

УДК 621.313.1

ВИПРОБУВАННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДА З ІМІТАЦІЄЮ ТЕХНОЛОГІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

С. С. Старостін

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: sergii.starostin7@gmail.com

Розглянуто принципи імітації технологічного навантаження в процесі випробувань систем електропривода. Імітація здійснюється шляхом формування додаткового завдання на моментоутворюючий струм електро-двигуна, розрахованого на основі математичної моделі технологічного процесу. При цьому враховуються змінення механічного навантаження та моменту інерції механізму. Система регулювання швидкості електропривода функціонує аналогічно реальним умовам. Теоретичні підгрунтя перевірені за допомогою комп'ютерного моделювання. Визначено, що похибка імітації залежить від рівня швидкості електропривода та швидкості регулювання моментоутворюючого струму двигуна й при номінальній швидкості знаходиться в межах 1,5%. Продемонстровано коректність розглянутого підходу на прикладі функціонування установки з намотування металевієї смуги. Отримані результати дають підстави для їх практичного використання.

Ключові слова: електропривод, імітація навантаження, моделювання, аналіз.

ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ИМИТАЦИЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

С. С. Старостин

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: sergii.starostin7@gmail.com

Рассмотрены принципы имитации технологической нагрузки в процессе испытаний систем электропривода. Имитация осуществляется путем формирования дополнительного задания на моментобразующий ток электродвигателя, рассчитанного на основе математической модели технологического процесса. При этом учитываются изменения механической нагрузки и момента инерции механизма. Система регулирования электропривода функционирует аналогично реальным условиям. Теоретические основы проверены с помощью компьютерного моделирования. Определено, что ошибка имитации зависит от уровня скорости электропривода и быстродействия регулирования моментобразующего тока двигателя и при номинальной скорости находится в пределах 1,5%. Продемонстрирована корректность рассмотренного подхода на примере функционирования установки по наматыванию металлической полосы. Полученные результаты дают основания для их практического применения.

Ключевые слова: электропривод, имитация нагрузки, моделирование, анализ.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Автоматизація технологічних процесів у багатьох галузях виробництва базується на електромеханічних системах. При розробці таких систем на останньому етапі є доцільним проведення випробувань з імітацію навантаження електропривода, наближеного до реалій виробничого процесу. Це дозволяє скоротити час та фінансові витрати при налагодженні систем у промислових умовах.

Специфіка сучасних мікропроцесорних засобів керування електромеханічними системами полягає в ідентичності програмування систем незалежно від їх потужності як на рівні формування технологічних завдань, так і щодо параметрування систем регулювання. З урахуванням цього, можливо в лабораторних умовах на базі імітаційного моделювання технологічних установок максимально забезпечити функціонування електромеханічних систем відповідно до промислових вимог.

В останні роки активно розвивається напрям програмно-апаратної емуляції різноманітних технічних систем у процесі їх проектування та досліджень. З позицій електропривода маємо два основні напрямки перевірки функціонування систем. Перший підхід полягає у використанні електромашинного агрегату з двох поєднаних між собою

електричних машин M1 і M2 (рис. 1, варіант 1). Формування обертального моменту навантажувальної машини M2 за рахунок відповідного керування від системи Б має забезпечити очікуване технологічне навантаження випробуваної системи А з двигуном M1 [1, 2]. При іншому підході функціональні випробування можуть здійснюватися без електромашинного агрегату (рис. 1, варіант 2). У цьому випадку використовується принцип емуляції – відтворення властивостей електричної машини й механізму за допомогою навантажувального силового перетворювача, який входить до складу системи Б і має відповідне керування [3–5].

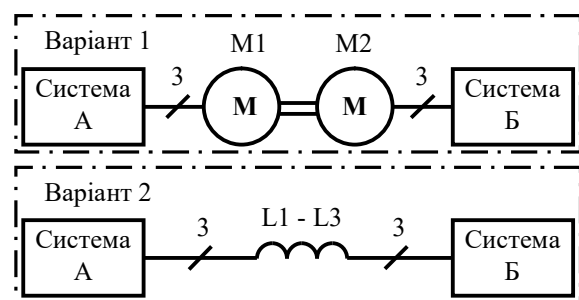


Рисунок 1 – Варіанти випробувань електромеханічних систем

Альтернативою розглянутим підходам може бути імітація механічного навантаження в системі електропривода за рахунок формування додаткового завдання на обертальний момент двигуна випробуваної системи, як це передбачено, наприклад, у [6].

Метою роботи є визначення можливості функціональних випробувань систем з імітацією змінення моменту інерції та навантаження в електромеханічній системі за рахунок впливу на обертальний момент електродвигуна.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Варіант випробувань електромеханічних систем із формування додаткового завдання на обертальний момент електропривода для імітації специфіки відповідної механічної частини характеризує рис. 2.

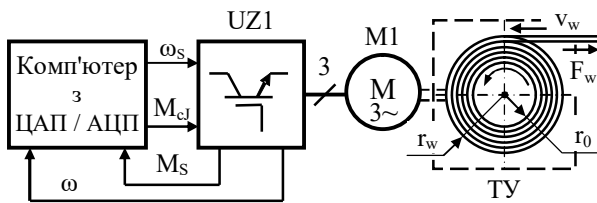


Рисунок 2 – Функціональна схема електромеханічної системи

До складу системи (рис. 2) входять електродвигун М1, силовий перетворювач UZ1 з відповідними засобами керування та комп'ютер із можливостями вводу та виводу аналогових інформаційних сигналів. Типові силові перетворювачі [7], як правило, мають мінімум два аналогових входи, через які можуть бути подані сигнали завдання для системи керування перетворювачем, а також мінімум два аналогових виходи, які дають можливість мати інформацію щодо процесу функціонування системи електропривода. З урахуванням зазначеного, без наявності технологічної установки ТУ (рис. 2) можливо імітувати змінення механічного навантаження та моменту інерції в процесі функціонування електромеханічної системи.

Підґрунтям для визначення законів управління є основне диференціальне рівняння обертального руху:

$$J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \quad (1)$$

де ω , J_{Σ} – відповідно кутова швидкість і сумарний момент інерції системи електропривода; M , M_c – відповідно електромагнітний момент і момент механічного навантаження на валу електродвигуна.

На основі рівняння (1) у відносних величинах з урахуванням базисних номінальних швидкості $\omega_{\text{ном}}$ та моменту двигуна $M_{\text{ном}}$ матимемо:

$$T_J \frac{d\omega^*}{dt} = M^* - M_{c^*}, \quad (2)$$

де $\omega^* = \omega / \omega_{\text{ном}}$; $M^* = M / M_{\text{ном}}$; $T_J = J_{\Sigma} \omega_{\text{ном}} / M_{\text{ном}}$ – електромеханічна стала часу системи електропривода.

Інтегрування рівняння (2) за проміжок часу від $(n-1)T$ до nT , де T – інтервал дискретності регулювання, а n – ціле число, дає наступний результат щодо змінення швидкості [8]:

$$\nabla \omega_{*[n]} = \omega_{*[n]} - \omega_{*[n-1]} = \frac{T \bar{M}_{s*[n]}}{T_J} - \frac{T \bar{M}_{c*[n]}}{T_J}, \quad (3)$$

$$\text{де } \bar{M}_{s*[n]} = \frac{1}{T} \int_{(n-1)T}^{nT} M_s^* dt, \quad \bar{M}_{c*[n]} = \frac{1}{T} \int_{(n-1)T}^{nT} M_{c^*} dt -$$

відносні середні величини електромагнітного моменту двигуна та моменту навантаження відповідно.

На основі рівняння (3) для загального випадку змінного моменту інерції системи електроприводу маємо:

$$\nabla \omega_{*[n]} = \frac{T \bar{M}_{s*[n]}}{T_{J0} + \nabla T_{J[n]}} - \frac{T \bar{M}_{c*[n]}}{T_{J0} + \nabla T_{J[n]}}, \quad (4)$$

де T_{J0} – початкова електромеханічна стала часу системи електропривода; $\nabla T_{J[n]}$ – змінення сталої часу за інтервал дискретності T .

Між тим таке саме змінення швидкості матимемо при постійному моменті інерції, але іншому моменті навантаження M_{cJ} :

$$\nabla \omega_{*[n]} = \frac{T \bar{M}_{s*[n]}}{T_{J0}} - \frac{T \bar{M}_{cJ*[n]}}{T_{J0}}. \quad (5)$$

Отже, при випробуваннях електромеханічних систем у лабораторних умовах можна при постійному моменті інерції системи електропривода J_0 імітувати змінення як механічного навантаження, так і моменту інерції відповідно до особливостей технологічної установки, формуючи завдання на додатковий обертальний момент \bar{M}_{cJ} , на що система буде реагувати як на змінення параметрів технологічної установки. Рівняння для розрахунку величини цього моменту впливає з прирівнювання правих частин виразів (4) та (5) заміною фактичного моменту двигуна $\bar{M}_{[n]}$ на заданий момент M_s у системі регулювання. У результаті отримуємо:

$$\bar{M}_{cJ*[n]} = \left(1 - \frac{T_{J0}}{T_{J0} + \nabla T_{J[n]}} \right) \bar{M}_{s*[n]} + \frac{T_{J0} \bar{M}_{c*[n]}}{T_{J0} + \nabla T_{J[n]}}. \quad (6)$$

У рівнянні (6) враховуються: завдання на момент електродвигуна $\bar{M}_{s*[n]}$, визначене регулятором швидкості електропривода, та змінення моменту інерції $\nabla T_{J[n]}$ і моменту технологічного навантаження $\bar{M}_{c*[n]}$, розраховані за допомогою математичної моделі технологічного процесу.

Структурно розглянутий підхід до імітації функціонування технологічних установок відображає схема, подана на рис. 3.

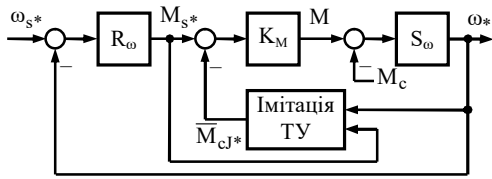


Рисунок 3 – Блочна схема імітації функціонування технологічної установки

У системі від сигналу завдання на момент електродвигуна M_s , який визначає регулятор швидкості R_ω , віднімається сигнал \bar{M}_{cJ} , розрахований блоком імітації відповідно до рівняння (6). Результуючий сигнал відпрацьовує контур регулювання моменту двигуна K_M .

Стала часу T_J , що відповідає сумі моментів інерції двигуна J_0 та механізму ∇J , враховується відповідною складовою в регуляторі швидкості електропривода. Пропорційно-інтегральний регулятор швидкості з фільтром у каналі завдання з параметрами, обраними на основі модульного критерію, забезпечує реагування на стрибки завдання та навантаження M_c відповідно до рис. 4,а.

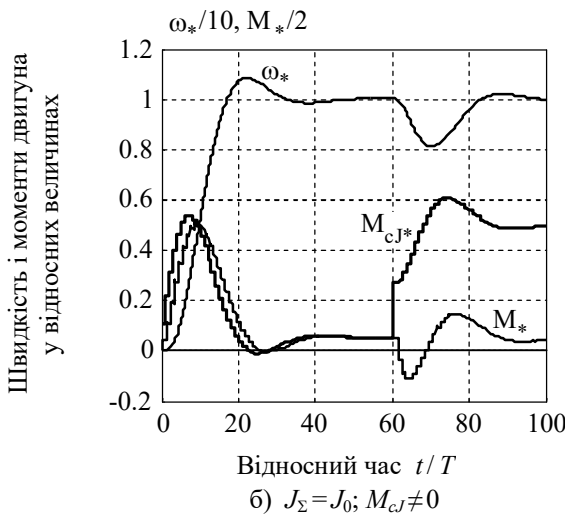
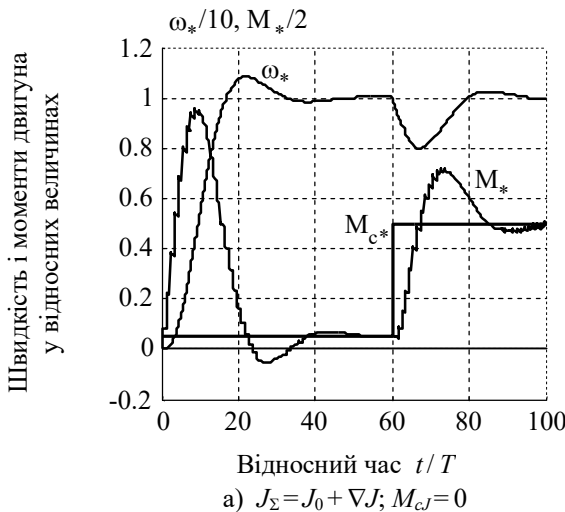


Рисунок 4 – Часові діаграми процесів регулювання швидкості електропривода

У разі відсутності механізму як об'єкта регулювання маємо тільки двигун із моментом інерції J_0 . У такому випадку випробування системи регулювання можуть бути здійснені на основі імітації властивостей механізму згідно з рівнянням (6) та рис. 3. Цей випадок характеризують процеси регулювання, відображені на рис. 4,б.

Процес регулювання швидкості електропривода з імітацією властивостей механізму (рис.4,б) у деякій мірі відрізняється від фактичного процесу (рис.4,а), що обумовлено впливом інерційності формування моменту двигуна. На рис. 5 подано приклад похибки імітації, розрахованої відповідно до рис. 4 при $\omega_{s*} = 0,1$ за рівнянням

$$\delta_\omega = \frac{\omega_* - \bar{\omega}_*}{\omega_{s*}} 100\%, \quad (7)$$

де ω_{s*} – задана відносна кутова швидкість системи електропривода; $\bar{\omega}_*$ – відносна кутова швидкість з імітацією технологічного навантаження.

Отже, найбільша похибка має місце в процесі накиду навантаження.

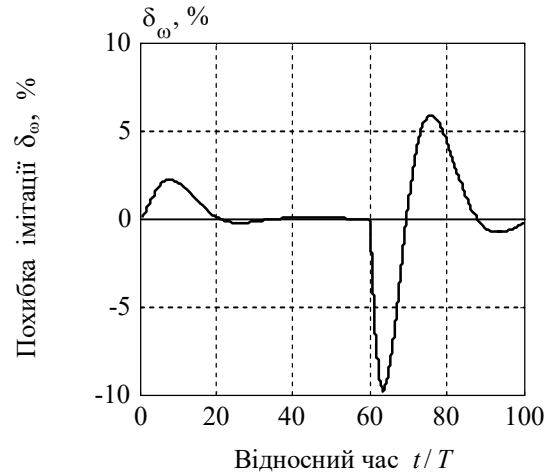


Рисунок 5 – Змінення похибки кутової швидкості при імітації навантаження

Виконані дослідження показали, що похибка імітації залежить від рівня кутової швидкості та швидкодії формування обертового моменту електропривода. Швидкодія може бути охарактеризована відносною сталою часу еквівалентного аперіодичного процесу $T_{a*} = T_a/T$ щодо змінення моментотворюючого струму електродвигуна [9]. Результати досліджень охарактеризовано абсолютними величинами найбільших відносних похибок, визначених на основі комп'ютерного моделювання залежно від рівня заданої швидкості ω_{s*} та сталої часу T_{a*} як

$$\delta_{om} = f(\omega_{s*}, T_{a*}) = \frac{\max(|\omega_* - \bar{\omega}_*|)}{\omega_{s*}} 100\%. \quad (8)$$

На рис. 6 відображено графік отриманих залежностей похибок δ_{om1} і δ_{om2} відповідно для двох рівнів завдання на швидкість $\omega_{s1*} = 0,1$ та $\omega_{s2*} = 1$. Вигляд залежностей є фактично однаковим.

Між тим кількісно рівень похибок є обернено пропорційним рівню швидкості. Отже, при номінальній швидкості максимальна похибка становить у межах 0,7–1,5 %.

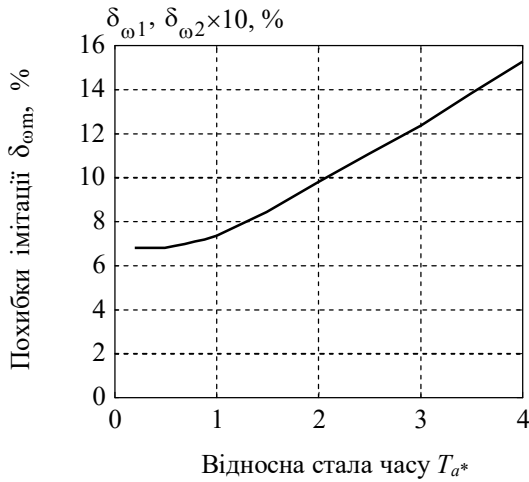


Рисунок 6 – Змінення похибки кутової швидкості при імітації навантаження

З позицій швидкодії формування обертального моменту електропривода маємо очікувані результати щодо зростання величини похибки при зменшенні швидкодії, що відповідає більшим значенням сталої часу T_{a^*} (рис. 6). Слід зазначити, що при $T_{a^*} < 0,5$ мінімальна похибка імітації практично не змінюється.

Розглянуті принципи імітації технологічних механізмів були апробовані на прикладі намотувальної установки, яку спрощено показано на рис. 2. У процесі намотки смугового матеріалу мають бути забезпечені постійні лінійна швидкість смуги ($v_w = \text{const}$) та сила натягнення ($F_w = \text{const}$). З урахуванням змінення радіусу рулону r_w зазначені умови обумовлюють необхідність змінення як кутової швидкості ω , так і обертального моменту двигуна M відповідно до виразів [10]:

$$\omega = \frac{v_w i_M}{r_w}; \quad M = \frac{F_w r_w}{i_M} + M_b + M_0; \quad (9)$$

$$r_w = r_0 + \frac{\varphi_w h_w}{2\pi}, \quad (10)$$

де i_M – передавальне число редуктора механізму; M_b – момент вигину смуги; M_0 – момент холостого ходу; h_w – товщина смуги; r_0 , φ_w – відповідно радіус і кут повороту барабана намотувальної установки.

При цьому суттєво змінюється момент інерції системи електропривода:

$$J_\Sigma = J_w + J_0 = \frac{\pi \rho b_w (r_w^4 - r_0^4)}{2i_M^2} + J_0, \quad (11)$$

де J_0 – момент інерції при пустому барабані намотувальної установки; ρ , b_w – відповідно густина матеріалу та ширина смуги.

На основі виразів (9)–(11) і рівняння (6) було виконано комп'ютерне моделювання процесів намотки смуги та імітації процесу з урахуванням параметрів намотувальної установки, наданих у [11]. Результати відображені на рис. 7 у відносних одиницях (в.о.), де позначено: M_w – обертальний момент двигуна в процесі намотки; M_m – обертальний момент двигуна в процесі імітації намотки; T_J – електромеханічна стала, що відповідає в процесі намотки сумарному моменту інерції системи електропривода J_Σ ; T_{Jm} – електромеханічна стала, що дорівнює моменту інерції двигуна в процесі імітації.

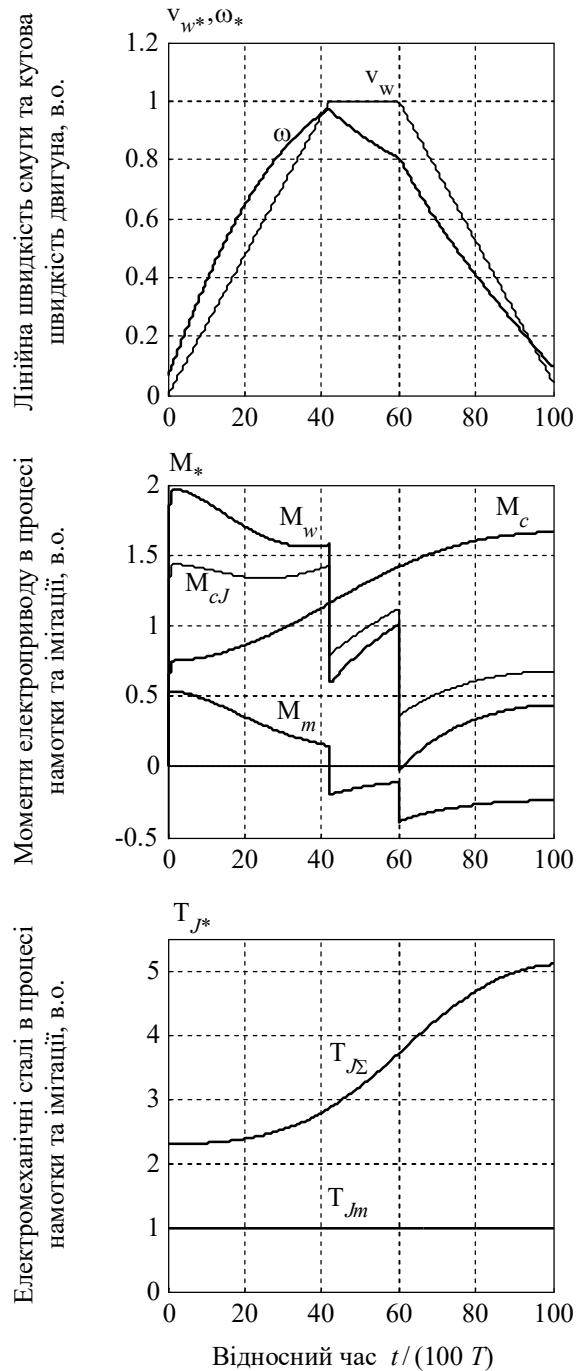


Рисунок 7 – Часові діаграми процесу намотки смуги та імітації процесу

Застосовані відносні величини, у тому числі всі обертальні моменти, визначено таким чином:

$$\omega_* = \frac{\omega}{\omega_{\text{НОМ}}}; v_{w*} = \frac{v_w}{v_{wS}}; M_* = \frac{M}{M_{\text{НОМ}}}; \quad (12)$$

де v_{wS} – лінійна швидкість смуги в сталому режимі намотки; $\omega_{\text{НОМ}}$, $M_{\text{НОМ}}$ – номінальні кутова швидкість та обертальний момент двигуна відповідно.

У процесі випробувань електромеханічних систем з позицій відпрацювання питань регулювання умовою якісної імітації технологічного навантаження є змінення кутової швидкості електропривода, ідентичне реальній технологічній установці. Оцінка розглянутого процесу намотування смуги дає похибку, визначену за виразом (7) при $\omega_S = \omega_{\text{НОМ}}$, з результатом, поданим на рис. 8.

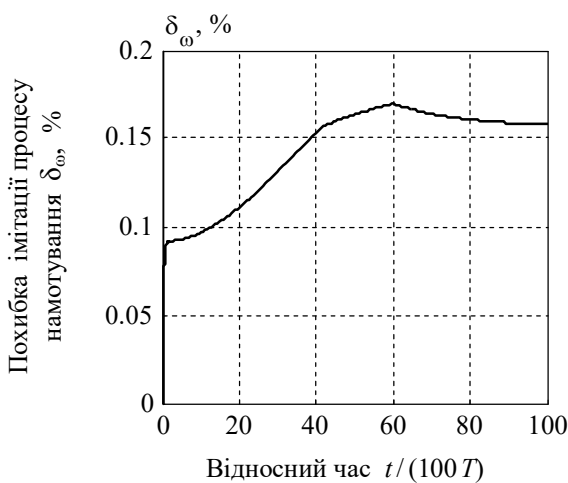


Рисунок 8 – Змінення похибки кутової швидкості при імітації навантаження

Отже, розглянутий приклад підтвердив можливість даного підходу до імітації технологічного навантаження.

ВИСНОВКИ. Імітація технологічного навантаження електроприводу за рахунок формування додаткового завдання на обертальний момент двигуна на основі математичної моделі технологічного процесу дає можливість випробувань щодо функціонування системи регулювання без наявності технологічної установки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ren W., Steurer M., Qi L. Evaluating Dynamic Performance of Modern Electric Drives via Power-

Hardware-in-the-Loop Simulation // IEEE International Symposium on Industrial Electronics, June 30–July 2, 2008. – United Kingdom: Cambridge. – PP. 2385–2391.

2. Lentijo S., D’Arco S., Monti A. Comparing the Dynamic Performances of Power Hardware-in-the-Loop Interfaces // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2010. – Iss. 57 (4). – PP. 1195–1207.

3. Trabelsi S., Schumacher W., Tolksdorf A. Design of a Real-Time Load Simulator Based on an In-Parallel Connected PWM Voltage Source Converter Structure // 9th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE2001, Austria, Graz, 27–29 August 2001. – 9 p.

4. Сергієнко Г.С., Старостін С.С. Навантажувальні випробування силових перетворювачів частоти на основі емуляції електричних машин // Технічна електродинаміка. – 2014. – Вип. 4. – С. 120–122.

5. Starostin S., Perederiy O. Current Control of a Voltage Source Inverter at the Load Testing of Frequency Converters // IEEE International Symposium on Industrial Electronics. – United Kingdom: Cambridge, 30 June–2 July 2008. – PP. 390–392.

6. SINAMICS S120. STARTER Commissioning Manual. – Erlangen: Siemens AG, 2016. – 408 p.

7. SINAMICS Inverters for Single-Axis Drives and SIMOTICS Motors. Catalog D31. – Erlangen: Siemens AG, 2014. – 468 p.

8. Старостін С.С., Старостіна В.М. Імітація змінення навантаження та моменту інерції електроприводу при випробуваннях електромеханічних систем // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер. Електротехніка і енергетика. – Донецьк: ДВНЗ "ДонНТУ", 2011. – Вип. 11 (181). – С. 381–384.

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

10. Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. – М.: Академия, 2007. – 576 с.

11. Королев А.А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов. – М.: Металлургия, 1985. – 376 с.

TESTING OF ELECTRIC DRIVE SYSTEMS WITH IMITATION OF TECHNOLOGICAL LOAD

S. Starostin

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: sergii.starostin7@gmail.com

Purpose. To determine the possibility of system functional testing with imitation of inertia and load changing in electromechanical systems by influence on the electric motor torque. **Methodology.** The considered method follows from the fact that both load and inertia changing leads to the variations in the speed of the electric drive. This can be taken into account through the creation of the additional setpoint to torque-producing current of a motor. This setpoint is

based on a discrete-time mathematical model of the technological process. In the case of this method, speed control is performed similarly to the real conditions of the system. **Results.** The theoretical grounds of the imitation method are considered and tested using the computer simulation. The errors that occur during testing are analyzed. It is determined that the value of the errors depends on the drive speed and time performance of the torque-producing current control and is within 1.5% at the rated speed. The correctness of this approach has been demonstrated by the example of the functioning of the machine for the metal strip winding. **Originality.** The testing is carried out without any loading units. This causes the technical and economic efficiency of the considered approach. **Practical value.** Modern electric drive systems typically have hardware and software capabilities to implement this load testing method. They are characterized by the commissioning identity, regardless of their power, at both the technological functions and control systems. These circumstances make it possible by the laboratory-based imitation of processes to ensure the operation of electromechanical systems according to industry requirements. References 11, tables 0, figures 8.

Key words: electric drive, load imitation, additional torque-producing current setpoint, simulation, metal strip winding, errors analysis.

REFERENCES

1. Ren, W., Steurer, M. and Qi, L. (2008), "Evaluating Dynamic Performance of Modern Electric Drives via Power-Hardware-in-the-Loop Simulation", *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, June 30–July 2, 2008, Cambridge, United Kingdom*, pp. 2385–2391.
2. Lentijo, S., D'Arco, S. and Monti, A. (2010), "Comparing the Dynamic Performances of Power Hardware-in-the-Loop Interfaces", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, no. 4, pp. 1195–1207.
3. Trabelsi, S., Schumacher, W. and Tolksdorf, A. (2001), Design of a Real-Time Load Simulator Based on an In-Parallel Connected PWM Voltage Source Converter Structure, *9th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2001, Austria, Graz, 27–29 August 2001)*, 9 p.
4. Sergiienko, G.S. and Starostin, S.S. (2014), "Load testing of power frequency converters based on the emulation of electrical machines", *Tekhnichna elektrodynamika*, Vol. 4, pp. 120–122. (in Ukrainian)
5. Starostin, S. and Perederiy, O. (2008), "Current Control of a Voltage Source Inverter at the Load Testing of Frequency Converters", *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, June 30–July 2, 2008, Cambridge, United Kingdom*, pp. 390–392.
6. SINAMICS Inverters for Single-Axis Drives and SIMOTICS Motors. Catalog D31 (2014).
7. SINAMICS S120. STARTER Commissioning Manual (2016).
8. Starostin, S.S. and Starostina, V.M. (2011), "Imitation of the Changing of Electric Drive Load and Inertia at the Testing of Electromechanical Systems", *Naukovi pratsi Donetskogo natsionalnogo tekhnichnogo universitetu, Ser. Elektrotehnika i energetika*, Vol. 11, no. 181, pp. 381–384. (in Ukrainian)
9. Starostin, S.S. and Tolochko, O.I. (2010), "Discrete-time Mathematical Model of the Torque-producing Current Control Loop for the Synthesis of Digital Control Systems for Electromechanical Objects", *Naukovi pratsi Donetskogo natsionalnogo tekhnichnogo universitetu, Ser. Elektrotehnika i energetika*, Vol. 10, no. 180, pp. 177–182. (in Ukrainian)
10. Belov, M.P., Novikov, V.A. and Rassudov, L.N. (2007), "Automated electric drive of typical industrial mechanisms and technological facilities", Academia, Moscow. (in Russian)
11. Koroliyov, A.A. (1985), "Construction and Design of Machines and Mechanisms of Rolling-mills", Metallurgia, Moscow. (in Russian)

Стаття надійшла 11.12.2016.