

УДК 62-83-52

**ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕГУЛЮВАННЯ МОМЕНТОУТВОРЮЮЧОГО СТРУМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДА**

**С. С. Старостін**

Донецький національний технічний університет  
вул. Артема, 58, м. Донецьк, 83000, Україна. E-mail: sergii.starostin@dtf.donntu.edu.ua

Розглянуто підхід до ідентифікації динамічних характеристик контуру регулювання моменту утворюючого струму двигуна. Ідентифікацію базовано на аналізі дискретної імпульсної перехідної функції. Подано вирази для визначення параметрів цифрових регуляторів швидкості електропривода при будь-якій конфігурації системи регулювання. Коректність виконаних розробок перевірено за допомогою промислової системи електропривода.

**Ключові слова:** електропривод, моменту утворюючий струм, динаміка, ідентифікація.

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОМЕНТООБРАЗУЮЩЕГО ТОКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

**С. С. Старостин**

Донецкий национальный технический университет  
ул. Артема, 58, г. Донецк, 83000, Украина. E-mail: sergii.starostin@dtf.donntu.edu.ua

Рассмотрен подход к идентификации динамических характеристик контура регулирования моментобразующего тока двигателя. Идентификация основана на анализе дискретной импульсной переходной функции. Приведены выражения для определения параметров цифровых регуляторов скорости электропривода при любой конфигурации системы регулирования. Корректность выполненных разработок проверена с помощью промышленной системы электропривода.

**Ключевые слова:** электропривод, моментобразующий ток, динамика, идентификация.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Більшість розробок систем електропривода виходить зі спрощеного відображення динамічних властивостей регулювання моменту утворюючого струму на основі неперервної аперіодичної або коливальної ланки без обґрунтування сталої часу такої ланки. При цьому результати синтезу систем регулювання не можуть бути безпосередньо застосовано при параметризації мікропроцесорних контролерів, які функціонують з часовою дискретністю.

Можливо виконувати розробку систем електропривода безпосередньо як дискретних систем регулювання на базі відповідних математичних моделей силових перетворювачів електроенергії [1]. Між тим, у промислових системах електропривода у більшості випадків немає можливості впливати на динамічні властивості регулювання моменту утворюючої компоненти струму електродвигуна, але й відсутня інформація щодо цих властивостей. У таких умовах цілеспрямоване визначення необхідних параметрів регуляторів, що забезпечують технологічні функції електропривода, потребує експериментальної ідентифікації динамічних характеристик формування обертового моменту електродвигуна та врахування дискретності функціонування відповідних регуляторів. Цьому приділено замало уваги, що обумовлює необхідність вирішення такої задачі.

Метою роботи є визначення підходу до ідентифікації динамічних характеристик утворення обертового моменту в системі електропривода та експериментальна перевірка коректності результатів синтезу дискретних регуляторів швидкості електропривода.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.**

Дискретні властивості типової системи електропривода з цифровим регулюванням характеризує рис. 1. Особливості функціонування системи відображено імпульсними елементами з інтервалами  $T_i$  та  $T_\omega$ , що характеризує часову дискретність функціонування відповідно до контуру регулювання струму (КРС) та регулятора швидкості (РШ). Зазвичай інтервали дискретності в системі регулювання є кратними, тобто  $T_\omega = vT_i$  ( $v$  – ціле число). Зв'язок обертового моменту двигуна  $M$  з моменту утворюючим струмом  $i$  враховує конструктивний параметр двигуна  $C_M$ . Передавальна функція  $W_\omega$  дорівнює  $1/(Jp)$ , де  $J$  – сумарний момент інерції системи електропривода. У ланки регулятора швидкості та до контуру регулювання струму додано передавальні функції екстраполяторів нульового порядку  $W_{\omega 0} = [1 - \exp(-pT_\omega)]/p$  і  $W_{i0} = [1 - \exp(-pT_i)]/p$ . У схемі, завдяки ланці з передавальною функцією  $e^{-pT_i}$ , відображено можливий випадок затримки при формуванні завдання на струм на один інтервал дискретності регулювання струму  $T_i$ , пов'язаною з послідовністю реалізації алгоритмів регулювання струму та швидкості.

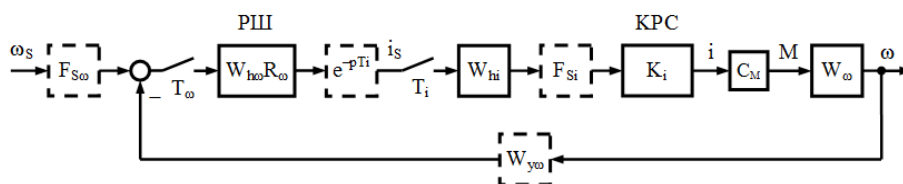


Рисунок 1 – Структурна схема системи регулювання швидкості електропривода з урахуванням дискретності функціонування

У схемі (рис. 1) також ураховано можливі випадки застосування фільтрів відносно завдань на швидкість (ланка  $F_{S\omega}$ ) та струм (ланка  $F_{Si}$ ) і варіант регулювання середньої величини швидкості електропривода, що відображає ланка усереднення з передавальною функцією  $W_{y\omega} = [1 - \exp(-pT_\omega)] / T_\omega p$ . Систему (рис. 1) подано в нормованому вигляді при одиничному коефіцієнті зворотного зв'язку, що є характерним для реалізації систем електропривода з цифровим регулюванням.

Доцільно виходити з аперіодичного регулювання середньої величини моментотворюючого струму, яке узагальнено характеризує будь-які динамічні властивості регулювання струму, що обґрунтовано в [2]. При цьому, аналогічно до розглянутого в [2], можна визначити, що динамічні властивості замкненого контуру регулювання середнього струму відповідатимуть дискретній передавальній функції

$$K_{ia}(z_i) = \frac{\bar{i}(z_i)}{i_s(z_i)} = \frac{a_1 z_i^{-1} + a_2 z_i^{-2} + a_3 z_i^{-3}}{1 - d_a z_i^{-1}}, \quad (1)$$

де  $z_i = \exp(T_i p)$  – оператор  $z$ -перетворення для інтервалу дискретності  $T_i$ ;  $d_a = \exp(-T_i/T_a)$ ;  $T_a$  – стала часу аперіодичного регулювання струму.

$$a_1 = \frac{(1-d_a)f_1}{f_\Sigma}; \quad a_2 = \frac{(1-d_a)f_2}{f_\Sigma}; \quad a_3 = \frac{(1-d_a)f_3}{f_\Sigma}, \quad (2)$$

де  $f_\Sigma = f_1 + f_2 + f_3$ .

Параметри  $f_1, f_2, f_3$  характеризують динамічні властивості об'єкту в контурі регулювання струму. З практичної точки зору ці параметри можна визначити експериментально, що розглянуто далі.

З урахуванням передавальної функції (1) та виразів (2) коефіцієнт передачі  $k_{R\omega}$  пропорційного регулятора швидкості, що функціонує з інтервалом дискретності  $T_\omega = \nu T_i$ , відповідно до модульних критеріїв [3], дорівнює:

– при зворотному зв'язку за миттєвою швидкістю

$$k_{R\omega} = \frac{\nu f_\Sigma (1-d_a^\nu)}{k_J \{ \nu f_\Sigma (1-d_a^\nu) + 2 \cdot [f_1 d_a^\nu + f_2 + f_3 (2-d_a^\nu)] \}}; \quad (3)$$

– при зворотному зв'язку за середньою швидкістю

$$k_{R\omega} = \frac{\nu f_\Sigma (1-d_a^\nu)}{2 k_J \{ \nu f_\Sigma (1-d_a^\nu) + [f_1 d_a^\nu + f_2 + f_3 (2-d_a^\nu)] \}}; \quad (4)$$

де  $k_J = C_M T_\omega / J$ .

При наявності затримки у формуванні завдання на струм (рис. 1) коефіцієнт пропорційного регулятора швидкості визначають вирази:

– при зворотному зв'язку за миттєвою швидкістю

$$k_{R\omega} = \frac{\nu f_\Sigma (1-d_a^\nu)}{k_J \{ \nu f_\Sigma (1-d_a^\nu) + 2 [f_1 + f_2 (2-d_a^\nu) + f_3 (3-2d_a^\nu)] \}}; \quad (5)$$

– при зворотному зв'язку за середньою швидкістю

$$k_{R\omega} = \frac{\nu f_\Sigma (1-d_a^\nu)}{2 k_J [ \nu f_\Sigma (1-d_a^\nu) + f_1 + f_2 (2-d_a^\nu) + f_3 (3-2d_a^\nu) ]}. \quad (6)$$

При реалізації пропорційно-інтегрального регулятора інтегральна частина регулятора швидкості згідно з модульним критерієм [3] визначається сталою часу

$$T_{R\omega} = \left( \frac{2}{k_J k_{R\omega}} - 1 \right) T_\omega. \quad (7)$$

Отже, для визначення параметрів регулятора швидкості необхідно мати інформацію щодо параметрів  $f_1, f_2, f_3$  і  $d_a$ , які характеризують динамічні властивості регулювання моментотворюючого струму згідно з передавальною функцією (1).

При настройці регулятора струму відповідно до модульного критерію очікуватимемо перехідну функцію, яку відображає східчаста лінія  $h_b$  на рис. 2.

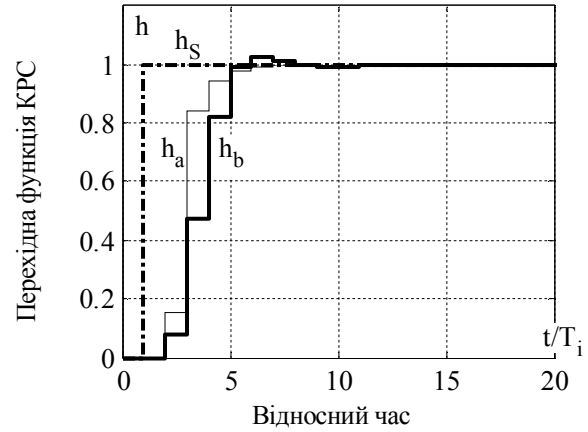


Рисунок 2 – Перехідні функції контуру регулювання струму

Перехідна функція  $h_b$  відповідає передавальній функції дискретної коливальної ланки

$$K_{ib}(z_i) = \frac{b_1 z_i^{-1} + b_2 z_i^{-2} + b_3 z_i^{-3}}{1 - (3b_2 + 5b_3)z_i^{-1} + b_2 z_i^{-2} + b_3 z_i^{-3}}, \quad (8)$$

де  $b_1 = f_1/f_b$ ;  $b_2 = f_2/f_b$ ;  $b_3 = f_3/f_b$ ;

$$f_b = f_1 + 3f_2 + 5f_3.$$

З урахуванням обґрунтувань, розглянутих у [2], можна визначити, що швидкодія аперіодичного регулювання струму, наближена до швидкодії за модульним критерієм, досягається при

$$d_a = \frac{f_2 + 2f_3}{f_1 + 2f_2 + 3f_3}. \quad (9)$$

Такий аперіодичний процес на рис. 2 відображає лінія  $h_a$ .

Відзначимо, що при  $d_a = 0$  матимемо регулювання струму з максимально можливою швидкодією [2].

Параметри  $f_1, f_2, f_3$  та  $d_a$ , що обумовлюють динамічні властивості регулювання моментотворюючого струму та мають бути враховані при визначенні параметрів регулятора швидкості на основі формул (3)–(7), можуть бути знайдені експериментально на основі аналізу перехідного процесу регулювання струму при стрибку завдання.

В основу аналізу може бути покладено імпульсну перехідну функцію  $g$ , яку в загальному вигляді в  $k$ -тий момент дискретності визначає рівняння

$$g[k] = q_k - \sum_{i=1}^k p_i g[k-i]. \quad (10)$$

У рівнянні (10) коефіцієнти  $p$  та  $q$  для коливального процесу відповідатимуть таким виразам:  $q_1 = b_1$ ;

$q_2 = b_2; q_3 = b_3; p_1 = -(3b_2 + 5b_3); p_2 = b_2; p_3 = b_3$ . Щодо аперіодичного процесу, то враховуватимемо відповідності:  $q_1 = a_1, q_2 = a_2, q_3 = a_3, p_1 = d_a$ .

У результаті з урахуванням дискретних значень імпульсної перехідної функції на початку процесу регулювання отримуємо наступні вирази:

– для коливального процесу, що відповідає модульному критерію:

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= g_{[1]}; & b_2 &= \frac{g_{[2]} + 5(g_{[2]}^2 - g_{[1]}g_{[3]})}{3g_{[1]} + 5(g_{[1]}^2 + g_{[2]}) + 1}; \\ b_3 &= \frac{g_{[1]}g_{[2]} - 3(g_{[2]}^2 - g_{[1]}g_{[3]}) + g_{[3]}}{3g_{[1]} + 5(g_{[1]}^2 + g_{[2]}) + 1}; \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

– для аперіодичного процесу з будь-якою швидкістю:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= g_{[1]}; & a_2 &= \frac{g_{[2]}g_{[3]} - g_{[1]}g_{[4]}}{g_{[3]}}; \\ a_3 &= \frac{g_{[3]}^2 - g_{[2]}g_{[4]}}{g_{[3]}}; & d_a &= \frac{g_{[4]}}{g_{[3]}}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Розглянутий підхід було апробовано за допомогою системи електропривода Simodrive 611D [4] із синхронним двигуном при частоті широтно-імпульсної модуляції 4 кГц та інтервалі дискретності регулювання струму  $T_i = 0,125$  мс з параметрами пропорційно-інтегрального регулятора струму: коефіцієнти пропорційної складової  $k_{Ri} = 65$  В/А і сталій інтегрування  $T_{Ri} = 1,8$  мс.

Експериментально отриманий процес регулювання струму при стрибку завдання  $i_{sq}$  характеризує східчаста лінія 1 на рис. 3. Ідентифікація коефіцієнтів передавальної функції (8) відповідно до виразів (11) дала результат, поданий на рис. 3 у вигляді лінії 2. Отже, отримані параметри динаміки процесу регулювання струму практично наближено до фактичних.

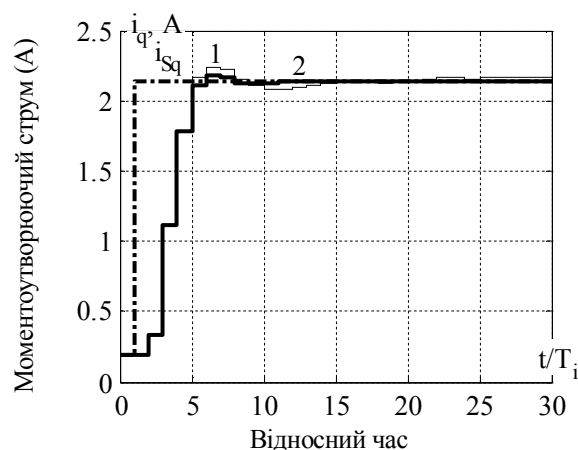


Рисунок 3 – Процес регулювання струму (1) при стрибку завдання та його апроксимація (2) за відсутності фільтра в каналі завдання

Між тим, при регулюванні швидкості для стабілізації функціонування системи електропривода Simodrive 611D у канал завдання струму додано режекторний фільтр з частотою режекції 1191,4 Гц. У результаті процес змінення струму при стрибку завдання має меншу швидкодію, більше перерегулювання та коливальність, про що свідчить

характерний результат експериментів, відображений лінією 1 на рис. 4. Це необхідно враховувати при визначенні параметрів регулятора швидкості.

Оскільки коливальний процес відрізняється від процесу, що відповідає модульному критерію, то доцільно розглянути можливість його апроксимації в аперіодичному вигляді. Результати визначення параметрів відповідної передавальної функції (1) за формулами (12) на основі експериментальних даних характеризує лінія 2 на рис. 4.

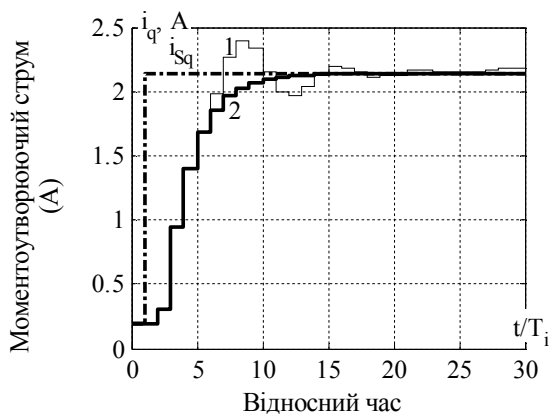


Рисунок 4 – Процес регулювання струму (1) при стрибку завдання та його апроксимація (2) за наявності фільтра в каналі завдання

Інтегральна оцінка за 20 інтервалів дискретності  $T_i$  свідчить, що похибка становить 2,2 %. Отже, таке наближене надання динамічних властивостей регулювання моментуотворюючого струму може бути застосовано при визначенні параметрів регулятора швидкості.

При експериментальній перевірці регулювання швидкості враховано, що синхронний двигун має вбудований синусно-косинусний датчик переміщень. Отже, має місце вимірювання середньої швидкості обертання. Крім того, експериментально встановлено наявність затримки при формуванні завдання на струм. Зазначені обставини обумовили використання виразу (6) при визначенні коефіцієнта пропорційного регулятора  $k_{R\omega}$ , з урахуванням чого на основі формули (7) розраховувалася стала інтегрування  $T_{R\omega}$  для пропорційно-інтегрального регулятора.

Було здійснено експерименти регулювання швидкості електропривода з пропорційним та пропорційно-інтегральним регуляторами за відсутності та наявності фільтра в каналі завдання на швидкість для трьох інтервалів дискретності регулювання швидкості  $T_\omega$  з кратністю  $\nu = 1, 2$  та 4 відносно інтервалу дискретності регулювання струму  $T_i$ .

Результати експериментів підтвердили коректність ідентифікації параметрів передавальної функції замкненого контуру моментуотворюючого струму та відповідного визначення параметрів регулятора швидкості електропривода. Низку характерних результатів подано на рис. 5, 6.

При застосуванні ПІ-регулятора швидкості без фільтра в каналі завдання (рис. 5) має місце перерегулювання, занижене на 11 % порівняно з теоретичними дослідженнями. За наявності фільтра відносно завдання зі сталою часу, що дорівнює сталій інтегрування регулятора швидкості  $T_{R\omega}$ , процеси регулювання практично відповідають очікуванню.

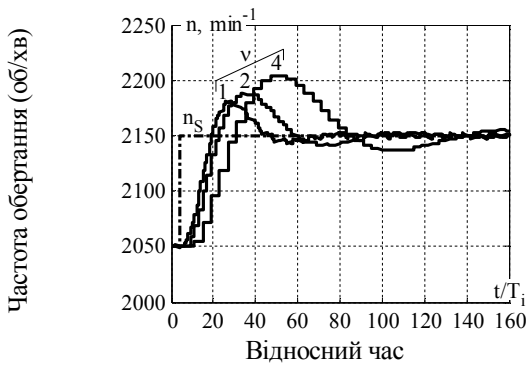


Рисунок 5 – Процес регулювання швидкості електропривода з ПІ-регулятором при стрибку завдання без фільтра в каналі завдання

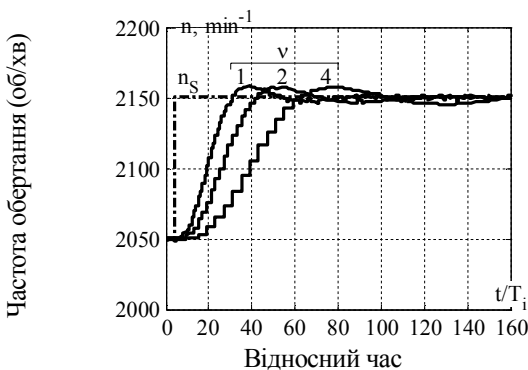


Рисунок 6 – Процес регулювання швидкості електропривода з ПІ-регулятором при стрибку завдання та наявності фільтра в каналі завдання

**ВИСНОВКИ.** Розроблено підхід до ідентифікації динамічних параметрів регулювання моментотворюючого струму електропривода, що сприяє використанню значень цих параметрів при синтезі інших регуляторів системи електропривода.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Старостін С.С. Урахування дискретних властивостей силових перетворювачів електроенергії при синтезі електромехатронних систем // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Сер. "Електротехніка, електроніка та електропривод". Тем. випуск 45 "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія та практика". – Харків: НТУ "ХПІ", 2005. – С. 348–351.

2. Старостін С.С., Толочко О.І. Дискретна математична модель контуру моментотворюючого струму для синтезу цифрових систем регулювання електромеханічних об'єктів // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія "Електротехніка і енергетика". – Донецьк: ДВНЗ "ДонНТУ", 2010. – Вип. 10 (180). – С. 177–182.

3. Крикунова К.Б., Старостін С.С. Комп'ютерна оптимізація цифрових регуляторів і спостерігачів стану електромеханічних об'єктів // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія "Електротехніка і енергетика". – Донецьк: ДВНЗ "ДонНТУ", 2009. – Вип. 9 (158). – С. 147–150.

4. SIMODRIVE 611 universal/E. Regelungskomponente für Drehzahlregelung und Positionieren. Funktionshandbuch (Ausgabe 06/2011). – Siemens AG, 2011. – 1010 p.

**IDENTIFICATION AND APPLICATION OF DYNAMIC PARAMETERS OF A TORQUE-CREATING CURRENT CONTROL OF ELECTRICAL DRIVES**

**S. Starostin**

Donetsk National Technical University

vul. Artema, 58, Donetsk, 83000, Ukraine. E-mail: sergii.starostin@dtf.donntu.edu.ua

The approach to the dynamic parameter identification of a torque-creating current control loop is considered. The identification is based on analyzing of the discrete-time impulse response function. The expressions for the parameter determination of digital speed regulators for any control system configuration are given. The correctness of performed developments has been tested by means of the industrial electrical drive system.

**Key words:** electrical drive, torque-creating current, dynamics, identification.

**REFERENCES**

1. Starostin S.S. Taking into Account of Power Converters Discrete-time Properties at Synthesis of Electromechatronic Systems // *Proceedings of National Technical University "Kharkov Polytechnical Institute". Thematic issue 45 "Problems of automated electrical drives. Theory and Practice"*. – 2005. – PP. 348–351. [in Ukrainian]

2. Starostin S.S., Tolochko O.I. Discrete-time Mathematics Model of a Torque-Creating Current Control Loop for the Synthesis of Digital Control Systems of Electromechanical Objects // *Proceedings of Donetsk National Technical University*. – 2010. – Iss. 10 (180). – PP. 177–182. [in Ukrainian]

3. Krikunova K.B, Starostin S.S. Computer-based Optimization of Digital Regulators and State-Space Observers of Electromechanical Objects // *Proceedings of Donetsk National Technical University*. – 2009. – Iss. 9 (158). – PP. 147–150. [in Ukrainian]

4. SIMODRIVE 611 universal/E. *Control Components for Closed-Loop Speed Control and Positioning. Function Manual* (06/2011 Edition). – Siemens AG, 2011. – 1010 p.

Стаття надійшла 23.07.2012.

Рекомендовано до друку  
к.т.н., доц. Каліновим А.П.