

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

Божко Владислав Володимирович



УДК 681.5.013/62-503.56

**АНАЛІЗ І СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ
СИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ**

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Донецьк–2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
Толочко Ольга Іванівна, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», завідувач кафедри «Електропривод і автоматизація промислових установок», м. Донецьк.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Пересада Сергій Михайлович, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Автоматизація електромеханічних систем та електропривод», м. Київ;

доктор технічних наук, професор,
Чорний Олексій Петрович, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, директор Інституту електромеханіки, енергозбереження і систем управління, м. Кременчук.

Захист відбудеться «30» травня 2013 р. о 13¹⁵ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д11.052.02 ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» за адресою: Україна, 83001, Донецьк, вул. Артема, 58, 8-й навчальний корпус, аудиторія 210.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» за адресою: Україна, 83001, Донецьк, вул. Артема, 58, 2-й навчальний корпус.

Автореферат розісланий « » _____ 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д11.052.02, к.т.н., доц.



А.М. Ларін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У наш час гостро постає питання енергозбереження в світовому масштабі. Перспективним напрямком розв'язання цієї проблеми є підвищення ефективності споживання електроенергії, тобто зменшення її втрат. Відомо, що від 50% до 60% споживаної енергії приходить на живлення систем електропривода, енергоефективність яких в значній мірі залежить від типу електричного двигуна. В останні роки все більшого розповсюдження знаходять синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ), які характеризуються високими значеннями коефіцієнту корисної дії, коефіцієнту потужності та покращеними масогабаритними показниками. Даний тип машин отримав значний розвиток у зв'язку з прогресом в області магнітних матеріалів і напівпровідникової техніки. Їх потужність може варіюватися від ват до кількох сотень кіловат. Електропривод на базі СДПМ знаходить застосування в багатьох сферах життєдіяльності людини.

Отже, аналіз і синтез оптимальних за втратами електроенергії систем керування СДПМ з метою підвищення їх ефективності є актуальною задачею, розв'язання якої дозволить покращити енергетичні показники системи електропривода.

Для регулювання координат СДПМ найчастіше використовується система векторного керування. Дана система може використовуватися як основа для побудови систем керування оптимальних з точки зору енергоспоживання. Відомо, що за рахунок використання певних стратегій (алгоритмів), можливо оптимізувати бажані показники електропривода. До найбільш розповсюджених стратегій керування належать «Максимальний момент на ампер» (ММА), «Максимальний момент на вольт» (ММВ) і «Мінімізація сумарних втрат» (МСВ). Застосування перших двох дозволяє опосередковано зменшити теплові втрати в обмотках двигуна (втрати в міді) та частинах магнітної системи (втрати в сталі) за рахунок мінімізації струму та напруги статора відповідно. Їх використання найчастіше пов'язують з робочим діапазоном швидкості двигуна. Найбільшої ефективності системи електропривода можливо досягти за рахунок стратегії керування МСВ, яка дозволяє одночасно мінімізувати як втрати в міді, так і втрати в сталі.

Однак, більшість оптимальних систем керування, які спрямовані на підвищення енергоефективності, побудовані на основі моделі об'єкта регулювання, яка не враховує втрати в сталі, що знижує ефективність використання зазначених алгоритмів. У разі врахування цих втрат залежність між складовими струму статора, що відповідає умовам оптимізації, визначається у чисельному вигляді та закладається в алгоритм керування у вигляді таблиць. Такий підхід потребує виконання попередніх розрахунків для кожного двигуна та не дозволяє адаптувати цю залежність при зміні параметрів, що її визначають. Алгоритми керування можливо уніфікувати та зробити здібними до адаптації, якщо отримати закони оптимізації в аналітичній формі.

Відтак, питання аналізу та синтезу систем оптимального керування СДПМ ще потребують удосконалення.

Зв'язок роботи з програмами, планами, темами. Робота виконувалась у відповідності до держбюджетної теми Д4-04 «Оптимізація функціонування електромеханічних систем із цифровим регулюванням», № ДР 0107U003033; держбюджетної

теми Д2-10 «Оптимальне цифрове керування системами позиційного електропривода», № ДР 0110U001052; держбюджетної теми Н4-10 «Дослідження сучасних систем комплектного електропривода», в яких автор дисертації приймав участь у якості виконавця.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є покращення енергетичних показників системи електропривода на базі синхронного двигуна з постійними магнітами.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Проаналізувати вплив втрат в сталі на роботу загальновідомої системи векторного керування СДПМ.
2. Синтезувати систему на основі уточненої моделі об'єкту, що враховує втрати в сталі.
3. Розробити оптимальні стратегії керування СДПМ з урахуванням втрат в сталі.
4. Узагальнити отримані стратегії з метою їх уніфікації та зручності використання шляхом отримання аналітичних залежностей.
5. Синтезувати оптимальну систему керування з урахуванням існуючих обмежень на струм і напругу електропривода.
6. Перевірити запропоновані рішення шляхом експериментальних досліджень.

Об'єктом дослідження є електромеханічні, електромагнітні та енергетичні процеси в системах електропривода на основі синхронних двигунів з постійними магнітами.

Предметом дослідження є системи керування синхронними двигунами з постійними магнітами.

Методи дослідження. В основу досліджень покладені методи теорії оптимального керування для розробки алгоритмів керування СДПМ, методи теорії автоматичного керування та координатних перетворень при синтезі удосконаленої системи векторного керування, метод математичного моделювання для аналізу систем керування на математичних моделях, експериментальні дослідження для перевірки адекватності математичних моделей та результатів, одержаних аналітичними методами.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Удосконалено систему векторного керування СДПМ, шляхом регулювання складових не повного струму статора, а їх частин, які беруть участь у створенні електромагнітного моменту, що дозволило підвищити енергетичні показники системи електропривода.
2. Удосконалено методи оптимального керування СДПМ «Максимальний момент на ампер» і «Максимальний момент на вольт» шляхом урахування втрат в сталі, що дозволило підвищити ефективність оптимізації.
3. Вперше отримано аналітичний вираз залежності між частинами складових струмів статора, який забезпечує реалізацію стратегії керування «Мінімізація сумарних втрат» для СДПМ, що створює передумови до адаптації системи при зміні параметрів об'єкту керування.
4. Вперше доведено, що всі розглянуті алгоритми керування СДПМ можливо узагальнити, подавши їх у вигляді єдиного математичного виразу, в якому зміна одного параметра дозволяє обрати бажану стратегію оптимізації.

Практичне значення отриманих результатів:

Розроблено методику регулювання частин проєкцій складових струму статора СДПМ, що беруть участь у створенні електромагнітного моменту. Розроблено методику побудови оптимальних систем керування електроприводами на основі СДПМ, та визначено граничні рівні координат, що регулюються, при врахуванні існуючих обмежень на струм та напругу статора.

Основні результати дисертаційної роботи були передані Державному підприємству «Український науково-дослідний, проєктно-конструкторський та технологічний інститут вибухозахищеного та рудникового електрообладнання з дослідно-експериментальним виробництвом» (ДП «УкрНДІВЕ»), для використання при розробці систем керування СДПМ.

Основні положення роботи використовуються при викладанні лекційного матеріалу з дисциплін «Оптимальне керування позиційними електроприводами», «Системи керування електроприводами», «Автоматизація досліджень і проєктування електромеханічних систем», «Математичне моделювання електромеханічних систем», «Комплектні електроприводи і автоматизація технологічних комплексів», а також при виконанні лабораторних робіт з цих дисциплін. Програмно-апаратний лабораторний комплекс, який був створений при роботі над дисертацією, використовується при виконанні курсових, дипломних та магістерських робіт і проєктів та в науково-дослідній роботі студентів.

Особистий внесок здобувача: Основні наукові положення і результати, наведені в дисертації, отримані автором самостійно. Здобувач вирішив науково-прикладну задачу синтезу оптимальних систем керування синхронними двигунами з постійними магнітами, отримав уніфіковану стратегію керування та розробив систему керування при урахуванні присутніх обмежень на координати.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи та результати досліджень доповідалися та обговорювалися на: міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика», 20-25 вересня 2010 р., с.м.т. Кипарисне; міжнародній науково-технічній конференції «Керування режимами роботи об'єктів електричних та електромеханічних систем», 12-14 травня 2011 р., м. Святогірськ; міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» 12-17 вересня 2011 р., м. Одеса; VI-й міжнародній науково-практичній конференції «Донбас-2020: перспективи розвитку очима молодих вчених», 24-26 квітня 2012 р., м. Донецьк; міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» 17-22 вересня 2012 р., с.м.т. Миколаївка.

Публікації. За результатами виконаних у дисертаційній роботі досліджень, опубліковано 8 статей, всі в збірниках, які входять до фахових видань України.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації складає 174 сторінки, у тому числі 56 рисунків по тексту, 13 рисунків на окремих сторінках, 4 таблиці по тексту, список використаних джерел з 124 найменування на 15 сторінках, 5 додатків на 34 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Перший розділ «Аналітичний огляд літератури» присвячено теперішньому стану розвитку систем оптимального керування синхронними двигунами з постійними магнітами, а саме: наведено основні відомості про СДПМ, розглянуто можливі системи регулювання координат електропривода та проаналізовано існуючі стратегії керування, які спрямовані на мінімізацію втрат в двигуні.

Виявлено недоліки існуючих рішень та обґрунтовано задачі досліджень.

У **другому розділі** «Удосконалення системи полеорієнтованого керування синхронним двигуном з постійними магнітами при врахуванні втрат в сталі» проаналізовано роботу традиційної системи векторного керування та запропоновано спосіб усунення виявлених недоліків.

Найбільш поширеним математичним описом синхронних двигунів з постійними магнітами є опис в ортогональній системі координат, орієнтованій за потоком ротора (d, q). Схеми заміщення за каналами d і q з урахуванням втрат у міді та в сталі наведено на рис. 1.

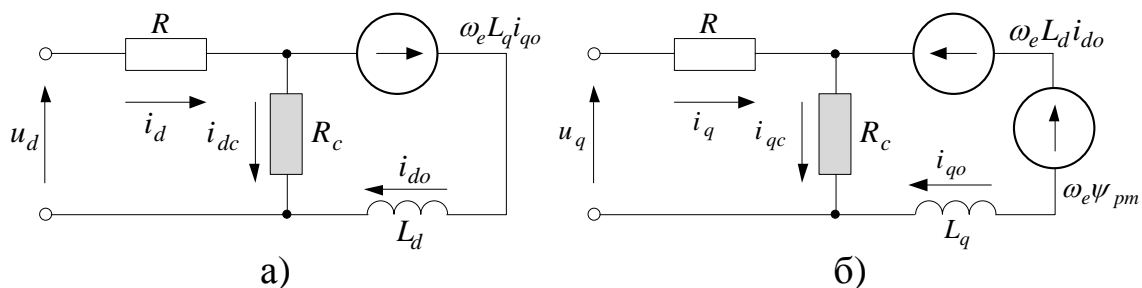


Рис. 1. Схеми заміщення СДПМ за каналами d (а) і q (б)

На рис.1 прийняті такі позначення: u_d, u_q, i_d, i_q – проекції напруги і повного струму статора на осі d і q ; L_d, L_q – поздовжня і поперечна індуктивності статора; R, R_c – активний опір статора і опір, що характеризує втрати в сталі; i_{do}, i_{qo} – частини ортогональних складових струму статора, які створюють магнітний потік; i_{dc}, i_{qc} – частини складових струму статора, які імітують втрати в сталі; $\omega_e = Z_p \omega$ – електрична кутова частота ротора; Z_p – кількість пар полюсів; ω – механічна кутова швидкість ротора; ψ_{pm} – потік постійних магнітів.

Дані схеми заміщення відрізняються від загальноприйнятих наявністю додаткового опору, моделюючого втрати в сталі. Введення цього опору паралельно потокоутворюючому контуру призводить до розділення проекцій струму статора на дві частини. Одна частина йде на створення потоку, а інша – на втрати в сталі.

Математичний опис, отриманий за схемами заміщення, наведеними на рис. 1, має вигляд:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) & -\omega_e L_q \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) \\ \omega_e L_d \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) & R + pL_q \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{do} \\ i_{qo} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \psi_{pm} \left(1 + \frac{R}{R_c}\right) \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + p \frac{L_d}{R_c} & -\frac{\omega_e L_q}{R_c} \\ \frac{\omega_e L_d}{R_c} & 1 + p \frac{L_q}{R_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{do} \\ i_{qo} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\omega_e \psi_{pm}}{R_c} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

У загальному випадку вираз для електромагнітного моменту містить дві складові: момент від постійних магнітів та реактивний момент, і може бути записаний у вигляді:

$$M = M_{nm} + M_p = \frac{3}{2} Z_p \psi_{pm} i_{qo} + \frac{3}{2} Z_p (L_d - L_q) i_{do} i_{qo}, \quad (3)$$

де M – електромагнітний момент; M_{nm} , M_p – складові електромагнітного моменту, зумовлені наявністю постійних магнітів і електромагнітною асиметрією, відповідно.

Виявлено, що при використанні традиційної системи векторного керування за наявності суттєвих втрат в сталі електромагнітний момент не підтримується на заданому рівні, причому зі збільшенням швидкості, похибка відпрацювання потрібного моменту збільшується (рис. 2).

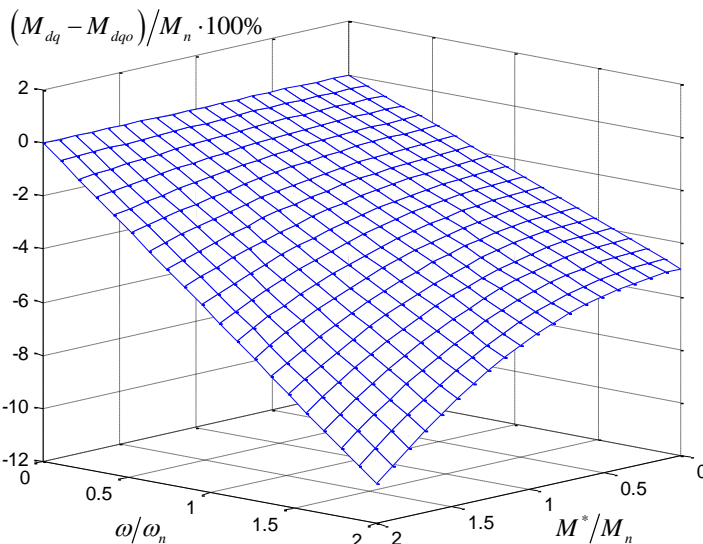


Рис. 2. Похибка відпрацювання заданого моменту при класичному способі регулювання

Основним фактором, який зумовлює зменшення електромагнітного моменту, є те, що регулювання складових i_d, i_q (традиційна система) не є рівноцінним регулюванню складових i_{do}, i_{qo} , які беруть участь у створенні моменту (див. (3)). Причому поряд зі зниженням частини поперечної складової струму i_{qo} , що безпосередньо призводить до зниження електромагнітного моменту, частина поздовжньої складової i_{do} збільшується в додатному напрямку, а це, в свою чергу, створює реактивну складову моменту, яка спрямована назустріч складовій від постійних магнітів.

Отже виходячи з аналізу основних чинників виявленого недоліку більш доцільно перейти від регулювання повних складових струму статора до регулювання їх частин, які безпосередньо приймають участь у створенні електромагнітного моменту.

Також показано, що при роботі від задатчика інтенсивності обидві системи забезпечують потрібний момент, однак у класичному варіанті це пов'язано з підвищенням втрат в двигуні.

Третій розділ «Вдосконалення стратегій оптимального керування синхронним двигуном з постійними магнітами» присвячено аналізу та синтезу стратегій керування при врахуванні в моделі об'єкту, як втрат в міді, так і втрат в сталі.

Виходячи з виразу електромагнітного моменту СДПМ (3), останній визначається частинами двох складових струму статора. Отже, одне і те ж значення може бути отримано з різних їх комбінацій. Тому i_{do} та i_{qo} можуть бути вибрані у такий спосіб, щоб поряд із забезпеченням необхідного електромагнітного моменту досяглося виконання ще й критерію оптимальності. У цьому випадку буде досягнута однозначність, тобто тільки одна пара значень частин проекцій струму статора забезпечить водночас формування необхідного електромагнітного моменту та виконання обраного критерію оптимальності. Причому, вважаючи на те, що i_{qo} приймає участь у створенні складової від постійних магнітів та реактивної складової електромагнітного моменту (див. (3)), то потрібне значення останнього доцільно забезпечувати саме за її рахунок. В цьому випадку досягнення критерію оптимальності буде виконуватись шляхом зміни частини поздовжньої складової струму статора, а необхідне значення електромагнітного моменту є обмежуючою умовою при знаходженні екстремуму цільової функції.

При виборі цільової функції, мінімізація якої забезпечила би підвищення енергоефективності електропривода, можна виділити два підходи: непряма та пряма мінімізація втрат в СДПМ.

Непрямий підхід забезпечує мінімізацію значення певної змінної системи, від якої залежить той чи інший тип втрат. При цьому робиться припущення про те, що досягнення мінімуму цієї змінної одночасно забезпечує і мінімізацію відповідного типу втрат. Наприклад, відомо, що втрати в міді

$$\Delta P_{Cu} = \frac{3}{2} I^2 R = \frac{3}{2} (i_d^2 + i_q^2) R = \frac{3}{2} \left((i_{do} + i_{dc})^2 + (i_{qo} + i_{dc})^2 \right) R \quad (4)$$

пропорційні квадрату повного струму статора, тоді його мінімізація (стратегія керування «Максимум моменту на ампер» (ММА)) повинна привести до мінімізації цих втрат. Аналогічна ситуація і з втратами в сталі

$$\Delta P_{Fe} = \frac{3}{2} \frac{u_o^2}{R_c} = \frac{3}{2} \frac{(\omega_e L_q i_{qo})^2}{R_c} + \frac{3}{2} \frac{(\omega_e (L_d i_{do} + \psi_{pm}))^2}{R_c}, \quad (5)$$

які залежать від квадрату напруги, що підводиться до статора (стратегія керування «Максимум моменту на вольт» (ММВ)). Дані алгоритми керування набули великого

поширення, однак при їх синтезі не враховувались втрати в сталі. Також, як доведено в роботі, не завжди мінімізація обраної змінної призводить до мінімізації бажаного типу втрат.

Прямий підхід полягає в тому, що в якості цільової функції обираються безпосередньо вирази, що характеризують складові втрат (4), (5). Однак, у випадку мінімізації складових втрат (стратегії керування «Мінімум втрат в міді» (МВМ), «Мінімум втрат в сталі» (МВС)), використання тієї чи іншої стратегії в основному пов'язано з певними режимами роботи, а саме – діапазоном регулювання швидкості. Більший інтерес представляє мінімізація сумарних втрат («Мінімум сумарних втрат» (МСВ)), що дозволить забезпечити найбільшу ефективність системи електропривода.

Для реалізації розглянутих стратегій керування знайдено мінімуми відповідних цільових функцій за допомогою методу множників Лагранжа. В результаті отримано залежності між частинами складових струму статора, що дозволяють синтезувати оптимальні алгоритми керування. Аналіз знайдених аналітичних виразів показав, що всі вони мають однакову структуру, а відмінність полягає в різних значеннях еквівалентного опору R_e .

Таким чином, вираз, що дозволить узагальнити всі наведені стратегії оптимального керування СДПМ приймає наступний вигляд

$$i_{do} = -\frac{\psi_{pm}}{2(L_d - L_q)} \left(2 - \frac{R_e^2 + \omega_e^2 L_d L_q}{R_e^2 + \omega_e^2 L_d^2} \right) - \sqrt{\frac{\psi_{pm}^2}{4(L_d - L_q)^2} \left(\frac{R_e^2 + \omega_e^2 L_d L_q}{R_e^2 + \omega_e^2 L_d^2} \right)^2 + i_{qo}^2 \frac{R_e^2 + \omega_e^2 L_q^2}{R_e^2 + \omega_e^2 L_d^2}} \quad (6)$$

Таблиця 1

Значення еквівалентного опору в залежності від бажаної стратегії керування

Бажана стратегія	Максимум моменту на ампер (ММА)	Максимум моменту на вольт (ММВ)	Мінімум втрат в міді (МВМ)	Мінімум втрат в сталі (МВС)	Мінімум сумарних втрат (МСВ)
R_e	R_c	$\frac{R_c R}{R_c + R}$	R_c	0	$R_c \sqrt{\frac{R}{R_c + R}}$

Вираз (6) отримано для СДПМ з магнітами, встановленими всередині ротора, якому відповідає найбільш загальний математичним опис серед синхронних двигунів без електричного збудження. Отже, з (6) можна отримати більш прості частинні випадки уніфікованих залежностей, що дозволяють реалізувати систему оптимального керування для СДПМ з магнітами, встановленими на поверхні ротора ($L_d = L_q = L_s$):

$$i_{do} = -\frac{\psi_{pm} L_s}{R_e^2 + \omega_e^2 L_s^2}$$

і синхронного реактивного двигуна ($\psi_{pm} = 0$):

$$i_{do} = -i_{qo} \sqrt{\frac{R_e^2 + \omega_e^2 L_q^2}{R_e^2 + \omega_e^2 L_d^2}}$$

Також з табл. 1 можна побачити, що в загальному випадку ММВ та МВС це різні алгоритми керування.

На рис. 3 приведено залежності втрат СДПМ від робочої швидкості при номінальному навантаженні у випадку використання різних стратегій керування.

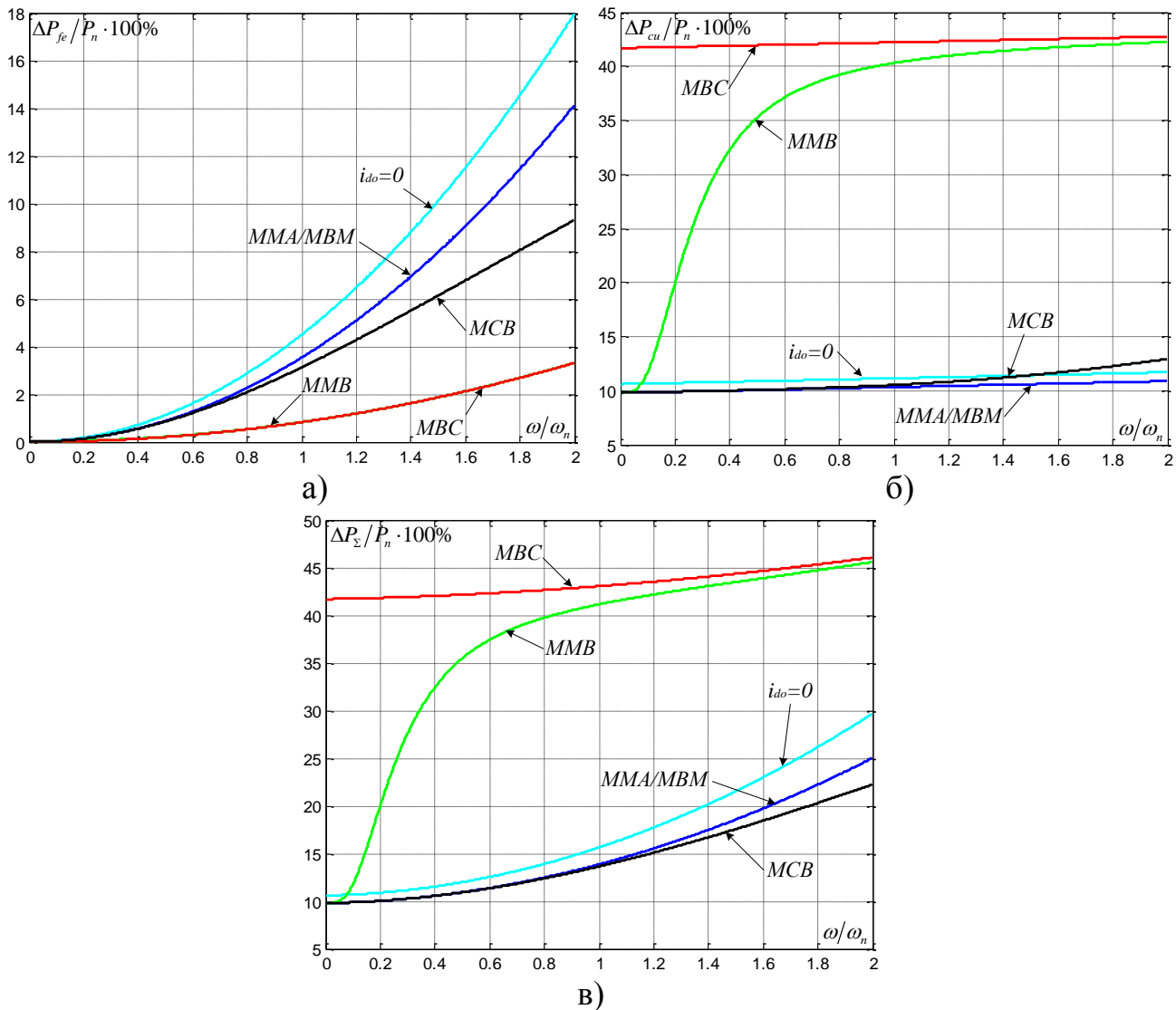


Рис. 3. Втрати сталі (а), міді (б) і сумарні втрати (в) в СДПМ при різних стратегіях керування в залежності від швидкості двигуна

З рис. 3б видно, що мінімальних втрат в сталі можна досягти, як за рахунок використання алгоритму керування МВС, так і за рахунок ММВ. Однак використан-

ня ММВ в діапазоні швидкостей нижчих за номінальну дозволяє, поряд із мінімізацією втрат в сталі, значно знизити сумарні втрати (рис. 3в).

Також з наведених залежностей можна побачити, що стратегії керування ММА/МВМ та МСВ забезпечують близькі характеристики при швидкостях нижче за номінальну. Однак при збільшенні робочої швидкості різниця між цими алгоритмами керування стає більш вагомим внаслідок збільшення втрат в сталі.

Слід відзначити, що використання стратегій керування ММВ і МВС, порівняно з ММА/МВМ і МСВ, призводить до суттєвого зниження ККД системи керування при швидкостях нижче за номінальну.

Як показали дослідження, використання оптимальних алгоритмів керування не впливає на динамічні характеристики системи векторного керування при недосягненні фізичних обмежень на координати електропривода.

Відомо, що в системі електропривода існують фізичні обмеження на електричні координати. Так максимальна напруга статора обмежена максимальною вихідною напругою інвертора

$$U = \sqrt{u_d^2 + u_q^2} = \sqrt{\left(Ri_{do} - \omega_e L_q i_{qo} \left(1 + \frac{R}{R_c} \right) \right)^2 + \left(Ri_{qo} + \omega_e (L_d i_{do} + \psi_{pm}) \left(1 + \frac{R}{R_c} \right) \right)^2} \leq \frac{U_{dc}}{\sqrt{3}}, \quad (7)$$

а максимальний рівень обмеження струму визначається мінімальним значенням з допустимих струмів двигуна та перетворювача

$$I = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} = \sqrt{\left(i_{do} - \frac{\omega_e L_q i_{qo}}{R_c} \right)^2 + \left(i_{qo} + \frac{\omega_e (L_d i_{do} + \psi_{pm})}{R_c} \right)^2} \leq \min(I_{\max Д}, I_{\max ПЧ}). \quad (8)$$

При отриманні залежностей між частинами складових струму статора, що дозволяють реалізувати оптимальні стратегії керування, дані обмеження не бралися до уваги. Таким чином, за певних умов може виникнути ситуація, коли для забезпечення того чи іншого критерію оптимальності при заданому моменті буде вимагатися значення струму і/або напруги, що перевищують максимальні межі.

Для виключення такого режиму роботи, можуть бути запропоновані два варіанти. У першому випадку при отриманні стратегій керування необхідно врахувати зазначені обмеження, що призведе до значного ускладнення результуючих виразів або унеможливить їх знаходження. Другий варіант полягає у визначенні граничних рівнів сигналів завдання i_{do}^* та i_{qo}^* .

Якщо знехтувати втратами в міді ($R = 0$) і втратами в сталі ($R_c = \infty$) та за умови (7), із (1) та (2) випливає що

$$\omega = \frac{U}{Z_p \sqrt{(L_q i_q)^2 + (L_d i_d + \psi_{pm})^2}}. \quad (9)$$

Як можна бачити з (9), регулювання швидкості СДПМ можливо, як за рахунок зміни напруги, що підводиться до статора, так і за рахунок зміни струму статора. Причому при повній компенсації потоку від постійних магнітів і відсутності навантаження, теоретично можлива швидкість дорівнює нескінченності.

У разі досягнення обмеження за напругою, більше значення швидкості може бути одержано за рахунок збільшення частини поздовжньої складової струму статора i_{do} у від'ємному напрямку. Для того щоб не перевищити обмеження за напругою величина i_{do} повинна бути менше деякого значення, яке може бути знайдено з (7) за умови $U = U_{\lim}$, звідки:

$$i_{do \max} = -\frac{\omega_e^2 L_d \psi_{pm} + R_e \omega_e (L_d - L_q) i_{qo}^*}{R_e^2 + \omega_e^2 L_d^2} + \sqrt{\frac{R_e^2}{R_e^2 + \omega_e^2 L_d^2} \left(\frac{U_{\lim}}{R}\right)^2 - \left(\frac{R_e \omega_e \psi_{pm} + (R_e^2 + \omega_e^2 L_d L_q) i_{qo}^*}{R_e^2 + \omega_e^2 L_d^2}\right)^2}, \quad (10)$$

де $R_e = R \cdot R_c / (R + R_c)$, що відповідає стратегії керування ММВ.

Найменше значення поздовжньої складової струму доцільно обмежити на рівні, відповідному ММВ, тобто:

$$i_{do \min} = i_{do \text{ ММВ}}. \quad (11)$$

В свою чергу, збільшення частини поздовжньої складової у від'ємному напрямку призведе до збільшення повного струму статора. Щоб уникнути перевищення допустимого рівня, значення складової i_{qo} не повинно перевищувати величини

$$i_{qo \max I} = -\frac{R_e \omega_e (\psi_{pm} + (L_d - L_q) i_{do})}{R_e^2 + \omega_e^2 L_q^2} + \sqrt{\frac{R_e^2}{R_e^2 + \omega_e^2 L_q^2} I_{\lim}^2 - \left(\frac{\omega_e^2 L_q \psi_{pm} + (R_e^2 + \omega_e^2 L_d L_q) i_{do}}{R_e^2 + \omega_e^2 L_q^2}\right)^2}, \quad (12)$$

яка отримана з (8) за умови $I = I_{\lim}$. При цьому $R_e = R_c$, що відповідає стратегії керування ММА/МВМ.

У випадку роботи на швидкостях, які значно перевищують номінальну, за умови досягнення частиною поздовжньої складової i_{do} своєї нижньої межі (11), подальше збільшення швидкості можливо лише за рахунок зменшення поперечної

складової струму статора. В даному разі максимальне значення i_{qo} може бути знайдено з (7) за умови $U = U_{lim}$:

$$i_{qo \max U} = - \frac{R_e \omega_e (\psi_{pm} + (L_d - L_q) i_{do})}{R_e^2 + \omega_e^2 L_q^2} + \sqrt{\frac{R_e^2}{R_e^2 + \omega_e^2 L_q^2} \left(\frac{U_{lim}}{R} \right)^2 - \left(\frac{\omega_e^2 L_q \psi_{pm} + (R_e^2 + \omega_e^2 L_d L_q) i_{do}}{R_e^2 + \omega_e^2 L_q^2} \right)^2}, \quad (13)$$

де $R_e = R \cdot R_c / (R + R_c)$ відповідає алгоритму керування ММВ.

Результуючим обмеженням струму i_{qo} слід вибрати найменше з (12) і (13).

Функціональна схема розробленої системи оптимального керування СДПМ з урахуванням фізичних обмежень на струм і напругу статора наведена на рис. 4.

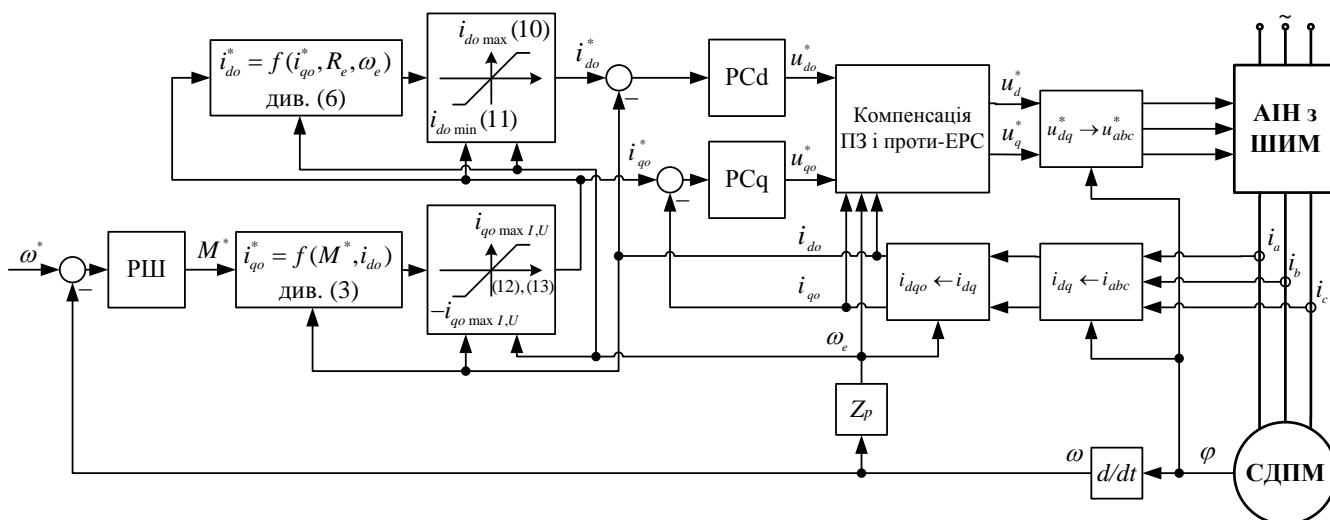


Рис. 4. Функціональна схема системи оптимального керування СДПМ

Для аналізу роботи системи за умови обмежень максимальні значення допустимого струму та напруги були штучно знижені. Досліджувалися режими розгону від задатчика інтенсивності та робота на сталій швидкості, що дорівнює двом номіналам, при постійному моменті статичного опору, який дорівнює 50% номінального.

Перехідні процеси в системі при використанні стратегії керування МСВ наведено на рис. 5, 6. В даному випадку процес розгону можна розділити на три основні етапи.

На першому етапі робота здійснюється на поверхні МСВ з постійним динамічним моментом (AB – див. рис. 5, 6). При досягненні напругою статора рівня обмеження (точка В) починається другий етап (BC). При цьому подальше збільшення швидкості відбувається за рахунок зменшення поздовжньої складової струму статора у від’ємному напрямку у відповідності з виразом (10). На другому етапі динамічний момент зберігається на бажаному рівні шляхом збільшення струму статора. Рух системи відбувається за поверхнею обмеження за напругою. Третій етап (CD) почи-

нається, коли струм статора також досягає рівня обмеження (точка С). При цьому підтримка динамічного моменту на заданому рівні вже не можлива та відбувається зниження швидкодії. Поперечна складова струму статора починає змінюватися у відповідності з виразом (12).

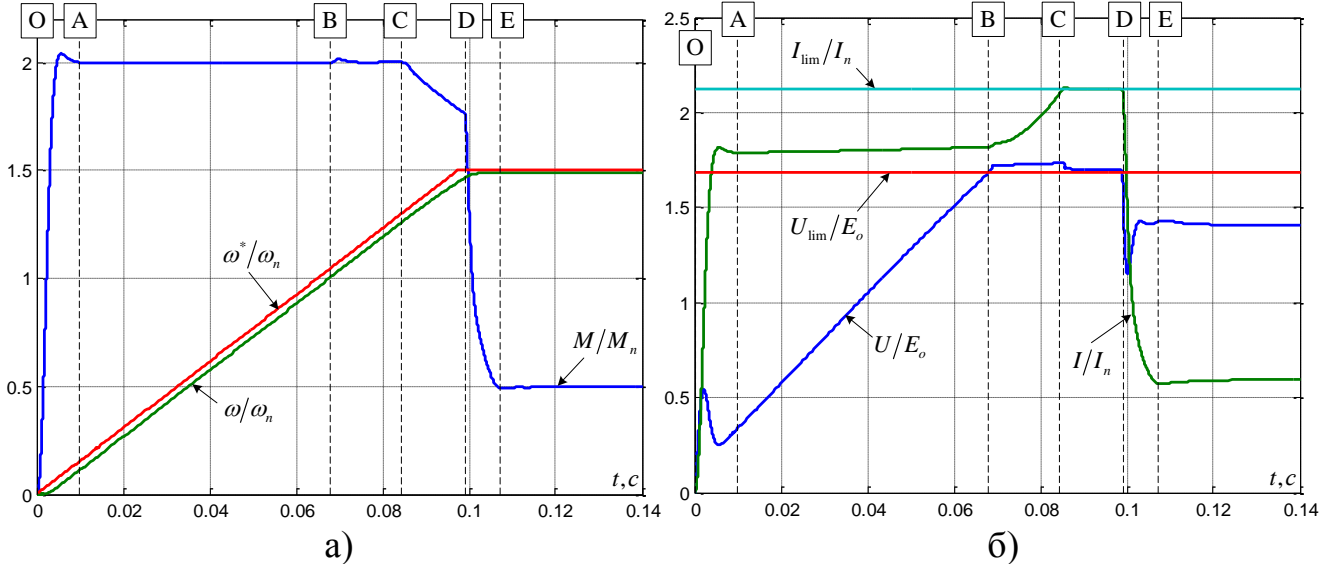


Рис. 5. Графіки електромагнітного моменту та швидкості двигуна (а) та напруги і струму статора (б) при стратегії керування МСВ у разі досягнення обмежень координат

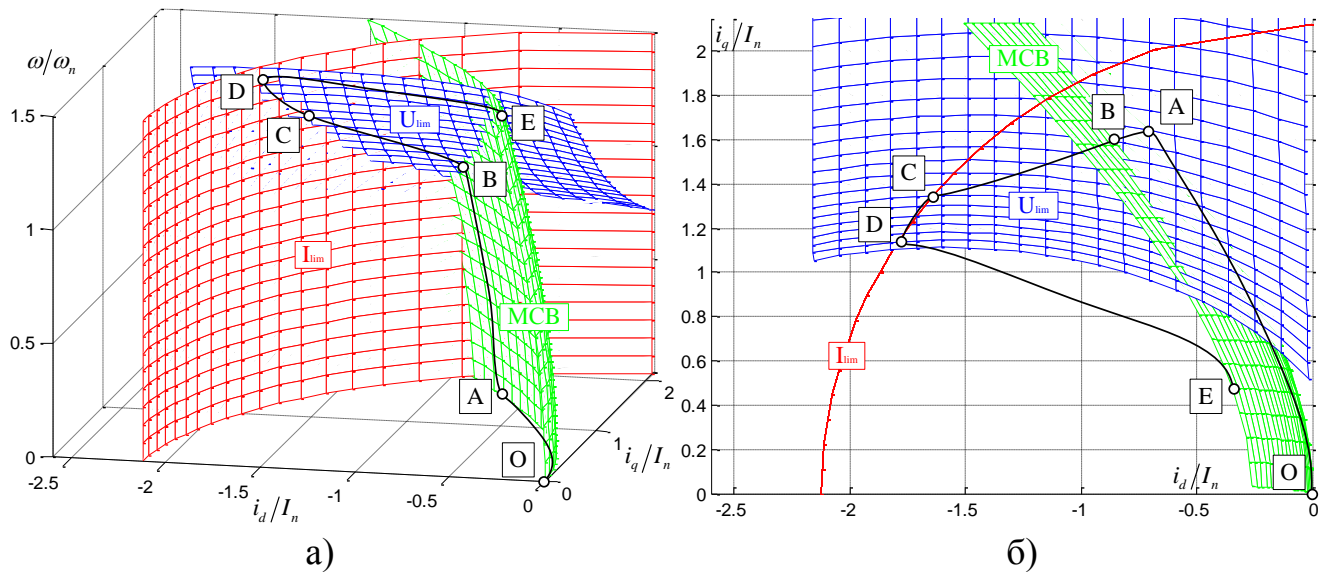


Рис. 6. Графіки траєкторії роботи системи (а) та її проекція на струмову площину (б) при стратегії керування МСВ у разі обмежень координат

При досягненні заданої швидкості система знову переходить на поверхню стратегії регулювання МСВ в точку перетину з поверхнею статичного моменту (точка Е).

Перевищення напругою допустимих значень пов'язано з тим, що при отриманні обмежень на завдання складових струму були використані рівняння статички. Відповідно в разі наявності похідних струмів (di/dt) це призводитиме до похибки.

Тому результуючі обмеження слід знижувати на (10-20)% для забезпечення запасу в динаміці.

У четвертому розділі «Експериментальна перевірка розробленої системи» приведено результати експериментальних досліджень з метою перевірки адекватності математичної моделі СДПМ при врахуванні втрат в сталі та можливості реалізації оптимальних алгоритмів керування.

Перевірка адекватності математичної моделі СДПМ зроблена на експериментальній установці, що являє собою комплектну систему сервоприводу виробництва фірми Schneider Electric – Lexium 05A та пакет спеціалізованого програмного забезпечення PowerSuite.

Для математичного моделювання використано паспортні дані двигуна. Проте в них відсутня інформація про втрати в сталі. Тому в роботі виконано розрахунок еквівалентного опору R_c , який характеризує даний тип втрат та використовується при математичному моделюванні, за формулою

$$R_c = \frac{u_d^2 + (u_q - i_q R)^2 - \omega_e^2 (\psi_{pm}^2 + (L_q^2 - L_d L_q) i_q^2)}{u_q i_q - \omega_e \psi_{pm} i_q - i_q^2 R},$$

яку отримано з балансу потужності в усталеному режимі. Для використання цієї формули застосовано паспортні данні (R, L_d, L_q, ψ_{pm}) та результати експериментальних досліджень, що полягають у серії запусків СДПМ до різних значень швидкості та фіксації за допомогою програмного забезпечення PowerSuite величини складових струму та напруги статора, а також швидкості в усталеному режимі.

Отриманий за такою методикою графік залежності та його апроксимація функцією

$$R_c = \frac{R_{co} \omega_e L_c}{R_{co} + \omega_e L_c},$$

де R_{co} – складова, що відповідає за втрати від вихрових струмів; L_c – складова, що відповідає за втрати на перемагнічування, наведені на рис. 7 ($R_{co} = 5200$ Ом, $L_c = 3,9$ Гн).

Особливістю системи комплексного електропривода є неможливість внесення змін у структуру системи керування. Тому для перевірки працездатності запропонованих систем оптимального керування було використано сторонній перетворювач частоти з вільно

програмованою системою керування, реалізованою на мікропроцесорному контро-

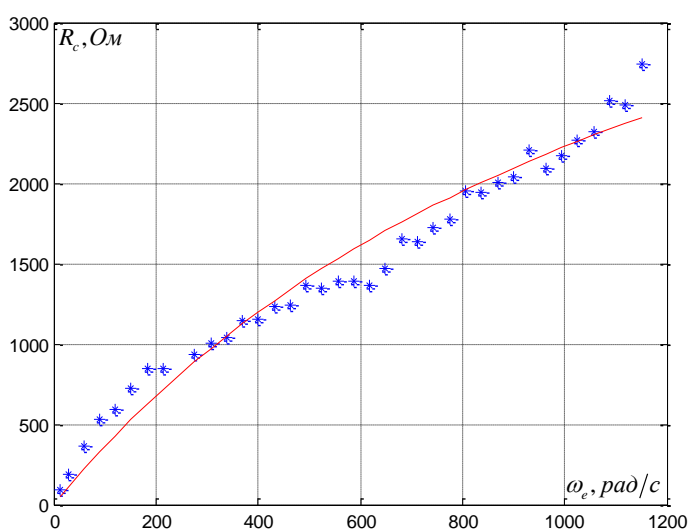


Рис.7. Залежність значення еквівалентного опору втрат в сталі R_c від електричної кутової швидкості ротора

лері фірми dSpace – DS1104. Контролер являє собою пристрій, який встановлюється в гніздо PCI-шини стандартного комп'ютера, та може програмуватися за допомогою пакета Matlab/Simulink.

Для керування контролером та візуалізації необхідних процесів використано спеціалізовано програмне забезпечення Control Desk.

На рис. 8 наведено результати моделювання та експерименту у випадку застосування стратегії керування МСВ при розгоні на холостому ході та накиді навантаження.

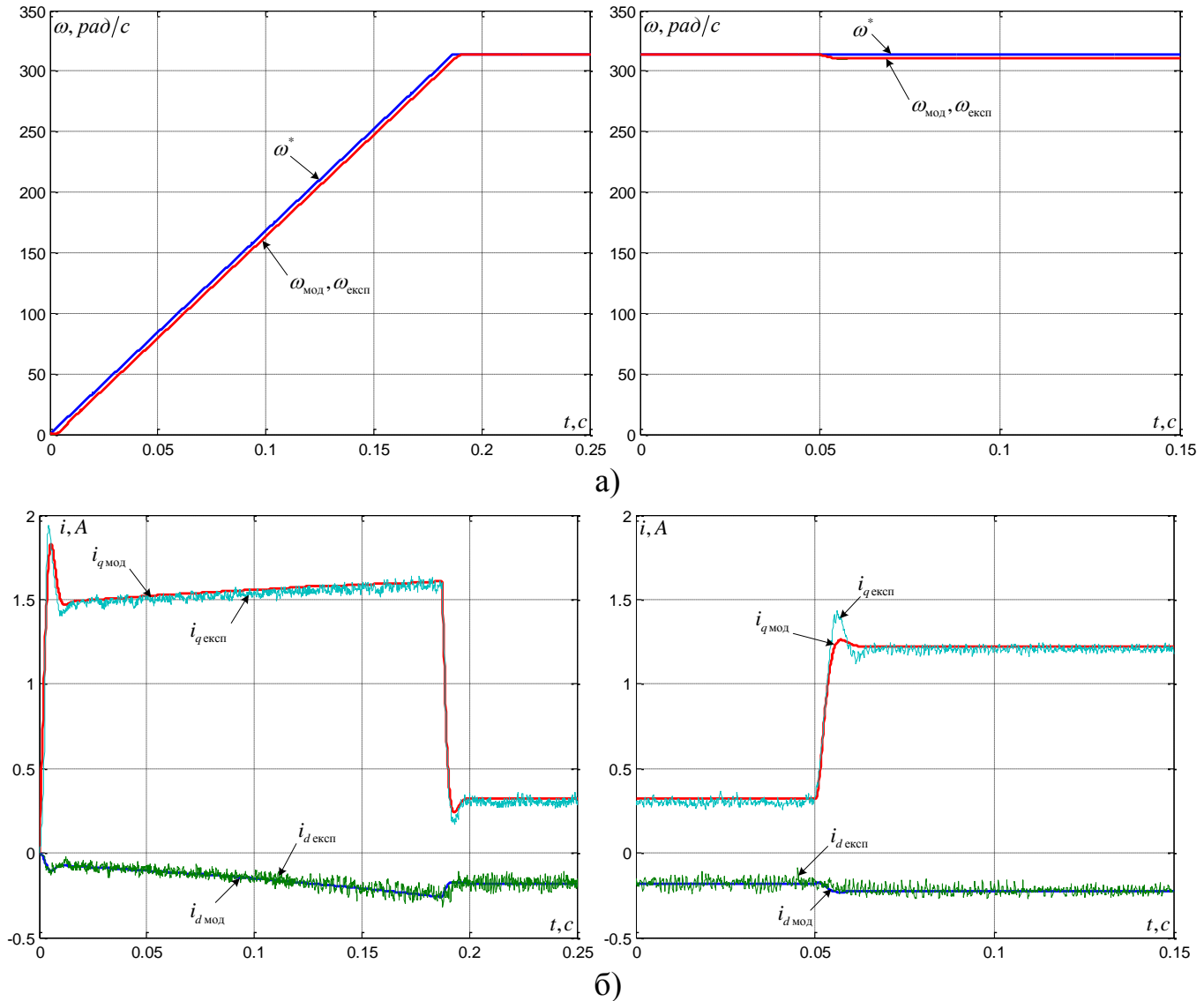


Рис. 8. Перехідні процеси оптимальної системи керування в режимі розгону та під навантаженням при стратегії керування МСВ: а) швидкість двигуна; б) складові струму статора

З цього рисунку видно, що математична модель, використана в роботі для аналізу запропонованих алгоритмів керування, адекватна реальній системі.

Експериментальні дослідження також підтвердили працездатність запропонованих систем та їх ефективність.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлено нові рішення в області систем керування синхронними двигунами з постійними магнітами, які дозволяють поліпшити енергетичні показники системи електропривода. В роботі розроблено та застосовано на практиці алгоритми, що реалізують оптимальні за втратами в двигуні закони керування; удосконалено систему векторного керування; визначено максимальні рівні керованих координат при урахуванні існуючих обмежень на напругу та струм в системі електропривода.

Основні результати роботи полягають в наступному:

1. Аналіз літературних джерел показав, що системи керування СДПМ потребують удосконалення, спрямованого на поліпшення енергетичних показників. Також удосконалення можна досягти шляхом врахування втрат в сталі при синтезі системи векторного керування та стратегій оптимального керування, спрямованих на мінімізацію втрат в двигуні, а також отримання аналітичних залежностей, які дозволили би підвищити ефективність оптимізації та створили передумови до адаптації системи при зміні параметрів об'єкту керування.

2. Використання класичної системи векторного керування при наявності суттєвих втрат в сталі призводить до відпрацювання завданого електромагнітного моменту з похибкою величина якої залежить від швидкості електропривода та величини бажаного моменту. Усунути цей недолік можливо за рахунок переходу від регулювання повних складових струму статора до регулювання складових їх частин, які приймають участь у створенні магнітного потоку. При роботі від задатчика інтенсивності обидві системи забезпечують потрібний момент, однак у класичній системі це пов'язано з підвищенням теплових втрат в двигуні. Результати моделювання показали, що застосування запропонованої системи дозволяє підвищити ефективність приблизно на (0,5-3)%.

3. При роботі на швидкостях, що не перевищують номінальну, стратегії керування «Максимальний момент на ампер» і «Мінімізація сумарних втрат» забезпечують досить близькі результати. Однак застосування останньої все ж дозволяє підвищити сумарний ККД системи приблизно на (0,2-1)%. Ефективність застосування алгоритму керування «Мінімізація сумарних втрат», по відношенню до сумарних втрат в СДПМ, значно зростає із збільшенням робочої швидкості. У випадку двох номіналів швидкості порівняно зі стратегією керування «Максимальний момент на ампер» сумарні втрати зменшуються на (12-25)%, що призводить до зростання ККД системи на (2-3)%.

4. Залежність між складовими струму статора, що дозволяє узагальнити розроблені стратегії оптимального керування, може використовуватись, як для СДПМ, так і для синхронного реактивного двигуна. Причому, вибір бажаної стратегії керування здійснюється шляхом зміни тільки одного параметра.

5. Обмеження керуючих впливів відповідно до знайдених в роботі виразів дозволяє усунути вихід координат, що обмежуються, за допустимі значення в статичних режимах і значно зменшити похибку в динамічних режимах. Для гарантовано-

го забезпечення обмеження напруги в динаміці рекомендується все ж таки знизити рівень обмеження на (10-20)% у відношенні до розрахункових значень.

б. Дані отримані на експериментальній установці підтверджують адекватність математичної моделі та працездатність розроблених систем оптимального керування СДПМ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Толочко О.И. Анализ систем управления синхронными двигателями с постоянными магнитами при регулировании скорости вверх от номинальной / О.И. Толочко, В.В. Божко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2010. – Харків: НТУ «ХПИ». - №28. – С. 149-152.

2. Толочко О.І. Аналіз впливу перехресних зв'язків в системі векторного керування синхронним двигуном з постійними магнітами / О.І. Толочко, Г.С. Чекавський, В.В. Божко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: „Електротехніка і енергетика”. – 2009. – ДВНЗ „ДонНТУ”. – Вип. 9 (158). – С. 21-24.

3. Толочко О.І. Визначення допустимої області застосування оптимальних алгоритмів керування синхронними двигунами з постійними магнітами / О.І. Толочко, Є.О. Вареник, В.В. Божко // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2011. - Київ: «Техніка». - №03(79). – С. 72-74.

4. Толочко О.І. Дослідження електроприводів на основі синхронного двигуна з постійними магнітами при оптимальному керуванні за максимумом моменту на ампер / О.І. Толочко, В.В. Божко // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. научн. тр. УкрНИИВЭ. – 2010. – Донецьк: ООО «АИР». – С. 242- 247.

5. Толочко О.І. Ідентифікація індуктивностей синхронного двигуна з постійними магнітами рекурентним методом найменших квадратів / О.І. Толочко, В.В. Божко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: „Електротехніка і енергетика”. – 2012. – ДВНЗ „ДонНТУ”. – Вип. №1 (12)-2(13). – С. 234-238.

6. Толочко О.І. Особливості векторного керування синхронними двигунами з постійними магнітами при урахування втрат в сталі / О.І. Толочко, В.В. Божко // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2012. - КрНУ – Вип. 3/2012 (19). – С. 45-47.

7. Толочко О.І. Уніфікований алгоритм керування синхронними двигунами без електричного збудження / О.І. Толочко, В.В. Божко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: „Електротехніка і енергетика”. – 2011. – ДВНЗ „ДонНТУ”. – Вип. 11 (186). – С. 392-395.

8. Трандафилов В.Н. Идентификация момента инерции электропривода ненормированным градиентным методом / В.Н Трандафилов, В.В. Божко, О.И. Толочко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: „Електротехніка і енергетика”. – 2011. – ДВНЗ „ДонНТУ”. – Вип. 10 (180). – С. 194-199.

У наукових роботах написаних у співавторстві автору належить: в [1, 3, 7] – розробка алгоритму та отримання аналітичних виразів для реалізації стратегій керування електроприводом; в [2] – розробка математичної моделі, аналіз результатів моделювання; в [4, 6] – виконання аналітичних розрахунків і математичного моде-

лювання; в [5, 8] – розробка дискретних моделей для ідентифікації і виконання математичного моделювання.

АНОТАЦІЯ

Божко В.В. Аналіз і синтез оптимальних систем керування синхронними двигунами з постійними магнітами. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03. – Електротехнічні комплекси та системи. – Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», Донецьк, 2013.

У дисертаційній роботі представлено нові рішення в області систем керування синхронними двигунами з постійними магнітами, які дозволяють покращити енергетичні показники системи електропривода.

Удосконалено систему полеорієнтованого керування синхронними двигунами з постійними магнітами за рахунок урахування втрат в сталі при її синтезі.

Розроблено оптимальні за тепловими втратами алгоритми керування синхронними двигунами з постійними магнітами з урахуванням втрат в сталі.

Отримано залежність між частинами складових струму статора, що дозволяє узагальнити розроблені стратегії оптимального керування і може використовуватись для будь-яких синхронних двигунів без електричного збудження.

Обґрунтовано і знайдено вирази для лімітування завдань на складові струму статора, при роботі в умовах обмежень на координати в системі електропривода.

Розроблені системи оптимального керування синхронними двигунами з постійними магнітами перевірені шляхом математичного моделювання і експериментальних досліджень.

Ключові слова: економія електроенергії, оптимальне керування, теплові втрати, критерій якості, синхронний двигун з постійними магнітами, система полеорієнтованого керування.

ANNOTATION

Bozhko V. Analysis and synthesis of permanent magnets synchronous motors optimal control systems. – Manuscript.

The thesis on competition of scientific degree of the candidate of technical sciences on speciality 05.09.03 – Electrotechnical complexes and systems. – Donetsk National Technical University, Donetsk, 2013.

New solutions, which can improve the performance of electric drive, in the field of permanent magnets synchronous motors control systems have been obtained.

The field oriented control system of permanent magnet synchronous motor has been improved by taking into account core losses.

The optimal control algorithms of permanent magnet synchronous motor, which minimizing heat losses, have been designed.

The dependence between parts of stator current components, which allows generalizing developed optimal control strategies, has been obtained. Special cases of this expres-

sion can be used for any synchronous motors without electrical excitation.

Expressions for limiting references of stator current components, while working within the constraints on the electric drive coordinates, have been proved and found.

The developed permanent magnets synchronous motors optimal control systems have been tested by mathematical modeling and on experimental setup.

Keywords: energy savings, optimal control, heat losses, quality criteria, permanent magnet synchronous motor, field oriented control system.

АННОТАЦИЯ

Божко В.В. Анализ и синтез оптимальных систем управления синхронными двигателями с постоянными магнитами – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03. – Электротехнические комплексы и системы. – Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», Донецк, 2013.

В диссертационной работе представлены новые решения в области систем управления синхронными двигателями с постоянными магнитами, которые позволяют улучшить энергетические показатели системы электропривода.

Усовершенствовано систему полеориентированого управления синхронными двигателями с постоянными магнитами за счет учета потерь в стали при ее синтезе. Показано, что при наличии существенных потерь в стали, классическая система векторного управления обеспечивает отработку заданного электромагнитного момента с ошибкой. Величина ошибки зависит от рабочей скорости и величины задания на момент. Для устранения обнаруженного недостатка разработано систему, в которой выполняется регулирование не полных составляющих тока статора, а только их частей, которые принимают непосредственное влияние в образовании электромагнитного момента. В случае работы по задатчику интенсивности динамические и статические характеристики традиционной и предложенной систем управления идентичны. Однако применение классической системы сопровождается повышенными потерями в электродвигателе.

Разработано оптимальные по тепловым потерям алгоритмы управления синхронными двигателями с постоянными магнитами с учетом потерь в стали. Выведено уточненные аналитические выражения зависимостей между частями составляющих тока статора, выполнение которых позволяет реализовать стратегии управления «Максимальный момент на ампер» и «Максимальный момент на вольт». Использование указанных алгоритмов управления позволяет косвенно минимизировать потери в меди и стали за счет минимизации тока и напряжения статора синхронного двигателя с постоянными магнитами. Синтезировано аналогичные системы для непосредственной минимизации указанных потерь – стратегии управления «Минимизация потерь в меди» и «Минимизация потерь в стали». Получено в аналитическом виде выражение зависимости между частями составляющих тока статора, которое позволяет реализовать стратегию управления «Минимизация суммарных потерь».

Унифицировано разработанные стратегии оптимального управления путем представления их в виде единого математического выражения, в котором выбор желаемого алгоритма управления осуществляется за счет изменения одного параметра. На основании обобщенного выражения получены частные случаи для синхронных двигателей с постоянными магнитами, у которых отсутствует электромагнитная асимметрия, и синхронных реактивных двигателей.

Разработана система оптимального управления с учетом существующих ограничений на ток и напряжение статора. Для этого обосновано и найдено предельные значения заданий на части составляющих тока статора. Проанализирована работа системы управления в случае достижения рассматриваемых ограничений при использовании различных алгоритмов оптимального управления.

Разработанные системы оптимального управления синхронными двигателями с постоянными магнитами проверены путем математического моделирования и при помощи экспериментальных исследований. Создана экспериментальная установка на основе системы комплектного сервопривода и пакета специализированного программного обеспечения. При помощи данной установки определено эквивалентное сопротивление, характеризующее потери в стали синхронного двигателя с постоянными магнитами. На основании полученных результатов выполнено оценивание эффективности использования оптимальных стратегий управления для рассматриваемого электродвигателя. Проверку работоспособности рассматриваемых систем оптимального управления выполнено на основе отдельного преобразователя частоты со свободно-программируемой системой управления. Исследована работа разработанных систем оптимального управления в динамических и статических режимах. Полученные результаты подтвердили адекватность математической модели синхронного двигателя, используемой для анализа оптимальных алгоритмов управления, а также возможность реализации и эффективность предложенных систем.

Ключевые слова: экономия электроэнергии, оптимальное управление, тепловые потери, критерий качества, синхронный двигатель с постоянными магнитами, система полеориентированного управления.