r0} (1 - t/t_f), \quad \Psi_{rlin}^{\text{нам}}(t) = \Psi_{r0} t/t_f. \quad (12)$$

Залежності інтегральних втрат (3) для досліджуваного випадку (12) від часу керування запишуться як

$$\Delta W_{lin}^{\text{розм}} = \Delta W_c (\lambda \tau_o / t_f - 1 + \lambda t_f / (3\tau_o)), \quad \Delta W_{lin}^{\text{нам}} = \Delta W_c (\lambda \tau_o / t_f + 1 + \lambda t_f / (3\tau_o)), \quad (13)$$

а мінімум втрат досягається за умови

$$t_f = t_{fopt lin} = \sqrt{3} \cdot \lambda \tau_r = \sqrt{3} \tau_o. \quad (14)$$

Величини мінімізованих втрат складають

$$\Delta W_{lin min}^{\text{розм}} = \Delta W_c (2\lambda/\sqrt{3} - 1), \quad \Delta W_{lin min}^{\text{нам}} = \Delta W_c (2\lambda/\sqrt{3} + 1). \quad (15)$$

Для порівняння розглянутих способів керування потокозчепленням ротора на рис. 2 наведено відповідні графіки перехідних процесів розмагнічування (верхній рядок) та намагнічування (нижній рядок) в нерухомому стані двигуна з параметрами $P_n = 5$ кВт, $I_{sn} = 13,5$ А, $\Psi_{r0} = 1.01$ Вб, $i_{d0} = 11.88$ А, $R_s = 1,32$ Ом, $R_r = 2,34$ Ом, $L_m = 0,085$ Гн, $L_r = 0.0867$ Гн, $k_r = 0.98$, $\tau_r = 0.037$ с, $\lambda = 1.64$, $\tau_o = 0.061$ с, $\tau_i = 0,4$ мс, $\tau_\psi = 2\tau_i$, $\Delta W_c = 10.36$ Дж: а) загально прийняте експоненціальне керування; б) експоненціальне керування з оптимальною сталою часу; в) лінійне керування з оптимальною тривалістю процесів.

Формули для розрахунку втрат у представлених режимах та числові результати зведені у таблицю. Представлені графіки та дані таблиці підтверджують правильність знайдених аналітичних виразів. З порівняльного аналізу перехідних процесів видно, що у випадку розмагнічування найменші теплові втрати (3) забезпечуються за експоненціальним законом з оптимальним значенням сталої часу (8), а у разі намагнічування – за лінійним з оптимальною тривалістю перехідного процесу (14). Але якщо врахувати сумарні втрати щодо намагнічування та розмагнічування, то вони є мінімальними за лінійним законом керування потокозчепленням (для досліджуваного двигуна ці втрати виявляються у 1.5 рази менше, ніж у загальноприйнятому керуванні). Перевагою лінійного закону над експоненціальним з оптимальними параметрами є однакові значення параметрів під час розмагнічування та намагнічування.

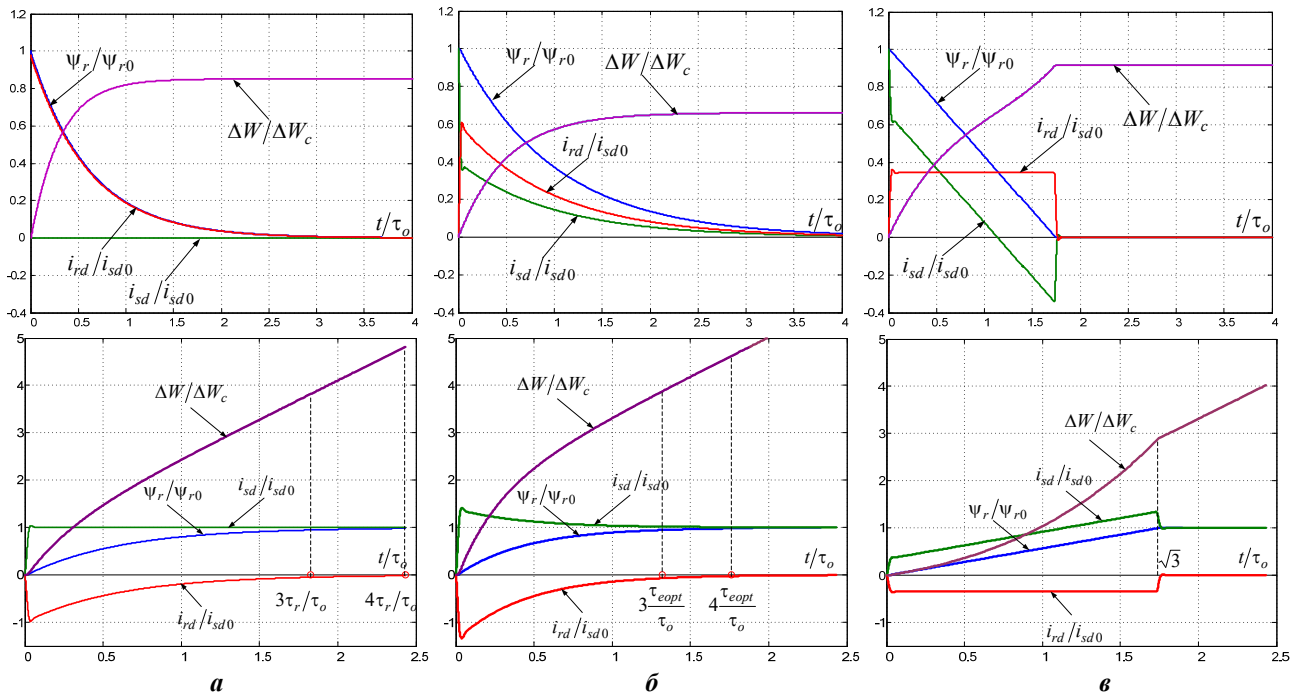


Рис. 2

Відносні втрати $\Delta W/\Delta W_c$			
Режим \ Закон	Експоненціальний, $\tau_e = \tau_r$	Експоненціальний $\tau_e = \tau_{opt}$	Лінійний $t_f = t_{f linopt}$
Розмагнічування	$(\lambda^2 - 1)/2 = 0.85$	$\lambda - 1 = 0.64$	$2\lambda/\sqrt{3} - 1 = 0.89$
Намагнічування	$(\lambda^2 + 7)/2 = 4.85$	$2.25\lambda + 0.96 = 4.65$	$2\lambda/\sqrt{3} + 1 = 2.89$
Разом	$\lambda^2 + 3 = 5.7$	$3.25\lambda - 0.04 = 5.29$	$4\lambda/\sqrt{3} = 3.78$

Висновки.

У роботі досліджено експоненціальний та лінійний закони керування потокозчепленням ротора з параметрами, що забезпечують мінімум теплових втрат у статорі та роторі від потокоутворюючих складових струмів векторно-керованого асинхронного двигуна. Щодо керування станом намагніченості нерухомого двигуна доцільно намагнічувати його за лінійним законом, а розмагнічувати – за експоненціальним з оптимальними параметрами. Але у разі керування цим процесом у випадку руху АД краще застосовувати лінійний закон, тому що, по-перше, він забезпечує менші втрати для намагнічування, які є значно більшими, ніж втрати під час розмагнічування, і, по-друге, оптимальні параметри лінійного закону є однаковими у випадках зменшення та збільшення потокозчеплення. Економічна ефективність оптимального керування потокозчепленням залежить від потужності електроприводу та режиму його роботи і потребує подальших досліджень.

1. Diachenko G.G., Aziukovskiy O.O. Review of methods for energy-efficiency improvement in induction machines. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. No 1. Pp. 80-88.
2. Borisevich A. Numerical method for power losses minimization of vector-controlled induction motor. *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*. 2015. Vol. 6. No 3. Pp. 486-497.
3. Seena T., Rinu A.K. Efficiency optimization with improved transient performance of indirect vector controlled induction motor drive. *International Journal of advanced research in electrical, electronics and instrumentation engineering*. 2013. Vol. 2. Pp. 374-385.
4. Blanuša B.D., Dokic B.L. Vukosavic S.N. Efficiency optimized control of high performance induction motor drive. *Electronics*. 2009. Vol. 13, No 2. Pp. 8-13.
5. Braslavsky I.A., Kostyliev A.V., Stepaniuk D.P. Optimization of Starting Process of the Frequency Controlled Induction Motor. 13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC-2008). Poznan, Poland, 2008. Pp. 1050-1053.

6. Tolochko O.I., Rozkaryaka P.I., Chekavskii G.S., Kuzhel A.K. Control of induction motor magnetization and demagnetization processes in field-oriented control systems. *Electromechanical and energy saving systems. Quarterly scientific and industrial journal*. 2011. Vol. 3(15). Pp. 79-82 (Rus).
7. Volkov V.A. Optimization of magnetization and demagnetization modes in frequency-controlled induction motor. *Electrotechnica and energetica. Scientific proceedings of DonNTU*. 2013. Vol. 2. Pp. 59-66 (Rus).
8. Tolochko O., Sopiha M. Heat loss minimization field control of motionless induction motors in pause of intermittent duty. IEEE First Ukraine Conference on *Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. Kyiv, Ukraine, 2017. Pp. 442-447.
9. Volkov V.A. Optimization of magnetization and demagnetization times of a stopped frequency-controlled induction motor. *Elekrotekhnika i elektrichestvo*. 2018. No. 4. Pp. 17-29 (Rus).
DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2018-4-2>

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ НАМАГНИЧИВАНИЯ И РАЗМАГНИЧИВАНИЯ ВЕКТОРНО-УПРАВЛЯЕМОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

О.И. Толочко, докт. техн. наук, **Д.В. Калугин**
НТУ Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского»,
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина,
e-mail: tolochko.ola@gmail.com

Найдены оптимальные постоянные времени экспоненциальных законов намагничивания и размагничивания векторно-управляемого асинхронного двигателя, при которых обеспечивается минимизация тепловых потерь от потокообразующих компонент токов статора и ротора, приведены формулы для расчета этих потерь. Выполнено сравнение исследуемых процессов при общепринятом и оптимальном управлении по экспоненциальному и линейному законам методом математического моделирования. Библ. 9, рис. 2, табл. 1.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, размагничивание, намагничивание, оптимизация.

OPTIMIZATION OF MAGNETIZATION AND DEMAGNETIZATION PROCESSES OF THE VECTOR CONTROLLED ASYNCHRONOUS MOTOR

O.I. Tolochko, D.V. Kaluhin
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
pr. Peremogy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine
e-mail: tolochko.ola@gmail.com

It was found the optimal time constants of the exponential laws of magnetization and demagnetization for induction motor with vector-control. It allows minimizing heat losses from field components of the stator and rotor currents. In addition, formulas for calculating these losses are found. Comparison of processes with standard and optimal control laws according to exponential and linear laws by the method of mathematical modeling is performed. References 9, figures 2, table 1.

Keywords: induction motor, demagnetization, magnetization, optimization.

Надійшла 28.02.2020
Остаточний варіант 17.04.2020