

11. Долгих А.В. Использование нейронных сетей при исследовании земной поверхности, обработанной подземными горными работами/ А.В. Долгих, Л.В. Долгих // Сборник научных трудов «Качество минерального сырья». Кривой Рог, 2014.; Издательство «Дионат» (ФЛ-П Чернявский Д.А.). – С. 387-392.
12. Долгих А.В. Преобразование маркшейдерских данных для моделирования нейросетевыми методами. / Гірничий вісник. – Кривий Ріг: КНУ. – 96, 2013. – С. 85-89.
13. С.В. Усанов, П.В. Кольцов, С.В. Белячков. Современные системы лазерного сканирования для мониторинга деформаций при открытых разработках. / «Маркшейдерия и недропользование. – М., Геомар Недра, №4 (96), 2018, 40с.
14. Панжин А.А. Результаты наблюдений за деформациями породных массивов методами спутниковой геодезии //Сборник трудов международной конференции « Геодинамика и напряженное состояние недр Земли». — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2001.
15. Григоренко А.Г. Измерение смещений оползней. – М.: Недра, 1988. – 144 с.

Рукопис подано до редакції 17.04.2018

УДК 621.382.333

І.А. КОЗАКЕВИЧ, І.В. КАСАТКІНА, кандидати техн. наук, Л.В. СРЬОМЕНКО, магістрант  
Криворізький національний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СИНХРОННОГО ДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ В ГІБРИДНИХ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ

**Мета.** Метою даної роботи є дослідження синхронних двигунів транспортних засобів з постійними магнітами при ослабленні магнітного потоку, визначення аналітичних залежностей для забезпечення максимального співвідношення між електромагнітним моментом та струмом при умові обмеження величин напруг та струмів статора, розробка системи керування, що забезпечить роботу двигуна при частоті обертання вищій за номінальну, а також синтез методу керування тяговим синхронним двигуном з постійними магнітами, що передбачав би одночасне керування з максимізацією співвідношення момент-струм та максимізацією коефіцієнта корисної дії без використання додаткових перемикачів у структурі системи керування.

**Методи дослідження.** Дослідження виконувалося з використанням загальних методів теорії автоматичного керування, методів теорії оптимального керування та методів дослідження нелінійних систем автоматичного керування, варіаційного та матричного обчислення, чисельних методів, методів математичного аналізу, математичного моделювання та лабораторно-стендових випробувань

**Наукова новизна.** Встановлені залежності між складовими вектору струму статора двигуна при роботі в зоні ослаблення магнітного поля та обмеженні величин струмів та напруг на номінальному рівні. Розроблена структура системи керування синхронним двигуном, що дозволяє реалізувати отримання максимального співвідношення між електромагнітним моментом та струмом статора двигуна, а також досягти високих показників якості керування при роботі з кутовою швидкістю вищою за номінальну.

**Практична значимість.** Здійснено теоретичне узагальнення й розв'язання актуальної науково-технічної задачі, що пов'язана з керуванням синхронним двигуном з постійними магнітами в зоні ослаблення магнітного поля. Було визначено, що найбільш суттєвими чинниками, що впливають на роботу двигуна у такому режимі є наявність обмеження напруги і струму на номінальному рівні. В той же час аналіз таких систем при одночасній дії двох обмежень, що мають різний фізичний зміст є складною задачею. Крім того, отримано залежності, що дозволяють аналітично описати область допустимих значень кутової швидкості двигуна та навантаження при роботі з ослабленням поля.

**Результати.** Розроблена система керування роботою синхронного двигуна з постійними магнітами в режимі ослаблення поля, що дозволяє застосовувати такі двигуни в гібридному електротранспорті.

**Ключові слова:** синхронний двигун, постійні магніти, струм статора, регулятор струму, кутова швидкість.

doi: 10.31721/2306-5435-2018-1-104-106-111

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами.** З позиції функціонування тягових електромеханічних систем існують дві основні вимоги: отримання високих значень моменту двигуна для підвищення показників прискорення транспортного засобу, а також мінімізація втрат у системі для отримання максимальної енергоефективності [1]. Вирішення цих питань досягається використанням тактики максимізації відношення момент-струм та використання методів керування з максимізацією коефіцієнта корисної дії. Проте, досі не доведено, який з цих підходів здатний у найбільшій мірі задовольнити вимоги тягових електроприводів. У роботі виконується розробка методу керування, що поєднує у собі підходи максимізації співвідношення момент-струм та максимізації коефіцієнту корисної дії в залежності від умов роботи приводу. Проте, в даному випадку не виконується жодного переключення між цими двома тактиками керування, оскільки це погіршило б динамічні показники якості керування та

ускладнило б структуру системи керування. Для низьких значень моменту завдання доцільно використовувати тактику керування, що є близькою до тактики з максимізацією співвідношення момент-струм, оскільки в даному випадку можна отримати більш високі динамічні показники якості керування. Для більш високих значень моменту завдання доцільно використовувати тактику з максимізацією коефіцієнту корисної дії, оскільки при цьому зростають втрати потужності і тому доцільно їх мінімізувати, щоб забезпечити мінімальне розрядження акумуляторної батареї.

**Аналіз досліджень і публікації.** Синхронні двигуни з постійними магнітами отримали широке розповсюдження у різних галузях промисловості, особливо у сфері гібридних електричних транспортних засобів [2]. Така їх популярність пояснюється високою щільністю потужності [3], можливістю роботи з постійною потужністю у широкому діапазоні швидкостей, високі динамічні показники при керуванні електромагнітним моментом. У наукових публікаціях представлено два основних підходи до підвищення показників енергоефективності приводів з синхронними двигунами з постійними магнітами: керування з максимізацією співвідношення момент-струм [4-5], а також керування з максимізацією коефіцієнта корисної дії [6-7]. Декілька варіантів структур систем керування з використанням тактики максимізації співвідношення момент-струм представлено у [8]. Такі системи орієнтуються на максимізацією електромагнітного моменту, створюваного двигуном, за відповідної величини статорного струму машини, тобто використання максимальної механічної потужності обертання електричної машини [9]. Проте, таке керування, як правило, здійснюється при нехтуванні втратами в сталі машини, але досить часто використовується в тягових електроприводах через те, що дозволяє мінімізувати втрати в міді машини, а також є легким в реалізації. Оскільки при цьому мінімізується величина струму статора двигуна для отримання необхідної величини моменту, це створює умови для використання силових перетворювачів меншої потужності, ніж у випадку використання інших методів керування, що призводить до зменшення собівартості такої електромеханічної системи.

Використання підходу з максимізацією коефіцієнта корисної дії передбачає мінімізацію втрат у двигуні при будь-якому електромагнітному моменті та кутовій швидкості. Існують варіанти структур, що використовують керування з максимізацією співвідношення момент-струм у перехідних процесах, а під час усталеного режиму роботу перемикається на керування з максимізацією коефіцієнту корисної дії, що дозволяє комбінувати переваги обох стратегій керування. Недоліком даного методу є виникнення додаткових перехідних процесів під час перемикання двох систем керування, а також необхідністю використання певних критеріїв для здійснення даного перемикання, які повинні відображати режим роботи електропривода. Для реальних тягових електроприводів ці недоліки можуть стати суттєвими перешкодами для реалізації.

**Постановка завдання.** Для досягнення поставленої мети, дослідження синхронного двигуна з постійними магнітами в режимі ослаблення поля, вирішувалися наступні задачі:

отримання залежності, що дозволить визначити область допустимої роботи синхронного двигуна з постійними магнітами при ослабленні магнітного потоку машини та визначити допустимі навантаження для кутових швидкостей, що є більшими за номінальну, при цьому виконуються обмеження струмів та напруг двигуна на номінальному рівні;

розробка структурної схеми системи керування, що дозволить досягнути більш високих показників якості керування;

підвищення ефективного використання електроенергії.

**Викладення матеріалу і результати.** Розглянемо керування синхронним двигуном з постійними магнітами з максимізацією коефіцієнта корисної дії. Структурна схема представлена на рис.1. Для цього виконаємо диференціювання виразу загальних втрат за складовою струму  $i_{d0}$  і прирівняємо отриманий вираз до нуля [10]

$$\begin{aligned} & \frac{9}{4} p^2 (L_d \omega_e^2 (R_s + R_c) (\psi_m + L_d i_{d0}) + R_c^2 R_s i_{d0}) (\psi_m + (L_d - L_q) i_{d0})^3 = \\ & = (\omega_e^2 L_q^2 (R_s + R_c) + R_c^2 R_s) (L_d - L_q) M^2. \end{aligned}$$

Розв'язання даного рівняння для заданих значень електромагнітного моменту  $M$  та кутової частоти обертання поля машини  $\omega_e$  дає можливість отримати значення складової струму  $i_{d0}$ , що мінімізує величину загальних електричних втрат потужності, тобто максимізує коефіцієнт корисної дії. Значення оптимальної величини  $i_{d0}$  знаходиться з виразу для електромагнітного моменту двигуна. Значення струмів  $i_d$  та  $i_q$  розраховуються, виходячи з параметрів схеми замі-

шення, базуючись на значеннях складових струму втрат в сталі машини. Отже, основними параметрами, що визначатимуть закон зміни складових струму статора при керуванні з максимізацією коефіцієнта корисної дії є величина активного опору втрат в сталі та кутова швидкість обертання поля машини.

Теорія керування синхронним двигуном з постійними магнітами (рис.1) з максимізацією співвідношення момент-струм базується на нехтуванні втратами в сталі машини, тобто приймається, що  $R_c \rightarrow \infty$  [11]. У такому випадку, паралельна ланка схеми заміщення, що моделює втрати в сталі, може вважатися розімкненою, а, отже  $i_d = i_{d0}$ ,  $i_q = i_{q0}$ .

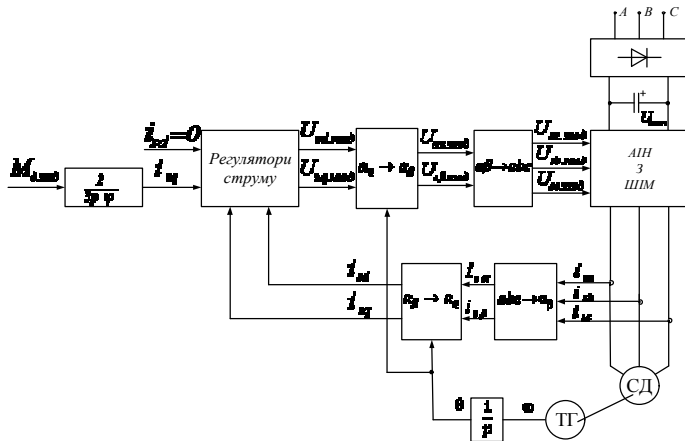


Рис. 1. Структурна схема системи керування синхронним двигуном з постійними магнітами

В подальшому виконано диференціювання виразу для електромагнітного моменту за струмом по вісі  $d$ , а потім прирівнюють отриманий диференціал до нуля. Це дає змогу визначити співвідношення між струмами по вісям  $d$  та  $q$ , що призведе до створення максимального електромагнітного моменту за необхідної величини струму статора  $i_{max}$

$$i_d = \frac{\Psi_m - \sqrt{\Psi_m^2 + 4(L_d - L_q)^2 i_q^2}}{2(L_q - L_d)},$$

$$i_q = \sqrt{i_{max}^2 - i_d^2}.$$

У режимі обмеження вихідної напруги інвертора регулятори струму не можуть відпрацювати сигнал завдання, виникає різниця напруг, що може бути записана так

$$\Delta u_d = u_d^* - u_d = u_d^* + \omega L_q i_q;$$

$$\Delta u_q = u_q^* - u_q = u_q^* + \omega L_d i_d - \omega \Psi.$$

Для виключення різниці напруг з вищенаведених рівнянь, введемо вагову функцію

$$F = 0,5(\Delta u_d^2 + \Delta u_q^2).$$

Модифіковані струми у синхронній системі відліку  $d-q$  можна записати так

$$\begin{pmatrix} \frac{di_{dm}}{dt} \\ \frac{di_{qm}}{dt} \end{pmatrix} = \alpha \cdot \nabla F,$$

де  $\alpha$  – параметр налаштування.

Гradient вагової функції може бути визначений так

$$\nabla F = \begin{pmatrix} \frac{\partial F}{\partial i_d} \\ \frac{\partial F}{\partial i_q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta u_d \frac{\partial \Delta u_d}{\partial i_d} + \Delta u_q \frac{\partial \Delta u_q}{\partial i_d} \\ \Delta u_d \frac{\partial \Delta u_d}{\partial i_q} + \Delta u_q \frac{\partial \Delta u_q}{\partial i_q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\omega L_d \Delta u_q \\ \omega L_q \Delta u_d \end{pmatrix}.$$

Підставивши gradient вагової функції, отримуємо

$$\begin{pmatrix} i_{dm} \\ i_{qm} \end{pmatrix} = \frac{\alpha}{s} \cdot \nabla F = \frac{\alpha}{s} \begin{pmatrix} -\omega L_d \Delta u_q \\ \omega L_q \Delta u_d \end{pmatrix}.$$

Для виключення дрейфу нуля, використано фільтр високої частоти

$$\begin{pmatrix} i_{dm} \\ i_{qm} \end{pmatrix} = \frac{\alpha}{s} \cdot \frac{s}{s + \omega_c} \cdot \nabla F = \frac{\alpha}{s + \omega_c} \begin{pmatrix} -\omega L_d \Delta u_q \\ \omega L_q \Delta u_d \end{pmatrix},$$

де  $\omega_c$  – кутова частота зрізу фільтра.

Таким чином, сигнали завдання контурів струму у синхронній системі відліку d-q можуть бути записані так

$$i_d^* = i_{dc}^* + i_{dm} = i_{dc}^* - \frac{\alpha}{s + \omega_c} \omega L_d \Delta u_q;$$

$$i_q^* = i_{qc}^* + i_{qm} = i_{qc}^* - \frac{\alpha}{s + \omega_c} \omega L_q \Delta u_d.$$

Вплив ПІ-регулятора по вісі  $q$  є негативним по відношенню до очікування системи, що може призводити до насичення регулятора і робить неможливим збереження відповідності між струмом завдання та реальною величиною струму. Таким чином, необхідно обмежувати вплив регулятора струму по вісі  $q$ . Струми у системі відліку  $d-q$  обмежуються струмовим колом, таким чином, що струм по вісі  $q$  може бути автоматично розрахований при відомій величині струму по вісі  $d$ . За умови використання блоків виключення перехресних зв'язків у системі керування, вихід струмових регуляторів може бути записаний так

$$u_d^* = \left( K_n + \frac{K_i}{s} \right) (i_d^* - i_d) - \omega L_q i_q;$$

$$u_q^* = \left( K_n + \frac{K_i}{s} \right) (i_q^* - i_q) - \omega L_d i_d + \omega \psi.$$

Тоді різниці напруг можуть бути записані так

$$\Delta u_d = \left( K_n + \frac{K_i}{s} \right) (i_d^* - i_d);$$

$$\Delta u_q = \left( K_n + \frac{K_i}{s} \right) (i_q^* - i_q);$$

Сигнал завдання струму по вісі  $d$

$$i_d^{**} = i_{dc}^* + i_{dm} = i_{dc}^* - \frac{\alpha}{s + \omega_c} \omega L_d \left( K_n + \frac{K_i}{s} \right) (i_d^* - i_d).$$

Введено наступні позначення

$$\omega_c = K_i / K_n; \quad \alpha = \frac{1}{\omega L_d}.$$

Тоді вирази для струмів завдання можна записати наступним чином

$$i_{dm} = \frac{K_n}{s} (i_q^* - i_q);$$

$$i_d^{**} = i_{dc}^* + i_{dm};$$

$$i_q^* = \text{sign}(i_s^*) \sqrt{i_s^{*2} + i_d^{**2}}.$$

Структура запропонованої системи керування представлена на рис.2.

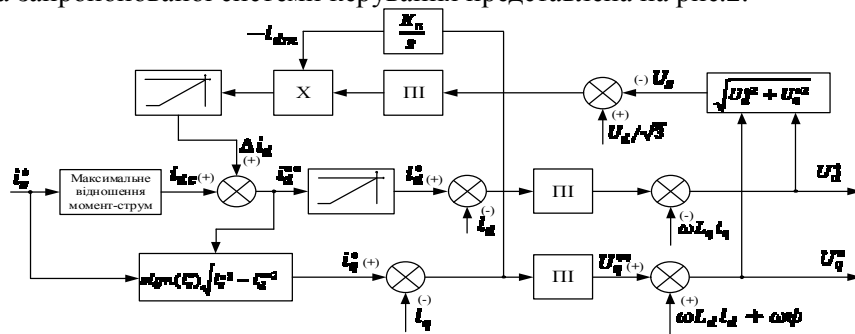
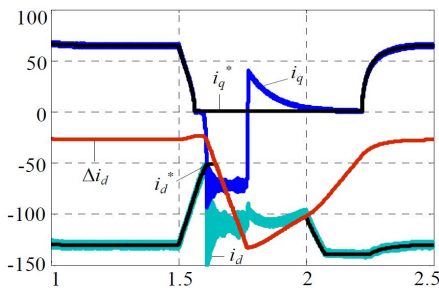
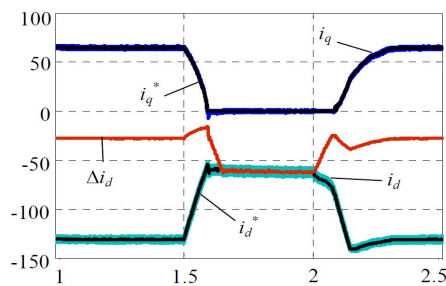


Рис. 2. Структура запропонованої системи керування

Результати моделювання представлені на рис. 3, 4.



**Рис. 3.** Робота синхронного двигуна в зоні ослаблення поля при класичній системі керування



**Рис.4.** Робота синхронного двигуна в зоні ослаблення поля при запропонованій системі керування

На рис. 3 представлено результати моделювання існуючої системи керування. В момент  $t=1,5$  с відбувається зміна рівня навантаження, що і відображається на зміні величини проекції струму статора  $i_q$ . Разом з тим, поведінка складової струму  $i_d$  значно відхиляється від відповідного сигналу завдання  $i_d^*$ , що затягує протікання динамічних процесів у системі. На рис.4 показано результати моделювання поведінки запропонованої системи керування. З них видно, що під час динамічних процесів відхилення складової струму  $i_d$  від її сигналу завдання  $i_d^*$  є мінімальним, а тривалість перехідного процесу значно скоротилася у порівнянні з попереднім варіантом.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Проведено теоретичне узагальнення й розв'язання актуальної науково-технічної задачі, що пов'язана з керуванням синхронним двигуном з постійними магнітами в зоні ослаблення магнітного поля. Було визначено, що найбільш суттєвими чинниками, що впливають на роботу двигуна у такому режимі є наявність обмеження напруги і струму на номінальному рівні. В той же час аналіз таких систем при одночасній дії двох обмежень, що мають різний

фізичний зміст є складною задачею. У роботі отримано залежності, що дозволяють аналітично описати область допустимих значень кутової швидкості двигуна та навантаження при роботі з ослабленням поля.

#### Список літератури

1. **Васьковський Ю. Н.** Моделирование режимов работы тягового синхронного двигателя с постоянными магнитами [Електронний ресурс] / Ю. Н. Васьковський, Ю. А. Гайденко, А. Е. Русятинський // Електротехніка і електромеханіка. - 2013. - № 5. - С. 19-22. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/elem\\_2013\\_5\\_6](http://nbuv.gov.ua/UJRN/elem_2013_5_6)
2. **Толочко О. І.** Визначення допустимої області застосування оптимальних алгоритмів керування синхронними двигунами з постійними магнітами [Електронний ресурс] / О. І. Толочко, Є. О. Вареник, В. В. Божко // Електротехнічні та комп'ютерні системи. - 2011. - № 3. - С. 72-74. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/etks\\_2011\\_3\\_24](http://nbuv.gov.ua/UJRN/etks_2011_3_24)
3. **Козакевич І. А.** Система бездатчикового векторного керування з використанням релейних регуляторів / І.А. Козакевич // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. Наукове видання. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 1/2015 (3). – С. 80-82.
4. **Щур І. З.** Застосування принципів пасивного керування до синхронної машини з постійними магнітами як Гамільтонової системи з керованими входами/виходами [Електронний ресурс] / І. З. Щур, Ю. О. Білецький // Електротехнічні та комп'ютерні системи. - 2011. - № 3. - С. 77-79. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/etks\\_2011\\_3\\_26](http://nbuv.gov.ua/UJRN/etks_2011_3_26)
5. **Shiva B. S.** Speed and parameter estimation of vector controlled permanent magnet synchronous motor drive / B. S. Shiva, V. Verma // 2nd International Conference on Power, Energy and Environment: Towards Smart Technology. – 2018. – P. 1-6.
6. **Сінолиций А. П.** Дослідження спостерігача Льюенбергера для бездатчикового векторного керування при роботі на низькій швидкості / А. П. Сінолиций, Ю. Г. Осадчук, І. А. Козакевич // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Вип. 03 (79). – 2011. – С. 38-39.
7. **Зарицкая Е. И.** Оптимизационный расчет тихоходного синхронного генератора на постоянных магнитах для безредукторных электрогенерирующих установок [Електронний ресурс] / Е. И. Зарицкая, Л. Н. Канов, А. М. Олейников // Проблеми техніки. - 2013. - № 2. - С. 103-118. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ptekh\\_2013\\_2\\_14](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ptekh_2013_2_14)
8. **Виштак Т. В.** Магнитное поле токов статорной обмотки синхронного двигателя с полым ротором [Електронний ресурс] / Т. В. Виштак, А. Н. Карлов, И. П. Кондратенко, А. П. Ращепкин // Технічна електродинаміка. - 2013. - № 5. - С. 41-46. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/TED\\_2013\\_5\\_9](http://nbuv.gov.ua/UJRN/TED_2013_5_9)
9. **Осадчук Ю. Г.** Алгоритм компенсації ефекту «мертвого часу» в трьохрівневих інверторах напруги / Ю. Г. Осадчук, І. О. Сінчук, І. А. Козакевич // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Вип. 1. – 2010. – С. 38-41.
10. **Zhou H.** An improved flux-weakening strategy for field-oriented-controlled PMSM drives / H. Zhou, X. Wen, F. Zhao, J. Zhang, J. Meng // IEEE 7<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference, 2012.
11. **Voyer N.** High frequency modelling of permanent magnet synchronous machine / N. Voyer, G. Bueno-Mariani, A. Besri, V. Quemener, Y. Okamoto, A. Satake // 8th International Electric Drives Production Conference. – 2018. – P. 1-6.

Рукопис подано до редакції 16.04.2018