

УДК 621.313.333

Ю. А. Чабанюк;**П. М. Сопрунюк**, д. т. н., проф.;**О. М. Васілевський**, к. т. н.

АДАПТИВНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ КУТОВИХ ШВИДКОСТЕЙ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ІЗ СПОСТЕРЕЖНИМ ЗАСОБОМ ІДЕНТИФІКАЦІЇ

Розглянуто задачу мінімізації похибки синхронізації частот обертання електродвигунів за допомогою адаптивного блока регулювання. Досліджено характеристики похибок синхронізації.

Постановка задачі

Нестабільність роботи електроприводів як об'єктів дослідження залежить від способів контролю електромагнітних та механічних параметрів електромеханічними перетворювачами (ЕМП), і від властивостей механізмів в процесі експлуатації. Зміна параметрів ЕМП відбувається при зміні таких основних величин: параметри електромагнітних контурів в колі «перетворювач-двигун», передаточні коефіцієнти ЕМП, потік збудження двигунів, моменти інерції механізмів, частоти пружних механічних коливань та ін.

При побудові технологічних процесів досить часто виникає необхідність розробки систем автоматичного контролю кутових швидкостей для синхронного обертання кількох ЕМП. Суть цієї задачі полягає в забезпеченні відносної синхронності за кутовою швидкістю, тобто узгоджене обертання кількох силових ЕМП, а також забезпеченні високої точності та швидкодії автоматичного контролю кутових швидкостей. Як правило, при цьому вимоги до точності синхронізації вищі, ніж до точності підтримки абсолютного значення кутових швидкостей ЕМП.

Аналіз стану досліджень та публікацій

Задача розглядалася в статичному режимі роботи за умови однакового навантаження на ЕМП в [1, 2]. В [2] розглянуто спосіб підвищення точності синхронізації, який полягає в підключенні додаткового блока адаптивної синхронізації кутових швидкостей ЕМП, що включає в себе блок обробки інформації поточного стану параметрів і блок перенастроювання параметрів регуляторів у відповідності з прийнятим критерієм якості роботи адаптивної системи. При використанні блока адаптивної синхронізації [2] було досягнуто суттєве підвищення точності синхронізації тільки в статичному режимі роботи ЕМП.

Формування цілей статті

З огляду на вище сказане, метою статті є розробка адаптивної системи автоматичного контролю кутових швидкостей ЕМП із спостережним засобом ідентифікації для підвищення точності і швидкодії синхронізації кутових швидкостей ЕМП як в статичному, так і в динамічному режимах роботи, а також представлення результатів досліджень її роботи, які підтверджують ефективність використання запропонованої адаптивної системи автоматичного контролю у порівнянні з відомою.

Основна частина

В електромеханічних перетворювачах (ЕМП), як правило, відбуваються непередбачувані зміни механічних характеристик — моментів опору, інерції та електромагнітного моменту. Спостережні засоби, що відтворюють змінні стани ЕМП, можуть також ідентифікувати зовнішні дії, що не підлягають прямому вимірюванню, і невідомі параметри ЕМП. У такому випадку спостережні засоби виконуються із самонастроюванням за параметрами, що ідентифікуються за рахунок введення інтеграторів, вхідні сигнали яких є різницею виміряних і оцінених значень змінних складових ЕМП [3].

Процедуру ідентифікації невідомих параметрів ЕМП за допомогою адаптивної системи автоматичного контролю із спостережним засобом зручно розглядати на прикладі об'єкта з одним вхідним $u(t)$ і одним вихідним $y(t)$ сигналами. ЕМП можна охарактеризувати передатною функцією, степінь чисельника якого принаймні на одиницю менший степеня знаменника

$$W_{\text{ЕМП}}(s) = \frac{y}{u} = \frac{B_0 s^{n-1} + B_1 s^{n-2} + \dots + B_{n-1}}{s^n + A_1 s^{n-1} + \dots + A_n}, \quad (1)$$

де A_i та B_i — невідомі коефіцієнти.

Розділивши чисельник і знаменник передатної функції (1) на поліном $(n - 1)$ -го степеня $(s + \lambda_2)(s + \lambda_3) \dots (s + \lambda_n)$, в якому $\lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ — дійсні і від'ємні корені, та розклавши чисельник і знаменник на прості дроби, отримаємо передатну функцію у вигляді

$$\frac{y}{u} = \frac{b_1 + b_2 \frac{1}{s + \lambda_2} + \dots + b_n \frac{1}{s + \lambda_n}}{s - a_1 - a_2 \frac{1}{s + \lambda_2} - \dots - a_n \frac{1}{s + \lambda_2}}, \quad (2)$$

де $b_1 = B_0$; $a_1 = (\lambda_2 + \dots + \lambda_n) - A_1$.

Інші коефіцієнти b_i і a_i пов'язані складними поліномами з A_i, B_i та λ_i і в даному випадку немає потреби їх наводити.

В якості контролюваної дії на нестационарність роботи системи виберемо струм статора ЕМП, а в якості вихідної величини — кутову швидкість ЕМП. Для спрощення вважатимемо, що у замкнутій системі слідкування зворотним зв'язком по ЕРС електромеханічного перетворювача можна знехтувати і момент опору залишається постійним. Тоді передатну функцію ЕМП можна записати у вигляді

$$W_{\text{ЕМП}}(s) = \frac{y}{u} = \frac{c_d \Phi}{Js} = \frac{b}{s}, \quad (3)$$

де $y = \omega$ (ω — кутова швидкість), $u = i_{\text{ст}}$ ($i_{\text{ст}}$ — струм статора ЕМП), Φ — магнітний потік ЕМП, c_d — конструктивний коефіцієнт ЕМП: $c_d = \frac{N p_n}{2\pi a}$, де N — кількість стержнів обмотки статора, p_n — кількість пар полюсів, a — кількість пар паралельних витків.

Таким чином, ідентифікації буде підлягати параметр $b = (c_d \Phi) / J$.

Порівнюючи (3) із передатною функцією (2), і виконавши відповідні перетворення, які наведено в [3] отримаємо

$$\begin{cases} b_1 = b, \\ a_1 = a_2 = \dots = 0; \\ \bar{a}_1 = a_1 + \lambda_1 = 0 + \lambda_1 = \lambda. \end{cases} \quad (4)$$

З урахуванням (4), побудуємо структурну схему спостережного засобу, який зображено на рис. 1.

Враховуючи запропонований спостережний засіб ідентифікації параметра $b = c_d \Phi / J$, побудуємо структурну схему адаптивної системи автоматичного контролю кутових швидкостей ЕМП, яка показана на рис. 2. Як видно з рис. 2 спостережний засіб ідентифікації ввімкнено в допоміжний ЕМП, який постійно підстроюється під головний ЕМП. В запропонованому спостережному засобі ідентифікації β — коефіцієнт підсилення ланцюга адаптації, за допомогою якого здійснюється оптимізація процесу ідентифікації параметрів ЕМП.

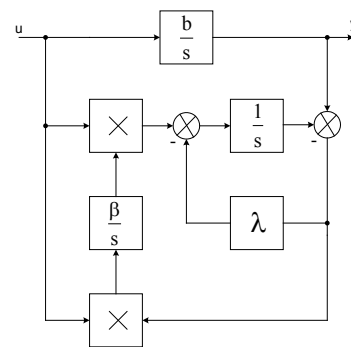


Рис. 1. Структурна схема спостережного засобу ідентифікації

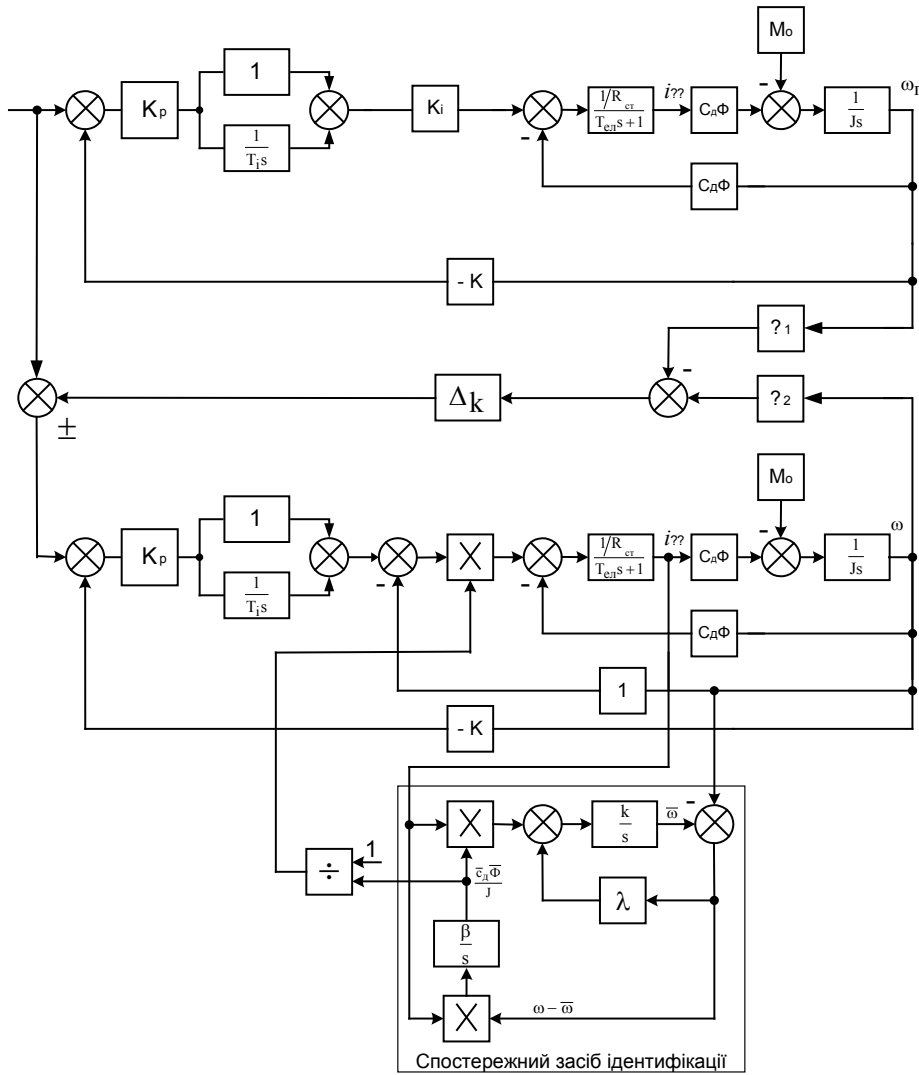


Рис. 2. Адаптивна система автоматичного контролю кутових швидкостей ЕМП із спостережним засобом ідентифікації

Алгоритм роботи спостережного засобу ідентифікації описується виразами

$$\frac{d\bar{\omega}}{dt} = \frac{\bar{c}_d \bar{\Phi}}{J} i_{cr} + \lambda k (\omega - \bar{\omega}), \tag{5}$$

$$\frac{d(\bar{c}_d \bar{\Phi} / J)}{dt} = \beta k i_{cr} (\omega - \bar{\omega}), \tag{6}$$

де k — передатний коефіцієнт за кутовою швидкістю ($k = U/\omega$).

Оскільки початковими умовами роботи системи автоматичного контролю є $\bar{\omega}(0) = 0$ та $(\bar{c}_d \bar{\Phi} / J)(0) = 0$ і, якщо ввести позначення $e = \omega - \bar{\omega}$ та $v = c_d \Phi / J - (\bar{c}_d \bar{\Phi} / J)$, а також взяти до уваги, що $d\omega/dt = i_{cr} c_d \Phi / J$, то алгоритм роботи спостережного засобу в координатах e і v можна описати рівняннями

$$\frac{de}{dt} = v i_{cr} - \lambda k e, \tag{7}$$

$$\frac{dv}{dt} = -\beta k i_{cr} e. \tag{8}$$

При цьому початкові умови приймаються $e(0) = 0$ та $v(0) = c_d \Phi / J$ — і на основі гіпотези квазістационарності вважається, що на часовому інтервалі, який відповідає перехідному процесові в спостережному засобі, зміна параметрів $c_d \Phi / J$ відсутня.

Стійкість спостережного засобу при ідентифікації параметрів $\bar{c}_d \bar{\Phi} / J$ може бути установлена за допомогою другого методу Ляпунова. Для перевірки умови асимптотичної стійкості спостережного засобу функція Ляпунова розглядається у вигляді додатно визначеної квадратичної форми помилки e і параметра v [4]:

$$V = \frac{1}{2} e^2 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{\beta k}. \tag{9}$$

Повна похідна функції (9) за часом на основі (7) та (8) буде дорівнювати $dV/dt = -\lambda k e^2$.

Функція dV/dt повинна бути від'ємно визначеною в просторі змінних e та v , тобто $\frac{dV}{dt}(e, v)|_{\substack{e=0 \\ v=0}} = 0$. Для доведення того, що при $e \equiv 0$ отримаємо $v \equiv 0$, розглянемо систему рівнянь (7) і (8) при тотожній рівності нулю помилки e . Оскільки при цьому похідна помилки за часом дорівнює нулю, то система рівнянь (7), (8) набуде вигляду

$$0 = v i_{ct}, \quad \frac{dv}{dt} = 0. \tag{10}$$

Оскільки i_{ct} не дорівнює нулю, то з виразу (10) очевидна тотожна рівність нулю параметра v . Отже, функція dV/dt є від'ємно визначеною і при побудові спостережного засобу відповідно виразам (5) і (6) величина $(\bar{c}_d \bar{\Phi} / J)(t)$ асимптотично наближається до параметрів $c_d \Phi / J$. Збіжність процесу оцінювання залежить від коефіцієнтів λ і β , які практично завжди можуть бути вибраними за умови протікання в системі процесу оцінювання швидше головного перехідного процесу, виходячи з вимог завадостійкості системи.

Оцінювання $(\bar{c}_d \bar{\Phi} / J)$ параметрів $c_d \Phi / J$ використовується для автоматичного налаштування передатного коефіцієнта ПІ-регулятора швидкості шляхом домноження його на непередбачуванні відхилення моменту інерції, що виникають.

Результати роботи системи автоматичного контролю кутових швидкостей ЕМП без використання розробленого спостережного засобу ідентифікації показано на рис. 3а [2].

Роботу системи автоматичного контролю кутових швидкостей ЕМП без використання розробленого спостережного засобу ідентифікації при відхиленні електромагнітних і механічних параметрів ЕМП (постійних часу) від номінальних значень в процесі експлуатації показано на рис. 3б [2].

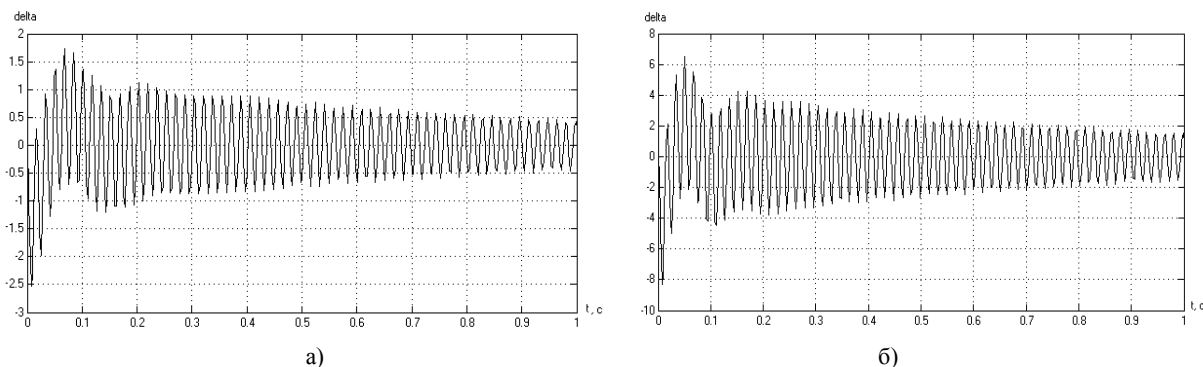


Рис. 3. Процес автоматичного контролю кутових швидкостей ЕМП: а) — без спостережного засобу ідентифікації; б) — при зміні постійних часу ЕМП без спостережного засобу ідентифікації

Результати комп'ютерного моделювання запропонованої адаптивної системи автоматичного контролю кутових швидкостей із спостережним засобом ідентифікації (див. рис. 2) за допомогою

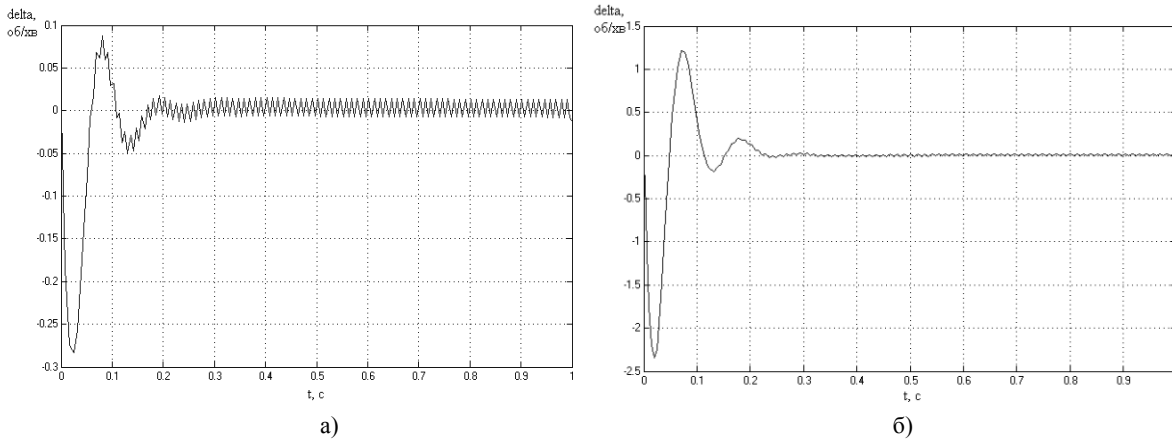


Рис. 4. Процес синхронізації кутових швидкостей ЕМП: а) з використанням спостережного засобу ідентифікації; б) при максимальному відхиленні електромагнітних і механічних параметрів ЕМП з системою адаптації

пакета MATLAB в середовищі SIMULINK показано на рис. 4а, а при суттєвому відхиленні електромагнітних і механічних параметрів ЕМП від номінальних значень — на рис. 4б.

При порівнянні результатів роботи існуючої адаптивної системи (рис. 3а, б) із запропонованою системою (рис. 4а, б) видно, що адаптивна система із спостережним засобом ідентифікації дозволяє підвищити точність синхронізації у 3—4 рази як в статичному, так і в динамічному режимах роботи зі зміною частот обертання ЕМП від 0 до 6000 об/хв.

Як видно з рис. 4, максимальна зведена похибка автоматичного контролю кутових швидкостей ЕМП із спостережним засобом ідентифікації не перевищує 0,07 %.

Висновки

Розроблено адаптивну систему із спостережним засобом ідентифікації, що має практично постійні динамічні характеристики завдяки зміні передатного коефіцієнта ПІ-регулятора, на який домножуються відхилення постійних часу допоміжного ЕМП. Система здатна працювати за непередбачуваних змін моменту інерції ЕМП під час автоматичного контролю їх кутових швидкостей. Розроблена система дозволяє підвищити точність синхронізації кутових швидкостей в 3—4 рази в діапазоні роботи від 0 до 6 000 об/хв за рахунок використання запропонованого спостережного засобу ідентифікації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Барышников В. Д., Куликов С. Н. Автоматизированные электроприводы машин бумагоделательного производства. — Л.: Энергоиздат, 1982. — 144 с.
2. Поджаренко В. О., Кучерук В. Ю., Васілевський О. М. Математичне моделювання системи адаптивного керування з синхронізацією частот обертання асинхронних двигунів // Вісник національного університету «Львівська політехніка». Серія: «Автоматика, вимірювання та керування». — 2003. — № 475. — С. 77—82.
3. Кузовков Н. Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. — М.: Машиностроение, 1986. — 184 с.
4. Мысливец Н. Л., Сабинин Ю. А. Самонастраивающийся электропривод промышленного робота, построенный на базе системы подчиненного регулирования // Электропривод. — 1987. — Вып. 8 (61). — С. 23—25.

Чабанюк Юрій Анатолійович — здобувач, **Сопрунюк Петро Маркіянович** — керівник відділу електричних вимірювань фізичних величин.

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України;

Васілевський Олександр Миколайович — старший викладач кафедри метрології та промислової автоматики.

Вінницький національний технічний університет