

# ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СТАЛОЇ ЧАСУ ЯКОРЯ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ГРАДІЄНТНИМ МЕТОДОМ

Толочко О.І., проф., Каленчук Я.О., студ.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

**Вступ.** Існує багато методів синтезу замкнених систем керування електроприводами постійного та змінного струмів. Для електроприводів постійного струму найчастіше застосовують метод підпорядкованого регулювання координат [1]. При його використанні синтез регуляторів зазвичай здійснюють, вважаючи усі параметри об'єкту регулювання точно визначеними і постійними. Насправді в реальних умовах вони можуть змінюватися. Типовими прикладами зміни параметрів є збільшення активних опорів обмоток двигунів при їх нагріванні, зміна індуктивностей при наявності ефекту насичення сталі, зміна моменту інерції приводу при взаємодії механічної частини двигуна з виконавчим механізмом, який двигун приводить до руху. Нехтування цими явищами при синтезі регуляторів приводить до погіршення статичних та динамічних властивостей електроприводу. Позбавитися від цього недоліку можна шляхом on-line ідентифікації змінюваних параметрів та застосування адаптивних регуляторів, які підлаштовуються до змін в об'єкті, використовуючи інформацію, отриману пристроями ідентифікації.

Одним із відомих методів ідентифікації сталої часу є градієнтний метод. При застосуванні його в конкретних системах автоматизованого електроприводу виникає багато питань, тому що в літературних джерелах [2, 3] цей метод викладено в загальному вигляді або на абстрактних прикладах. До того ж і деякі параметри алгоритму ідентифікації обираються інтуїтивно та визначаються попередньо при виконанні модельного експерименту, а потім уточнюються при виконанні експериментальних досліджень.

**Мета роботи.** Синтезувати пристрій ідентифікації електромагнітної сталої часу якорного кола двигуна постійного струму градієнтним методом.

**Матеріали і результати досліджень.**

Розглянемо сутність градієнтного методу.

Нехай розглядається лінійний неперервний процес, який описується передавальною функцією (ПФ):

$$G_p(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_0 + b_1s + \dots + b_ms^m}{1 + a_1s + \dots + a_ns^n}. \quad (1)$$

Множину параметрів досліджуваного процесу складають коефіцієнти чисельника та знаменника передаточної функції (1):

$$\theta = [a_1 \dots a_n \quad b_0, b_1 \dots b_m]. \quad (2)$$

Градiєнтний метод, як i бiльшiсть iнших методiв iдентифiкацiї, будується за принципом порiвняння дослiджуваного процесу з його моделлю та використання похибки оцiнювання для формування закону iдентифiкацiї, тобто модель має ПФ, iдентичну ПФ об'єкта, але не з дiйсними, а оцiненими параметрами:

$$G_M(s) = \frac{\hat{y}(s)}{u(s)} = \frac{B_M(s)}{A_M(s)} = \frac{\hat{b}_0 + \hat{b}_1 s + \dots + \hat{b}_m s^m}{1 + \hat{a}_1 s + \dots + \hat{a}_n s^n}. \quad (3)$$

де

$$\hat{\theta} = [\hat{a}_1 \dots \hat{a}_n \quad \hat{b}_0, \hat{b}_1 \dots \hat{b}_m] \quad (4)$$

– множина оцiнюваних параметрiв, а  $\hat{y}$  – оцiнене значення вихiдного сигналу об'єкта.

Рiзниця вихiдних сигналiв дослiджуваного процесу  $y(s)$  i моделi спостереження  $\hat{y}(s)$  формує похибку оцiнювання

$$e(s) = \tilde{y}(s) = y(s) - \hat{y}(s) = y(s) - \frac{B_M(s)}{A_M(s)} u(s), \quad (5)$$

яка застосовується для формування алгоритму iдентифiкацiї, як це показано на рис. 1.

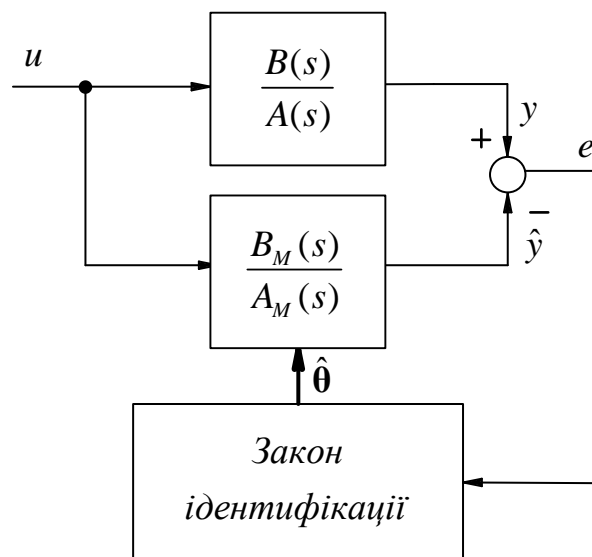


Рисунок 1 – Структура системи iдентифiкацiї з використанням похибки оцiнювання вихiдного сигналу

Завданням iдентифiкацiї є зведення похибки оцiнювання до мiнiмального рiвня.

В алгоритм iдентифiкацiї часто закладають iнтегральний квадратичний критерiй мiнiмiзацiї:

$$V = \frac{1}{t} \int_0^t e^2(\hat{\theta}, t) dt \rightarrow \min. \quad (6)$$

Доведено, що для оптимізації функціоналу (6) необхідно кожний зі змінюваних параметрів ідентифікувати згідно з диференціальним рівнянням:

$$\frac{d\hat{\theta}_i}{dt} = -k_i \frac{\partial}{\partial \theta_i} e^2(\hat{\theta}, t) = -2k_i e(\hat{\theta}, t) \frac{\partial e(\hat{\theta}, t)}{\partial \hat{\theta}_i}, \quad (7)$$

де

$k_i > 0$  – підлаштовуваний коефіцієнт підсилення;

$\frac{\partial e(\hat{\theta}, t)}{\partial \hat{\theta}_i}$  – чутливість похибки оцінювання до зміни оцінюваного параметру.

Із виразу (7) випливає, що швидкість зміни оцінюваного параметра  $\theta_i$  пропорційна добутку похибки оцінювання та її чутливості до зміни оцінюваного параметру. підстановкою у вираз чутливості рівняння похибки (5) отримуємо:

$$\frac{\partial e}{\partial \theta_i} = \frac{\partial (y - \hat{y})}{\partial \theta_i} = -\frac{\partial \hat{y}}{\partial \theta_i} = \frac{\partial}{\partial \theta_i} G_M(s)u(s). \quad (8)$$

При розв'язанні диференціального рівняння (7) необхідно задати початкове наближення оцінюваного параметру

$$\theta_i(0) = \theta_{i0}. \quad (9)$$

Розглянемо, як можна ідентифікувати електромагнітну сталу часу якоря двигуна постійного струму (ДПС) за цією методикою. Структурна схема ДПС у відносних одиницях (в.о.) наведена на рис. 2.

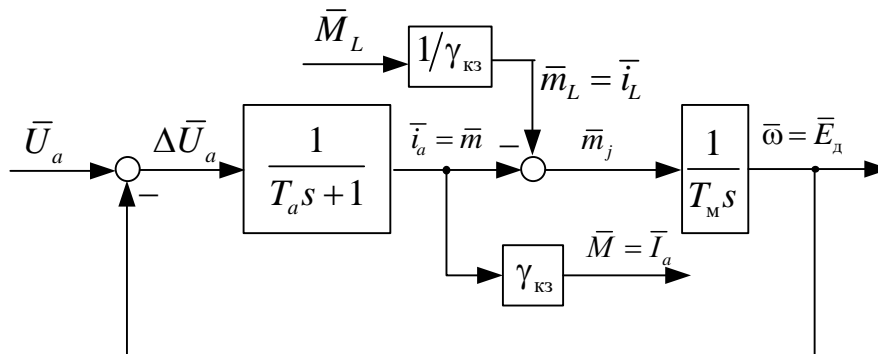


Рисунок 2 – Структурна схема двигуна постійного струму у відносних одиницях

На рис. 2 використані такі позначення:  $U_a(t), I_a(t)$  – напруга та струм якоря;  $\Delta U_a(t)$  – падіння напруги у якірному колі;  $E_d(t), \omega$  – електрорушійна сила та кутова швидкість двигуна;  $M(t), M_c(t), M_j(t)$  – електромагнітний момент двигуна, момент статичного опору та динамічний момент;  $T_a, T_M$  – електромагнітна стала часу якірного кола та електромеханічна стала часу електроприводу відповідно;  $\gamma_{кз}$  – кратність струму та моменту короткого замикання.

Система в.о. визначається залежностями:

$$\bar{\omega} = \frac{\omega}{\omega_0}, \quad \bar{U} = \frac{U}{U_{an}}, \quad \bar{E}_d = \frac{E_d}{U_{an}}, \quad \bar{I}_a = \frac{I_a}{I_{кз}}, \quad \bar{M} = \frac{M}{M_{кз}}, \quad \bar{i}_a = \frac{I_a}{I_{кз}}, \quad \bar{m} = \frac{M}{M_{кз}},$$

де  $\omega_0$  – швидкість ідеального холостого ходу;  $U_{an}, I_{an}, M_n$  – номінальні значення напруги та струму якоря і моменту двигуна;  $I_{кз}, M_{кз}$  – струм та момент короткого замикання.

ПФ ідентифікованого об'єкта та його моделі, призначеної для ідентифікації сталої часу якоря згідно з ПФ (1) і (3) мають вигляд

$$W_p(s) \frac{\bar{i}_a(s)}{\Delta \bar{U}_a(s)} = \frac{1}{T_a s + 1}, \quad (10)$$

$$W_m(s) = \frac{\hat{i}_a(s)}{\Delta \bar{U}_a(s)} = \frac{1}{\hat{T}_a s + 1}. \quad (11)$$

Тоді похибка оцінювання струму якоря визначається виразом

$$e_i = \bar{i}_a - \hat{i}_a = \Delta \bar{U}_a \left( \frac{1}{T_a s + 1} - \frac{1}{\hat{T}_a s + 1} \right), \quad (12)$$

з якого можна знайти функцію чутливості:

$$\frac{\partial e_i}{\partial \hat{T}_a} = -\Delta \bar{U}_a \frac{\partial}{\partial \hat{T}_a} \left( \frac{1}{\hat{T}_a s + 1} \right) = \Delta \bar{U}_a \frac{s}{(\hat{T}_a s + 1)^2} = \hat{i}_a \frac{s}{\hat{T}_a s + 1}. \quad (13)$$

У виразах (10) та (13) оцінка сталої часу якоря  $\hat{T}_a$  є змінною величиною. Тому модель об'єкта необхідно деталізувати, виконавши еквівалентне перетворення за формулою

$$W_m(s) = \frac{1}{\hat{T}_a s + 1} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\hat{T}_a} s},$$

з якої видно, що модель об'єкту регулювання можна представити у вигляді інтегратора зі змінним коефіцієнтом інтегрування, охопленими від'ємним одиничним зворотним зв'язком, як це показано на структурній схемі рис. 3.

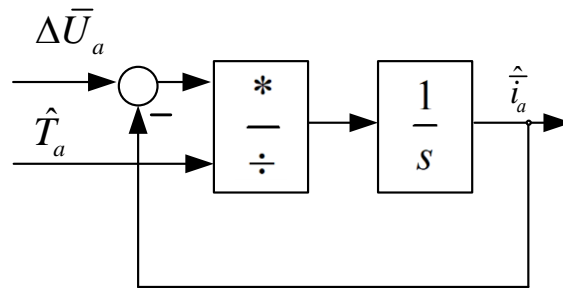


Рисунок 3 – Структурна схема моделі якорного кола зі змінюваною ідентифікованою сталою часу якоря

Структурна схема ДПС з ідентифікацією  $\hat{T}_a$  представлена на рис. 4. Уточнення значення ідентифікованих параметрів при використанні градієнтних методів відбувається успішно тільки при зміні вихідного сигналу та його оцінки, тому що похідна від оцінюваного параметру залежить від функції чутливості, яка при постійному сигналі дорівнює 0. Тому до керуючого сигналу додають деякий високочастотний періодичний тестувальний сигнал з малою амплітудою (на рис. 4 це сигнал

$$\Delta U_{test} = \Delta U_m \sin(2\pi f_{test} t). \quad (14)$$

Параметри тестового сигналу визначаються при виконанні модельного експерименту. Наприклад, для досліджуваної системи встановлено, що найкраща швидкодія процесу ідентифікації досягається при частоті тестового сигналу 44 Гц із амплітудою 2 % від номінальної напруги якоря. При меншій амплітуді тестового сигналу ідентифікація перестає працювати, оскільки додані коливання є недостатніми для формування суттєвої величини функції чутливості. При обраних параметрах тестового сигналу треба підібрати величину коефіцієнту  $k_i$ .

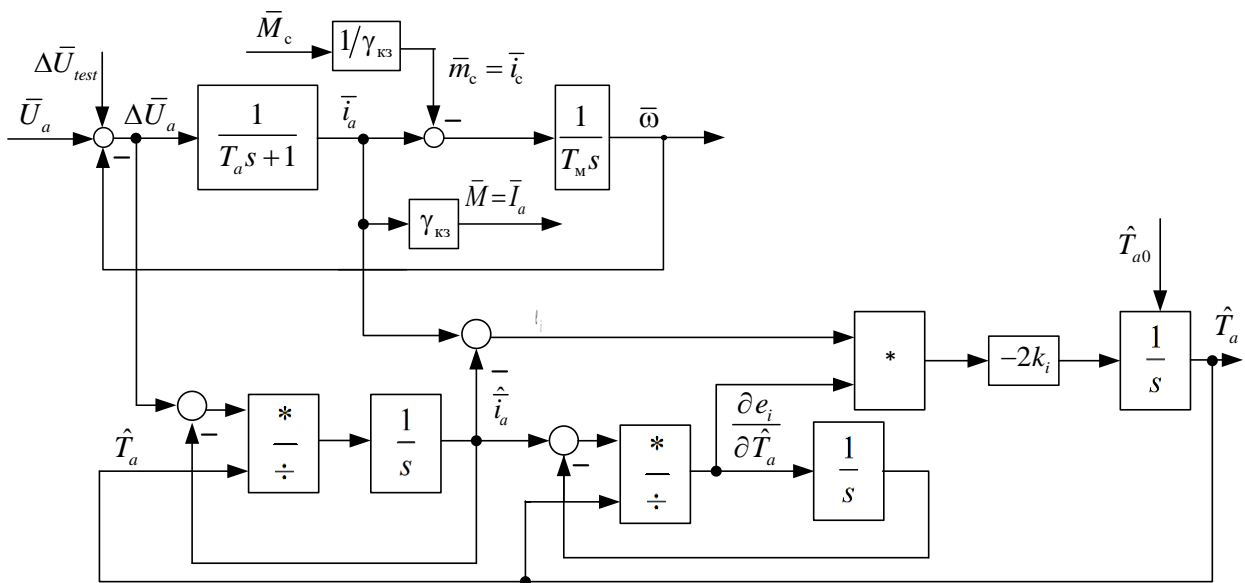


Рисунок 4 – Структурна схема двигуна постійного струму з ідентифікацією електромагнітної сталої часу якорного кола

На рис. 5 показані перехідні процеси напруги якоря з доданим до нього тестовим сигналом (який по суті є сигналом завдання на швидкість), струму якоря і швидкості двигуна, а на рис. 6 – перехідні процеси уточнення ідентифікованої сталої часу при різних величинах її початкового значення при  $k_i = 22$ .

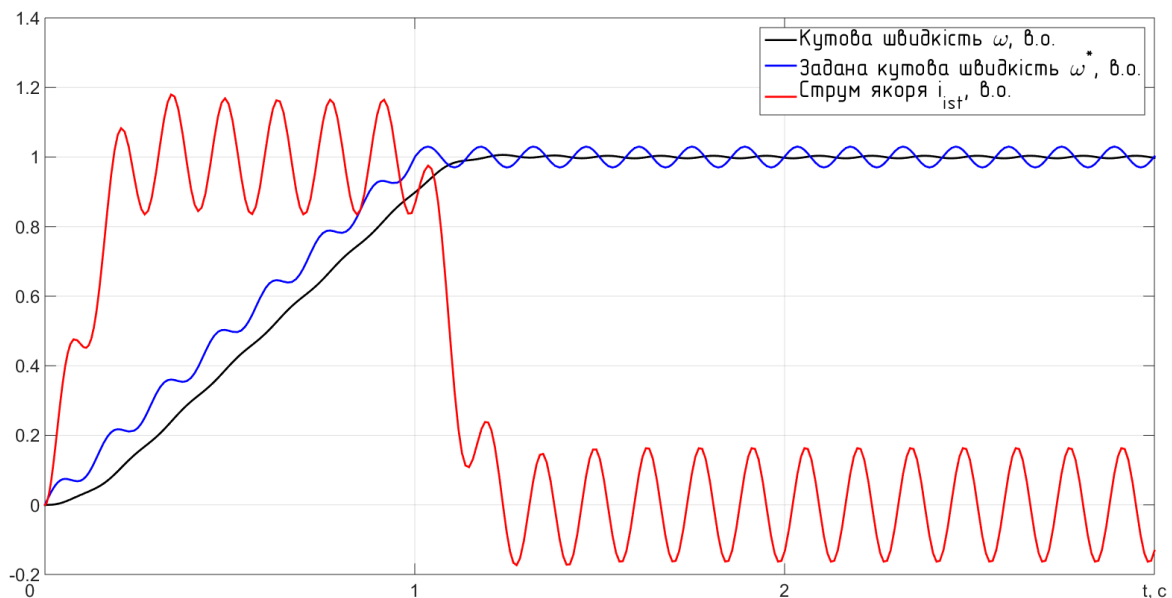


Рисунок 5 – перехідні процеси струму та кутвої швидкості ДПС при лінійній зміні напруги якоря з доданим до нього тестовим сигналом

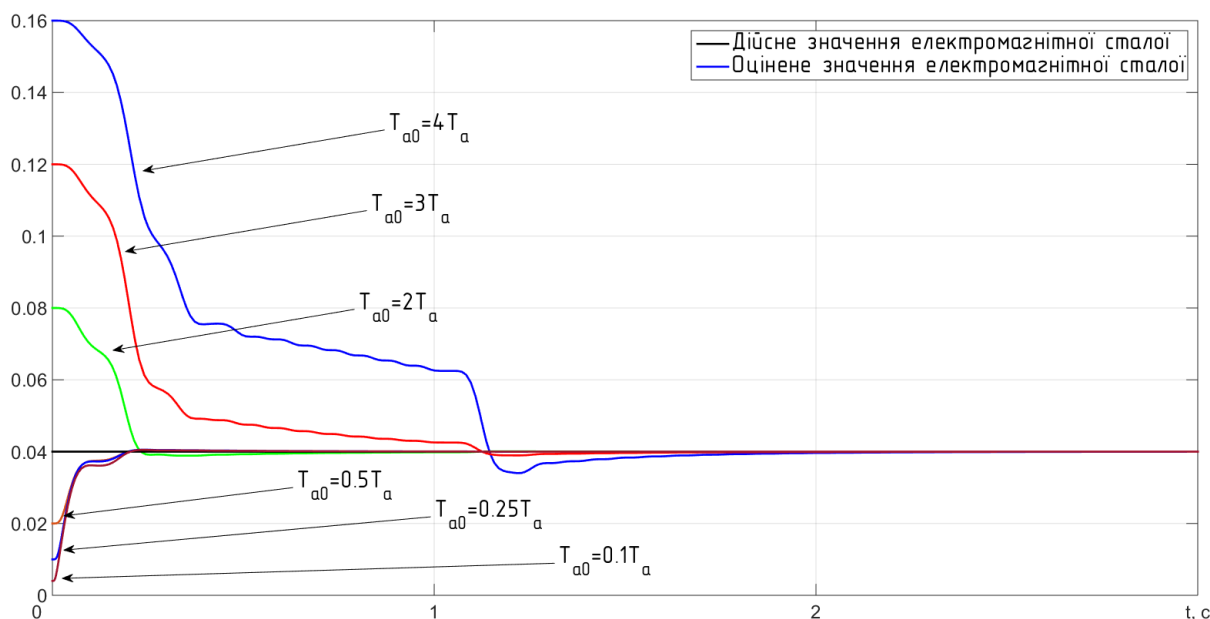


Рисунок 5 – Перехідні процеси уточнення різних початкових наближень ідентифікованої сталої часу якоря

Із результатів дослідження (рис. 4, 5) випливає, що ідентифікація електромагнітної сталої часу проводиться успішно. При збільшенні різниці між істинним значенням та початковим наближенням ідентифікованої сталої часу збільшується час ідентифікації, коли істинне значення є меншим за початкове наближення. У випадку, коли початкове наближення менше за істинне значення ідентифікація триває 0.3 с не залежно від початкової умови.

В реальній системі електроприводу постійного струму з живленням від тиристорного перетворювача (ТП) можна не застосовувати додатковий тестовий сигнал, тому що напруга якоря отримує у своєму складі крім корисної складової випадкові завади, які приблизно можна вважати білим шумом,

**Висновок.** Виконані дослідження підтверджують ефективність застосування градієнтного методу для ідентифікації електромагнітної сталої часу якорного кола двигуна постійного струму навіть при значних відхиленнях початкового наближення. Показано, що ідентифікація виконується значно швидше, якщо початкове наближення сталої часу є меншим за істинне значення. Визначено орієнтовний діапазон параметрів тестового сигналу та коефіцієнту ідентифікації.

#### Перелік посилань

1. D. Schröder. Elektrische Antriebe. Regelung von elektrischen Antrieben. 3. Auflage. – München: Springer, 2009, 1358 S.
2. Ljung L. System Identification: Theorie for the User. – Prentice-Hall: Upper Saddle River NJ, – 1999, 432 P.
3. Rolf Isermann. Identifikation dynamischer Systeme 2. – Darmstadt: Springer-Lehrbuch, – 1992, 346 S.