

В.Х. Далека¹, М.Я. Островерхов²¹Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

ОПТИМІЗАЦІЯ ЗАКОНІВ КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

Метою роботи є забезпечення заданої якості керування тяговим вентильно-індукторним електроприводом в умовах параметричних та координатних збурень. Закони керування оптимізовано на основі концепції зворотної задачі динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій. Це забезпечує динамічну декомпозицію взаємозв'язаної системи на незалежні локальні контури керування, слабку чутливість до зміни параметрів електропривода та простоту реалізації законів керування.

Ключові слова: тяговий електропривод, вентильно-індукторний двигун, закони керування.

Постановка проблеми

В сучасному тяговому електроприводі використовуються двигуни змінного струму, зокрема асинхронні двигуни з короткозамкнутим ротором та синхронні двигуни з постійними магнітами [1-6].

Недоліком асинхронного тягового електропривода є невеликий, близько 1:2, діапазон керування в зоні послаблення магнітного поля внаслідок різкого збільшення втрат, та проблема з відводом основного тепла, що виділяється в роторі двигуна.

Недолік синхронного тягового електропривода з постійними магнітами полягає у відсутності керування полем збудження. Зменшення магнітного потоку двигуна можливо реалізувати за допомогою відповідного керування струмом статора, проте воно пов'язане з ризиком виходу з ладу силового перетворювача. Синхронний двигун має підвищену вартість та трудомісткість виготовлення.

Внаслідок нагрівання двигунів чи зміни маси транспортного засобу змінюються параметри електродвигуна, зокрема електричні опори обмоток, чи приведений момент інерції електропривода. При обчисленні параметрів схеми заміщення двигуна за його паспортними даними виникають похибки, обумовлені допущеннями в методиці обчислень. Це призводить до відхилення розрахункових значень параметрів від реальних, в результаті чого погіршується якість керування координатами електропривода внаслідок параметричних збурень.

За своєю природою двигуни змінного струму є взаємозв'язаними об'єктами керування. Оптимізація законів керування електроприводом в таких умовах пов'язане з компенсацією впливу координатних збурень та дії вихрових струмів.

Вирішення вказаних проблем класичними методами теорії автоматичного керування в умовах

невизначеності підвищує громіздкість системи внаслідок використання додаткових алгоритмів ідентифікації параметрів, адаптації та компенсації координатних збурень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В таких умовах перспективним може бути тяговий електропривод змінного струму на основі вентильно-індукторного двигуна з незалежним збудженням [1-3]. Діапазон послаблення поля в даному електроприводі може досягати 1:8, що дозволяє значно розширити зону керування з постійною потужністю, характерною для тягових електроприводів. Конструкція двигуна з пасивним ротором забезпечує високу надійність, відсутність ковзних контактів, простий відвід тепла та високу технологічність виготовлення.

Аналіз сучасних методів оптимізації законів керування в умовах невизначеності показує, що вирішення вказаних проблем тягового електропривода може бути здійснено на основі концепції зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій [7,8]. В основу методу покладена ідея зворотності прямого методу Ляпунова по дослідженню стійкості. Це дозволяє знаходити закон керування, при якому замкнутий контур регулювання має наперед задану функцію Ляпунова, в якості якої виступає миттєве значення енергії. Отриманий закон надає замкнутій системі властивість стійкості в цілому, що дозволяє вирішувати задачі керування взаємозв'язаними, нелінійними об'єктами, як в лінійних системах по математичних моделях локальних контурів. Характерною особливістю оптимізації є досягнення не абсолютного мінімуму функціонала якості, як в традиційних системах, а деякого мінімального значення, що забезпечує допустиму за технічними вимогами динамічну похибку системи [8].

Метою роботи є забезпечення заданої якості керування тяговим вентильно-індукторним електроприводом в умовах невизначеності математичної моделі двигуна шляхом оптимізації законів керування на основі концепції зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій, що забезпечує слабку чутливість до параметричних і координатних збурень та простоту практичної реалізації.

Виклад основного матеріалу

Вентильно-індукторний двигун з незалежним збудженням з точки зору керування наближається до класичного синхронного двигуна [1]. Це дозволяє розробити ефективну систему векторного керування тяговим вентильно-індукторним електроприводом з орієнтацією до положення ротора двигуна. Динамічна модель вентильно-індукторного двигуна у системі координат (d-q) описується відомою взаємозв'язаною системою рівнянь (1)

$$\begin{cases} L_s \frac{di_d}{dt} + R_s i_d = U_d + F_1; \\ L_s \frac{di_q}{dt} + R_s i_q = U_q + F_2; \\ L_s \frac{di_f}{dt} + R_f i_f = U_f + F_3; \\ J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c; \\ \psi_d = L_s i_d + L_m i_f; \\ \psi_q = L_s i_q; \\ \psi_f = L_f i_f + L_m i_d; \\ M = \sqrt{3} Z_p [\psi_d i_q - \psi_q i_d], \end{cases} \quad (1)$$

де i_d, i_q та U_d, U_q – струми та напруги статора по осям d і q; i_f та U_f – струм та напруга збудження; $\omega = Z_p \omega_r$; ω_r, ω – кутова і електрична швидкість ротора; Z_p – число пар полюсів; M, M_c – електромагнітний момент двигуна і момент навантаження; ψ_d, ψ_q, ψ_f – потокозчеплення по осям d і q та обмотки збудження; L_s, L_f, L_m – індуктивність фази, обмотки збудження та взаємна індуктивність; J – сумарний момент інерції; R_s, R_f – активний електричний опір обмотки статора та збудження.

Координатні збурення $F_1 = L_m \frac{di_f}{dt} - \omega \psi_q$,

$F_2 = \omega \psi_d$, $F_3 = L_m \frac{di_d}{dt}$ обумовлюють взаємний вплив координат електропривода. В традиційних системах для компенсації їх негативної дії до контурів керування вводяться додаткові зв'язки, точність яких залежить від точності параметрів двигуна. Або розробка законів керування здійснюється за результатами статичної декомпозиції об'єкту (1), що суттєво збільшує громіздкість системи керування. В даній роботі задача вирішується шляхом динамічної де-

композиції системи [9], яку забезпечує запропонований метод оптимізації. Координатні збурення F_1, F_2, F_3 трактуються як невизначені, проте обмежені по величині $F_1 \leq F_{1max}, F_2 \leq F_{2max}, F_3 \leq F_{3max}$. Рівня керуючих напруг U_d, U_q, U_f достатньо для їх парировання.

Система керування електроприводом складається з трьох незалежних контурів регулювання: струму збудження i_f ; струму статора i_q по осі q, який визначає тяговий момент двигуна; струму статора i_d по осі d, магнітний потік від якого може як підмагнічувати так і розмагнічувати основний потік від обмотки збудження. При необхідності керувати не тільки тяговим моментом двигуна (основне призначення електропривода), а й швидкістю, система може бути доповнена контуром регулювання кутової швидкості двигуна ω_r .

Відповідно до першого рівняння системи (1) об'єкт локального контуру керування струмом i_d описується лінійним диференціальним рівнянням першого порядку, на який діє керуюча напруга U_d та координатне збурення F_1 . Бажане рівняння замкнутого контуру струму i_d , за допомогою якого встановлюються задані показники якості керування, також задається рівнянням першого порядку [8]

$$\dot{z} + \alpha_{0i_d} z = \alpha_{0i_d} i_d^* \quad (2)$$

де i_d^* – заданий струм. Рівняння забезпечує астатизм першого порядку за керуючою дією та тривалість монотонного перехідного процесу струму рівну $t_n \approx 3/\alpha_{0i_d}$, яка встановлюється необхідною величиною коефіцієнта рівняння α_{0i_d} .

Ступінь наближення реального процесу керування струмом до бажаного оцінюється функціоналом, який характеризує нормовану за індуктивністю миттєву енергію магнітного поля від першої похідної струму

$$G(u) = \frac{1}{2} [\dot{z}(t) - i_d^*]^2 \quad (3)$$

Мінімізація функціонала здійснюється за градієнтним законом першого порядку

$$\frac{du(t)}{dt} = -\lambda_{i_d} \frac{dG(u)}{du} \quad (4)$$

де λ_{i_d} – константа.

Після підстановки (1) та (3) в (4) знаходиться закон керування струмом i_d

$$\dot{u}(t) = k_{i_d} (\dot{z} - i_d^*) \quad (5)$$

де $k_{i_d} = \lambda_{i_d} / L_s$ – коефіцієнт підсилення регулятора.

Змінна \dot{z} в законі керування (5) виступає в ролі необхідної похідної струму, яка знаходиться в реальному часі з рівняння (2) шляхом замикання зворотним зв'язком за складовою струму $z = i_d$

$$\dot{z} = \alpha_{0i_d} (i_d^* - i_d). \quad (6)$$

Після інтегрування обох частин рівняння (5) з урахуванням (6) закон керування складовою струму i_d приймає остаточний вигляд

$$\begin{aligned} U_d(t) &= k_{i_d} (z - i_d); \\ z &= \alpha_{0i_d} \int_0^t (i_d^* - i_d) dt. \end{aligned} \quad (7)$$

На відміну від класичних законів керування, розроблений закон (7) не містить параметрів об'єкту керування (1), а вміщує тільки параметр α_{0i_d} бажаного рівняння якості (2).

Диференціальне рівняння замкнутого контуру керування струмом i_d з законом керування (7)

$$\ddot{i}_d + (R_s/L_s + k_{i_d}/L_s)\dot{i}_d + (k_{i_d}\alpha_{0i_d}/L_s)i_d = (k_{i_d}\alpha_{0i_d}/L_s)i_d^* \quad (8)$$

показує, що процес керування є асимптотично стійким згідно до критерію Гурвіца, бо $(k_{i_d}\alpha_{0i_d}/L_s) > 0$, $(R_s/L_s + k_{i_d}/L_s) > 0$. Стійкість контуру керування зберігається при необмеженому підвищенні коефіцієнта підсилення регулятора $k_{i_d} \rightarrow \infty$ та забезпечує повне співпадіння реального (8) та бажаного (2) процесів керування, що очевидно при діленні всіх членів рівняння (8) на коефіцієнт k_{i_d}/L_s . Ця особливість забезпечує динамічну декомпозицію системи та слабку чутливість до параметричних збурень. Під час роботи взаємозв'язана система розпадається на незалежні локальні контури керування, процеси в яких не залежать від дії параметричних та координатних збурень, а протікають по траєкторіям, назначеним рівняннями бажаної якості виду (2). Звичайно, при допустимому з точки зору технічної реалізації коефіцієнті підсилення регулятора k_{i_d} існує динамічна похибка керування, допустима величина якої встановлюється технічними вимогами.

На основі другого рівняння системи (1) за аналогічною методикою отримується закон керування струмом статора i_q , який пропорційний тяговому моменту двигуна

$$\begin{aligned} U_q(t) &= k_{i_q} (z - i_q); \\ z &= \alpha_{0i_q} \int_0^t (i_q^* - i_q) dt. \end{aligned} \quad (9)$$

Як видно з (9), закон керування струмом ра i_q також не містить параметрів об'єкту (1), а вміщує тільки параметр α_{0i_q} бажаного рівняння якості виду (2). Аналогічно на основі третього рівняння системи (1) отримується закон керування струмом збудження i_f

$$\begin{aligned} U_f(t) &= k_{i_f} (z - i_f); \\ z &= \alpha_{0i_f} \int_0^t (i_f^* - i_f) dt. \end{aligned} \quad (10)$$

Закон керування струмом збудження i_f не містить параметрів об'єкту (1), а вміщує тільки параметр α_{0i_f} бажаного рівняння якості виду (2).

Закон керування швидкістю двигуна розроблюється на основі четвертого рівняння системи (1). При його оптимізації за рівнянням бажаної якості виду (2) шляхом мінімізації енергії прискорення маси від має наступний вигляд

$$\begin{aligned} i_q^*(t) &= k_\omega (z - \omega_r); \\ z &= \alpha_{0\omega} \int_0^t (\omega_r^* - \omega_r) dt. \end{aligned} \quad (11)$$

Контур регулювання швидкістю двигуна є зовнішнім відносно внутрішнього контуру керування струмом i_q , тому для зменшення впливу динаміки останнього на якість керування швидкістю коефіцієнти регуляторів вибираються за умови $\alpha_{0i_q} > (3 \div 5)\alpha_{0\omega}$.

Отриманий закон керування швидкістю (11) забезпечує астатизм першого порядку. Якщо необхідно мати астатизм другого порядку, то закон керування розроблюється за рівнянням бажаної якості другого порядку

$$\ddot{z} + \alpha_{1\omega}\dot{z} + \alpha_{0\omega}z = \alpha_{1\omega}\dot{\omega}_r^* + \alpha_{0\omega}\omega_r^* \quad (12)$$

В результаті закон керування швидкістю приймає вид

$$\begin{aligned} i_q^*(t) &= k_\omega [z - \omega_r]; \\ z &= \int f_0 dt; \\ f_0 &= \alpha_{0\omega} \int (\omega_r^* - \omega_r) dt + \alpha_{1\omega}(\omega_r^* - \omega_r). \end{aligned} \quad (13)$$

Цей закон керування також містить тільки параметри $\alpha_{0\omega}$, $\alpha_{1\omega}$ бажаного закону керування (12), за допомогою яких встановлюється бажаний вид, перерегулювання та час перехідного процесу швидкості.

Із передаточної функції розімкнутого контуру швидкості для закону керування (13)

$$W_{p\omega}(p) = \frac{(k_\omega \alpha_{1\omega} / J)p + (k_\omega \alpha_{0\omega} / J)}{p^2 [p + (k_\omega / J)]} \quad (14)$$

видно, що контур володіє заданим астатизмом другого порядку та добротністю за прискоренням рівній заданій

$$D_e = D_e^z = \alpha_{0\omega}. \quad (15)$$

Виконання умови (15) забезпечує допустиму похибку керування швидкістю при помірному коефіцієнті підсилення регулятора швидкості k_ω .

Висновки

Оптимізація законів керування тяговим вентиляльно-індукторним електроприводом на основі концепції зворотної задачі динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій забезпечує високу динамічну точність, динамічну декомпозицію взаємозв'язаної системи на локальні підсистеми та слабку чутливість до зміни

параметрів двигуна. Особливістю законів керування є відсутність операцій диференціювання змінних та параметрів об'єктів, що обумовлює простоту практичної реалізації.

Література

1. Козаченко В.Ф. Вентильно-индукторный электропривод с независимым возбуждением для тягового применения / В.Ф. Козаченко, М.М. Лашкевич // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2011. – № 03(79). – С. 138-139.
2. Burkhart, B. and Brauer, H.J. (2012), "Design of a switched reluctance traction drive for Electric Vehicles", *Vehicle Power and Propulsion Conference. IEEE, Seoul*, 9-12 Oct. 2012, pp. 204–209.
3. Chen, H. (2006), "Switched Reluctance Motors Drive for the Electrical Traction in Shearer", *Power Electronics and Motion Control Conference. CES/IEEE 5th International, Shanghai*, 14-16 Aug. 2006, V. 2, pp. 1–4.
4. Ehsani, M. and Yimin Gao (2003), "Characterization of electric motor drives for traction applications", *Industrial Electronics Society, 29th Annual Conference of the IEEE*, V. 1, pp. 891–896.
5. Simanek, J. and Novak, J (2007), "Control Algorithms for Permanent Magnet Synchronous Traction Motor", *Proceedings EUROCON 2007, Warsaw*, Sept. 2007, pp. 1839–1844.
6. Conilh, C. and Pietrzak-David, M. (2005), "Sensorless traction system with low voltage high current induction machine for indoor vehicle", *Proc. of the IEEE/PEDS'2005 Confer.*, pp. 50-55.
7. Крутько П.Д. Робастно устойчивые структуры управляемых систем высокой динамической точности. Алгоритмы и динамика управления движением модельных объектов / П.Д. Крутько // *Изв. РАН. ТуСУ*. – 2005. – № 2. – С. 120-140.
8. Островерхов Н.Я. Управление координатами электроприводов на основании концепции обратных задач динамики при минимизации локальных функционалов мгновенных значений энергий / Н.Я. Островерхов, Н.П. Бурик // *Электротехника и электроэнергетика*. – Запорожье: ЗНТУ, 2011. – № 1. – С. 41-49.
9. Черноусько Ф.Л. Декомпозиция и субоптимальное управления в динамических системах / Ф.Л. Черноусько // *ПММ*. – 1990. – Т. 54. – Вып. 6. – С. 883-893.

Автор: ДАЛЕКА Василь Хомич

Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричного транспорту
E-mail – daleka@ksame.kharkov.ua

Автор: ОСТРОВЕРХОВ Микола Якович

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», доктор технічних наук, доцент, професор кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу
E-mail – ostroverkhov@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

В.Ф. Далека, Н.Я. Островерхов

Целью работы является обеспечение заданного качества управления тяговым вентильно-индукторным электроприводом в условиях параметрических и координатных возмущений. Законы управления оптимизированы на основании концепции обратной задачи динамики в соединении с минимизацией локальных функционалов мгновенных значений энергий. Это обеспечивает динамическую декомпозицию взаимосвязанной системы на независимые локальные контуры управления, слабую чувствительность к изменению параметров электропривода и простоту реализации законов управления.

Ключевые слова: тяговый электропривод, вентильно-индукторный двигатель, законы управления.

OPTIMIZATION OF CONTROL LAWS FOR TRACTION ELECTRIC DRIVE WITH SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

B. Daleka, M. Ostroverkhov

The purpose of this article is to increase the control quality of a switched reluctance motor of a traction electric drive under parametric and coordinate disturbances. The control laws of a switched reluctance motor are developed based on a conception of reverse task of dynamics in combination with minimization of local functionals of instantaneous values of energies. The proposed method is based on an idea of the reversibility of the Lyapunov direct method for the stability analysis, which allows determining control laws in case a closed loop has the predetermined Lyapunov function. The instantaneous value of energy is used as the Lyapunov function. The specificity of optimization is not obtaining the absolute minimum of the quality functional, as usually used in traditional systems, but rather getting a certain minimal value which would assure a technically allowable dynamic error of the system. This allows a dynamic decomposition of an interrelated system by independent closed loops, as well as a lesser sensitivity to variation of the motor's parameters. The simplicity of realization of control laws is caused by the absence operation of differentiation.

Key words: traction electric drive, switched reluctance motor, control laws.