

КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ПРИ МІНІМІЗАЦІЇ ЛОКАЛЬНИХ ФУНКЦІОНАЛІВ МИТТЄВИХ ЗНАЧЕНЬ ЕНЕРГІЙ

Електроприводи з синхронними двигунами з постійними магнітами (СДПМ) застосовуються у високотехнологічних установках різного призначення. Під час роботи електроприводу його параметри, зокрема момент інерції та електричні опори обмотки, можуть змінюватися або бути неточно визначені, що призводить до погіршення заданої якості керування координатами.

Метою роботи є забезпечення заданої якості керування в умовах параметричних збурень шляхом розробки законів керування регуляторів електроприводу при мінімізації локальних функціоналів миттєвих значень енергій на основі концепції зворотних задач динаміки [1,2].

Змістом зворотної задачі динаміки є розробка законів керування, при якому система володіла б наперед заданими динамічними й статичними властивостями. Пошук законів керування здійснюється при мінімізації локальних функціоналів в околі траєкторій бажаних моделей замкнутої системи чи контуру керування. Характерною рисою оптимізації є досягнення не абсолютного мінімуму функціонала якості, що характерно для традиційних систем, а деякого мінімального значення, яке відповідає допустимій за технічними вимогами динамічній похибці системи. Локальні функціонали є функціями Ляпунова, в якості яких виступають миттєві значення енергій або їхніх похідних. Концептуально це відповідає ідеї зворотності прямого метода Ляпунова по дослідженню стійкості, що полягає в знаходженні керуючої дії, при якій замкнута система має наперед задану функцію Ляпунова. Концепція зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій відкриває такі важливі для електромеханіки перспективи, як динамічна декомпозицію взаємозв'язаної нелінійної системи на незалежні лінійні підсистеми, проведення синтезу законів керування координатами взаємозв'язаної нелінійної системи по лінійним моделям локальних контурів керування, слабка чутливість до параметричних й координатних збурень об'єкту керування.

Динамічна модель СДПМ у системі координат (d-q), орієнтованій по магнітній вісі ротора описується наступною системою рівнянь [3]

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} (U_d - R_s i_d + \omega L_q i_q); \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} (U_q - R_s i_q - \omega L_d i_d - \omega \psi_f); \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_c - \beta \omega_r); \quad \omega = Z_p \omega_r; \\ M = \frac{3}{2} Z_p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q], \end{cases} \quad (1)$$

де i_d, i_q та U_d, U_q – струми та напруги статора по осям d і q; ω_r, ω – кутова і електрична швидкість ротора; M, M_c – електромагнітний момент двигуна і момент навантаження; ψ_f – потокозчеплення, що створюється постійними магнітами; J – момент інерції; β – коефіцієнт в'язкого тертя; Z_p – число пар полюсів; R_s – активний опір обмотки статора; L_d, L_q – індуктивності обмотки статора по осям d і q.

Синтез регуляторів починається з розробки закону керування складовою струму статора i_d . Як видно з першого рівняння системи (1), об'єкт керування локального контуру описується диференціальним рівнянням першого порядку при дії координатного збурення, обумовленого складовою струму i_q . Записується бажане рівняння замкнутого контуру струму i_d , за допомогою якого задається бажана якість керування. Рівняння має перший порядок, як і рівняння об'єкту, та забезпечує астатизм 1-го порядку за керуючою дією і бажану тривалість монотонного перехідного процесу $t_n \approx 3/\gamma_{0i_d}$, де i_d^* – завдання струму

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

Необхідно знайти таку керуючу функцію $u = U_d$, щоб якість керування складовою струму $i_d(t)$ наближалася до бажаної, заданої рівнянням (2). Ступінь наближення реального процесу до бажаного оцінюється функціоналом, який характеризує нормовану за індуктивністю енергію першої похідної магнітного поля

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

Мінімізація функціонала здійснюється за градієнтним законом першого порядку, де λ_{i_d} – константа

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

З урахуванням (1) та (3) похідна функціоналу дорівнює

$$\frac{dG(u)}{du} = -\frac{1}{L_d} (\dot{z} - \dot{i}_d). \quad (5)$$

Після підстановки (5) в (4) знаходиться закон керування складовою струму i_d

$$\dot{u}(t) = k_{i_d} (\dot{z} - \dot{i}_d), \quad (6)$$

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

Змінна \dot{z} в законі керування (6) виступає в ролі необхідної похідної струму, яка знаходиться в реальному часі з рівняння бажаної якості (2) за виразом

$$\dot{z} = \gamma_{0i_d} (i_d^* - i_d) \quad (7)$$

шляхом замикання зворотним зв'язком за складовою струму $z = i_d$.

Після інтегрування обох частин рівняння (6) з урахуванням (7) закон керування приймає остаточний вигляд

$$U_d(t) = k_{i_d} (z - i_d); \quad z = \gamma_{0i_d} \int_0^t (i_d^* - i_d) dt. \quad (8)$$

Закон (8) вміщує тільки параметр γ_{0i_d} рівняння бажаної якості (2) та не залежить від параметрів об'єкту керування (1), що характерно для класичних законів керування.

Диференціальне рівняння замкнутого контуру складовою струму i_d з законом керування (8)

$$\ddot{i}_d + (R_s / L_d + k_{i_d} / L_d) \dot{i}_d + (k_{i_d} \gamma_{0i_d} / L_d) i_d = (k_{i_d} \gamma_{0i_d} / L_d) i_d^* \quad (9)$$

показує, що рух буде асимптотично стійким згідно критерію Гурвиця, адже виконуються наступні нерівності: $(R_s / L_d + k_{i_d} / L_d) > 0$; $(k_{i_d} \gamma_{0i_d} / L_d) > 0$. Причому стійкість контуру зберігається при необмеженому підвищенні коефіцієнта підсилення регулятора $k_{i_d} \rightarrow \infty$, що забезпечує повне співпадіння реального (9) та бажаного (2) процесів керування. Це очевидно при діленні всіх членів рівняння (9) на коефіцієнт k_{i_d} / L_d . Це надає системі керування властивості слабкої чутливості до параметричних та координатних збурень. Звичайно, при допустимому з точки зору технічної реалізації коефіцієнті підсилення існує похибка керування, максимально допустима величина якої встановлюється технічними вимогами.

На базі другого рівняння системи (1) аналогічно отримується закон керування складовою струму i_q

$$U_q(t) = k_{i_q} (z - i_q); \quad z = \gamma_{0i_q} \int_0^t (i_q^* - i_q) dt \quad (10)$$

та швидкістю двигуна на основі третього рівняння системи (1) при мінімізації енергії прискорення маси

$$i_q^*(t) = k_{i_\omega} (z - \omega_r); \quad z = \gamma_{0\omega} \int_0^t (\omega_r^* - \omega_r) dt. \quad (11)$$

Контур керування швидкістю двигуна є зовнішнім відносно внутрішнього контуру керування складовою струму i_q , тому для зменшення впливу його динаміки коефіцієнти вибираються за умови $\gamma_{0i_q} > (3 \div 5) \gamma_{0\omega}$.

Таким чином, представлені закони керування СДПМ при мінімізації локальних функціоналів енергій забезпечують стабільну якість керування в умовах параметричних та координатних збурень. Простоту практичної реалізації законів керування обумовлює відсутність в них диференціальних ланок та параметрів об'єкту керування, що характерно для класичних законів керування, а також збереження стійкості системи при необмеженому підвищенні коефіцієнтів підсилення регуляторів.

Література:

1. Крутько П.Д. Робастно устойчивые структуры управляемых систем высокой динамической точности. Алгоритмы и динамика управления движением модельных объектов // Изв. РАН. ТиСУ. – 2005. – № 2. – С. 120-140.
2. Островерхов М.Я. Метод синтеза регуляторов электромеханических систем на основе концепции зворотних задач динамики в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій руху // Вісник НТУ „Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2008. – Вип. 30. – С. 105-110.
3. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. – Иваново: ГОУВПО, 2008. – 298 с.