

ОГЛЯД СУЧАСНИХ МЕТОДІВ МІНІМІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВТРАТ В АСИНХРОНОМУ ДВИГУНІ

Калугін Д.В., студент, Толочко О.І., д.т.н., проф.

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

Вступ. На сьогодні сучасні екологічні проблеми все більш призводять до збільшення попиту на електроенергію, а обмеженість ресурсів стимулює людей до пошуку і впровадження способів підвищення енергоефективності сучасної електротехніки. Більше 50% всієї виробленої у світі електроенергії використовується електродвигунами, при чому близько 60% промислового навантаження становлять асинхронні двигуни [1]. Мінімізація втрат потужності в асинхронному двигуні досліджується вже понад 30 років і знаходить широке застосування [2]. Існуючі методи мінімізації втрат *LMT (Loss Minimization Techniques)* дотримуються трьох різних підходів в *online* режимі, та двох основних методів які відносяться до *offline* і обираються залежно від вимог до конкретної системи приводу [3]. Отже, аналіз та дослідження основних принципів побудови енергоефективних систем асинхронного електроприводу є актуальною проблемою.

Мета роботи. Метою роботи є аналіз існуючих законів мінімізації втрат в асинхронному двигуні, та вибір найбільш придатного із них з точки зору практичної реалізації.

Матеріали і результати досліджень. В загальному випадку усі алгоритми ділять на ті, що працюють у режимі реального часу (*online*) і ті, що працюють в автономному режимі (*offline*).

Offline методики умовно можна розділити на дві категорії:

- 1) *structural methods*, що використовують електромагнітний аналіз;
- 2) *factory-set methods*, який встановлює оптимальні налаштування з точки зору заздалегідь відомого режиму роботи, сигнали завдання [4].

Ці методи є доцільними, коли двигун працює в постійному режимі роботи, коли немає необхідності пристосовувати систему керування до зміни навантаження, температури та ін. Враховуючи те, що на сьогодні, сучасні асинхронні двигуни вже проектуються з максимальним ККД при номінальному навантаженні, ці методи не являють особливого інтересу [5].

Методи реального часу використовують зворотні зв'язки та інформацію про параметри двигуна, що дозволяє коригувати завдання на координати двигуна у такий спосіб, щоб досягти мінімізації втрат. *Online*–методи зазвичай вимагають, щоб потік, напруга, струм, момент та швидкість були контрольовані, що у свою чергу, обумовлює необхідність у їх вимірюванні. Загалом існує три категорії онлайн-технологій:

- 1) *model-based* – робота енергоефективного алгоритму базується на моделях втрат і тому в значній мірі залежить від параметрів двигуна та застосованої моделі втрат потужності;

2) *physics-based* – метод, що використовує вимірювання потужності і організовує пошук робочих точок мінімальних втрат ітераційними чисельними методами;

3) *hybrid* – метод який використовує як моделі втрат, так і їх вимірювання.

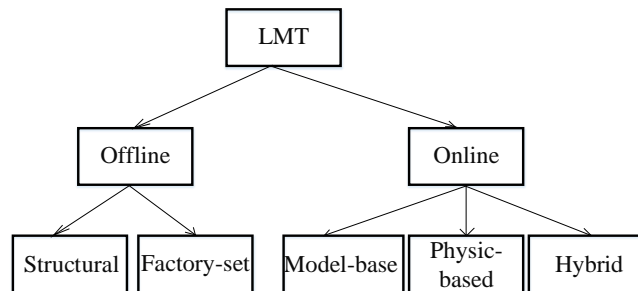


Рисунок 1 – Класифікація методів мінімізації втрат енергії

Методи, основані на моделях втрат, (*Loss Model-based Approach – LMBA*) базуються на трьох основних підходах по знаходженню оптимального потокозчеплення: з використанням схеми заміщення електричної машини, з контролем споживаної потужності та з використанням оптимальних пошукових алгоритмів (*Optimal state reference*). Основною перевагою цих методів є відносна простота реалізації, але деякі пошукові методи можуть вимагати додаткових обчислювальних пристроїв та додаткового обладнання. Однак при використанні *LMBA* є необхідність обов'язково знати точні значення параметрів двигуна, які можуть змінюватися з температурою, внаслідок ефекту насичення сталі і т. д., що значно ускладнює розв'язання поставленої задачі. При реалізації *LMBA* для розрахунку оптимальної траєкторії потокозчеплення часто застосовують динамічне програмування.

До методів, заснованих на вимірюванні втрат, належить *Power Measure based Approach – PMBA*. Цей підхід використовує оптимальний алгоритм пошуку потоку за рахунок контролю вимірюваної споживаної потужності приводу. Очевидно, що цей підхід не вимагає знання параметрів двигуна. Він є ефективним при тривалій роботі потужних двигунів в усталених режимах. Недоліком цього методу є складність пошукових алгоритмів, їх повільна збіжність, особливо при наявності коливань електромагнітного моменту, що може призводити до погіршення перехідних процесів у процесі роботи.

Також, одним із простих методів мінімізації електричних втрат у двигуні є метод МТА (*Maximum Torque pro Ampere*). Стратегія якого полягає у мінімізації електричних втрат у двигуні за рахунок зменшення статорного струму в залежності від навантаження двигуна. У відповідності до даної стратегії в системі векторного керування, підтримують рівність потокоутворюючої i_{sd} та моментотворюючої i_{sq} складової статорного струму, виходячи з умови забезпечення необхідного заданого моменту.

Якщо не враховувати ефект насичення сталі, то максимальне відношення моменту до амплітуди струму статора забезпечується при

$$\psi_{rMTA} = \sqrt{\frac{2TL_r}{3p}} = \sqrt{\frac{TL_m}{k_T}}, \quad (1)$$

де T – електромагнітний момент, p – кількість пар полюсів, L_m – взаємодуктивність ротора і статора, $k_T = \frac{3p}{2}$.

При цьому d - і q - складові струму статора, стають однаковими за амплітудою:

$$i_{sdMTA} = i_{sqMTA} = \sqrt{\frac{T}{k_T L_m}} \quad (2)$$

Цей метод додатково забезпечує мінімум втрат в міді статора.
Мінімум електричних втрат у міді статора і ротора

$$\Delta P_{\Sigma Cu} = \frac{3}{2} [R_s i_s^2 + R_r i_r^2] = \frac{3}{2} [R_s (i_{sd}^2 + i_{sq}^2) + R_r (i_{rd}^2 + i_{rq}^2)] \rightarrow \min, \quad (3)$$

де R_s, R_r – активні опори статора і ротора, знаходяться згідно з рівняннями

$$\psi_{r opt} = \sqrt{\frac{2TL_r}{3p}} \lambda, \quad i_{s dopt} = \sqrt{\frac{T}{k_T}} \lambda, \quad i_{s q opt} = \sqrt{\frac{T}{k_T}} \lambda, \quad \frac{i_{s dopt}}{i_{s q opt}} = \lambda, \quad (4)$$

де

$$\lambda = \sqrt{\frac{R_{sr}}{R_s}} = \sqrt{1 + \frac{k_r^2 R_r}{R_s}},$$

$k_r = \frac{L_m}{L_r}$ – коефіцієнт магнітного зв'язку ротора.

Таким чином, мінімізація втрат зводиться до знаходження оптимального потокозчеплення.

Тому розглянемо безпосередньо деякі з алгоритмів пошуку оптимальних значень потокозчеплення ротора (*Optimum flux algorithms*) у тривалих режимах роботи. До них належать: метод Розенброка (*Rosenbrock Method*), пропорційний (*Proportional Method*), знаходження градієнта (*Gradient Method*), та метод нечіткої логіки (*Fuzzy Logic*).

При використанні методу Розенброка потік ψ змінюється поступово за рекурентною формулою

$$\psi_{n+1} = \psi + k \Delta \psi_n; \quad \left\{ \begin{array}{ll} k = 1; & \text{якщо } \Delta P_n < 0 \\ k = -\frac{1}{2}; & \text{якщо } \Delta P_n > 0 \end{array} \right\}, \quad (5)$$

де $\Delta P_n = P_n - P_{n-1}$, $\Delta \psi_n = \psi_n - \psi_{n-1}$.

Згідно з (5), поки ми наближаємось до оптимального потоку ($\Delta P_n < 0$), ми продовжуємо рухатися в одному напрямку, а коли алгоритм виявляє, що ми віддаляємося від оптимального значення ($\Delta P_n > 0$), потік змінюється в іншому напрямку, доки не буде досягнута визначена точність оптимізації.

Цей метод є дуже простим і завжди збігається. Однак швидкість конвергенції може бути повільною [6]. Вона залежить від початкового потокозчеплення ψ_0 і константи k .

Процес пошуку оптимального потоку з використанням пропорційного методу може прискорити процес регулювання потокозчеплення, використовуючи не тільки знак різниці втрат потужності у двох сусідніх точках часу (5), але і модуль цього відхилення. Тоді рівняння (5) (метод Розенброка) замінюється рекурентним рівнянням

$$\psi_{n+1} = \psi_n - k\Delta P_n \text{sign}(\Delta \psi_n), \quad (6)$$

де k – додатне число.

Цей алгоритм має проблеми зі збіжністю та коливання, якщо k має постійне значення. Кращі результати отримані, якщо k нелінійно змінює своє значення в залежності від системних умов.

Метода знаходження градієнта ∇P_n , що базується на класичному методі пошуку напрямку градієнта вхідної потужності (6), який обчислюється за допомогою лінійного рівняння першого порядку

$$\psi_{n+1} = \psi_n - k\nabla P_n \quad (7)$$

Цей метод має проблеми щодо знаходження оптимального потокозчеплення за рахунок труднощів для отримання гарного початкового наближення градієнта.

Пошуковий алгоритм з використанням нечіткої логіки (*Search Method using Fuzzy Logic*) базується на нечіткому логічному керуванні, завдяки використанню евристичних правил для покращення швидкості збігу алгоритму і уникнення коливань навколо оптимального потокозчеплення. Цей підхід має безліч алгоритмів, які зазвичай, вибираються у відповідності до технологічного процесу.

Висновок. У цій роботі наведено огляд різних алгоритмів пошуку для підвищення енергоефективності роботи асинхронного двигуна на при роботі у тривалому режимі роботи. Кожен алгоритм має свої переваги та недоліки. Для того, щоб зробити висновки щодо доцільності застосування того чи іншого методу, треба виконати ретельні дослідження кожного з них методом математичного моделювання та перевірити їх працездатність на експериментальній установці.

Перелік посилань

1. Review of Methods for Real-Time Loss Minimization in Induction Machines, - IEEE. DEC.2010
2. M. N. Uddin and S. W. Nam, "New online loss-minimization-based control of an induction motor drive," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 23, no. 2, pp. 926–933, Mar. 2008.
3. S. M. Yang, "Loss-minimization control of vector-controlled induction motor drives," *J. Chin. Inst. Eng.*, vol. 26, no. 1, pp. 37–45, 2003.
4. I. Kioskeridis and N. Margaris, "Loss minimization in induction motor adjustable-speed drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 43, no. 1, pp. 226–231, Feb. 1996.
5. D. H. Clayton, S. D. Sudhoff, and G. F. Grater, "Electric ship drive and power system," in *Proc. Int. Power Modulator Symp.*, 2000, pp. 85–88.
6. P. Prempraneerach, J. Kirtley, C. Chryssostomidis, M. D. Triantafyllou, and G. E. Karniadakis "Stochastic modeling of integrated power system coupled to hydrodynamics in the all-electric ship," in *Proc. Int. Symp. Power Electron. Elect. Drives Autom. Motion*, 2008, pp. 563–568.

ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМИ ПІДПОРЯДКОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПОЛОЖЕННЯ

Березюк Є.Ю., магістрант, Толочко О.І., д.т.н., проф.

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

Вступ. При параметричному синтезі систем підпорядкованого регулювання зазвичай використовують спрощені умови модульного оптимуму, що породжують метод подвійних пропорцій, коли стала часу інтегрування кожного наступного контуру виявляється вдвічі більше сталої часу інтегрування попереднього контуру. Таке налаштування забезпечує невелике перерегулювання в перехідних функціях кожного контуру (5-8%).

Особливістю систем регулювання положення, які працюють в режимі позиціонування, є те, що для них іноді навіть така мала величина перерегулювання є неприпустимою. Зменшити перерегулювання в перехідній функції контуру положення без зміни налаштування внутрішніх контурів (швидкості і струму) можна тільки за рахунок збільшення сталої часу інтегрування зовнішнього контуру, що призводить до зниження його швидкодії.

Метою даної роботи є розробка методики синтезу системи регулювання положення, що забезпечує зниження перерегулювання її перехідної функції без зменшення швидкодії.

Матеріали і результати дослідження.

Для того, щоб система регулювання положення могла забезпечити задану точність позиціонування і високу якість перехідних процесів, систему можна будувати на базі електродвигуна постійного струму (ДПС) з незалежним