

## СПРОЩЕНІ СПОСТЕРІГАЧІ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ СТАТИЧНОЇ ТА ДИНАМІЧНОЇ СКЛАДОВИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО МОМЕНТУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА В СИСТЕМАХ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

**Вступ.** Розглядаються системи частотно-регульованого асинхронного електропривода (ЕП) зі скалярними законами частотного керування, які звичайно застосовуються для механізмів, що не ставлять високих вимог до динамічних властивостей ЕП. При підвищених вимогах щодо якості перехідних процесів поряд із системами векторного керування можна використовувати і скалярні системи з роздільним регулюванням модуля потокозчеплення статора і електромагнітного моменту [1]. Астатизм за навантаженням в таких системах може бути забезпечений двома основними шляхами, описаними у багатьох літературних джерелах (наприклад, [1, 2]):

- застосування принципу компенсації ковзання, який полягає у неперервному визначенні активної складової струму статора і формуванні відповідного коригувального сигналу, що забезпечує збільшення частоти живильної напруги при збільшенні навантаження;
- організація астатичного контуру регулювання швидкості з внутрішньою підсистемою регулювання струму або моменту, або без такої внутрішньої підсистеми.

Вказані методи можуть бути вдосконалені заміною коригувального сигналу за активною складовою струму статора коригувальним сигналом за оцінкою моменту статичного опору  $M_C$  або заміною зворотного зв'язку за активною складовою струму статора (або повним струмом статора) на зворотний зв'язок за динамічною складовою моменту, вираз для якої при розгляданні одномасової електромеханічної системи має вигляд:

$$M_j = M - M_C = J d\omega/dt, \quad (1)$$

де  $J$  – сумарний момент інерції АД та механізму, приведений до валу двигуна;

$M$  – повний електромагнітний момент АД.

В обох випадках для розв'язання поставленої задачі необхідно синтезувати спостерігач, що відновлює статичний та (або) динамічний моменти двигуна. Однією з перших в цьому напрямку є робота [3], присутні також численні публікації вітчизняних і закордонних авторів з питань застосування таких спостерігачів в системах ЕП постійного і змінного струму. В якості вхідного сигналу спостерігач зазвичай використовує електромагнітний момент або моментоутворюючу складову струму, або відповідне задане значення; в якості координати, за якою ведеться коригування, виступає кутова швидкість двигуна або електрорушійна сила обертання. Отже, такі спостерігачі працюють в системах ЕП з орієнтацією за вектором магнітного потоку, але мають бути допрацьовані стосовно до систем скалярного частотного керування, в яких задача компенсації нелінійностей об'єкта регулювання (тобто, АД) зазвичай не ставиться.

**Мета статті** – розробка і дослідження спостерігачів для відновлення статичної та динамічної складових електромагнітного моменту АД, що можуть бути застосовані у складі систем частотно-регульованого асинхронного ЕП зі скалярним керуванням, у тому числі таких, що не мають датчика швидкості або положення.

**Основний матеріал досліджень.** Спостерігачі для систем скалярного частотного керування АД можуть бути побудовані на базі математичного опису двигуна, який складається з рівняння (1) і рівнянь, що описують процеси в електромагнітних колах двигуна. В якості останніх розглянемо рівняння Парка – Горєва в ортогональній системі координат  $x, y$ , що обертається із заданою кутовою частотою  $\omega_s$  синхронно з узагальненим вектором напруги статора  $\vec{U}_S = u_{Sx} + ju_{Sy}$  при прийнятті традиційних допущень і розгляданні в якості змінних стану складових векторів струму  $\vec{I}_S = i_{Sx} + ji_{Sy}$  і потокозчеплення  $\vec{\Psi}_S = \psi_{Sx} + j\psi_{Sy}$  статора:

$$\frac{du_{Sx}}{dt} = u_{Sx} - i_{Sx}R_S + u_{Sy}u_{Sy}; \quad \frac{du_{Sy}}{dt} = u_{Sy} - i_{Sy}R_S - u_{Sx}u_{Sx}; \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} yL_S \frac{di_{Sx}}{dt} &= u_{Sx} - R_e i_{Sx} + \sigma_R u_{Sx} + (u_{Sy} - u_{Ry})yL_S i_{Sy} + u_{Ry}u_{Sy}; \\ yL_S \frac{di_{Sy}}{dt} &= u_{Sy} - R_e i_{Sy} + \sigma_R u_{Sy} - (u_{Sx} - u_{Rx})yL_S i_{Sx} - u_{Rx}u_{Sx}; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$M = \frac{3}{2} z_p (\psi_{Sx} i_{Sy} - \psi_{Sy} i_{Sx}), \quad (4)$$

де  $R_S, R_R$  – активні опори обмоток статора і ротора;  $\alpha_R = R_R/L_R$  – величина, що є зворотною до сталої часу ротора;  $R_e = R_S + L_S \alpha_R$  – еквівалентний активний опір АД;  $\sigma = 1 - L_m^2/(L_S L_R)$  – коефіцієнт розсіювання;  $L_m$  – взаємна індуктивність;  $L_S, L_R$  – повні індуктивності статора і ротора;  $\omega_R = z_p \omega$  – кутова швидкість обертання поля ротора;  $z_p$  – число пар полюсів обмотки статора.

Покладемо, що об'єкт регулювання є стаціонарним, і присутня уся необхідна інформація про його параметри. Навіть при такому допущенні синтез спостерігачів на базі нелінійної моделі (1) – (4) не є раціональним, оскільки потребує поточного визначення складових векторів струму та потокозчеплення статора, що веде до додаткового ускладнення системи керування. Можна досягти спрощення моделі АД, якщо прийняти, що в системі скалярного частотного керування вектор напруги статора  $\vec{U}_S$  формується у такий спосіб, що основна його проекція припадатиме на вісь  $x$ , тобто

$$u_{Sx} \gg u_{Sy}. \quad (5)$$

Тоді, як показано в [4], основна проекція вектора  $\vec{\Psi}_S$  буде припадати на вісь  $y$  ( $\psi_{Sy} \gg \psi_{Sx}$ ), а складові  $i_{Sx}$  та  $i_{Sy}$  можуть розглядатися як активна і реактивна складові струму статора відповідно. Аналогічно можна розглядати і складові  $\psi_{Sx}$ ,  $\psi_{Sy}$  узагальненого вектора потокозчеплення статора. Відповідна структурна схема показана на рис.1, де позначено  $T_e = \sigma L_S / R_e$  – еквівалентна стала часу електромагнітних контурів АД.

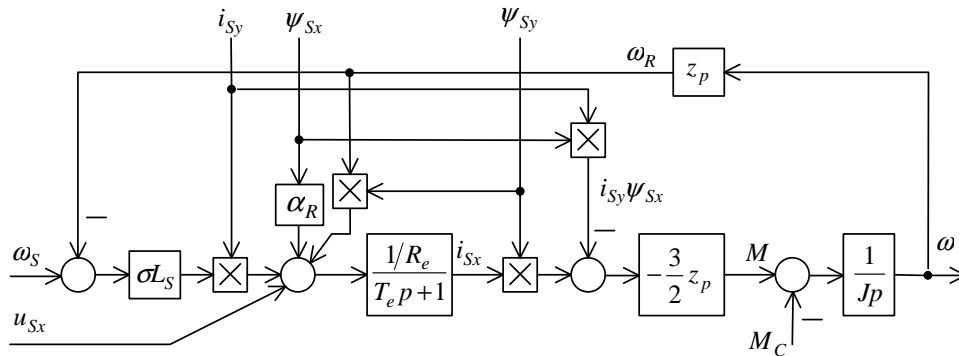


Рис. 1. Структурна схема регулювання електромагнітного моменту  $M$  та швидкості  $\omega$  АД.

Покладемо, що засобами керування, поряд з виконанням умови (5), забезпечується також сталість модуля вектора потокозчеплення статора і його складових в синхронній системі координат статора:

$$\psi_{Sx} = 0 = const; \quad \psi_{Sy} = -\Psi_{Sm} = const, \quad (6)$$

де  $\Psi_{Sm}$  – задане значення модуля вектора потокозчеплення статора.

Тоді з (2) можна отримати співвідношення, що можуть бути застосовані для формування складових вектора напруги статора при забезпеченні умов (6):

$$u_{Sx} = \omega_S \Psi_{Sm} + R_S i_{Sx}; \quad u_{Sy} = R_S i_{Sy}. \quad (7)$$

Після підстановки (6) і (7) у (3), отримуємо:

$$\left. \begin{aligned} yL_S \frac{di_{Sx}}{dt} &= (u_{Sx} - u_{Rx}) (yL_S i_{Sy} + \Psi_{Sm}) - \alpha_R L_S i_{Sx}; \\ yL_S \frac{di_{Sy}}{dt} &= -\beta_R L_S i_{Sy} - \beta_R \Psi_{Sm} - (u_{Sx} - u_{Rx}) yL_S i_{Sx}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Останньою складовою у правій частині другого рівняння системи (8) часто можна зневажити, особливо якщо жорсткість механічних характеристик в системі є високою. Це є еквівалентним нехтуванню впливом активної складової струму статора на динаміку реактивної складової, отже, з урахуванням (6) можна покласти, що  $i_{Sy} = const$ , і з останнього рівняння отримати:

$$i_{Sy} = -\Psi_{Sm} / L_S.$$

Підставляючи цей вираз у перше рівняння системи (8), маємо:

$$yL_S \frac{di_{Sx}}{dt} = (u_{Sx} - u_{Rx}) (1 - \sigma) \Psi_{Sm} - \alpha_R L_S i_{Sx}. \quad (9)$$

Рівняння моменту (4) з урахуванням (6) перетворюється на наступне:

$$M = 3z_p \Psi_{Sm} i_{Sx} / 2. \quad (10)$$

Рівнянням (1), (9), (10) відповідає лінеаризована структурна схема АД (рис. 2), де позначено  $T_R = \sigma L_R / R_R$  – стала часу розсіяння ротора. Зауважимо, що до такої ж схеми можна прийти, якщо у вихідних рівняннях (2), (3) покласти  $R_S = 0$ , і зробити припущення про сталість модуля потокозчеплення статора. Структурна схема (рис. 2) є справедливою при розгляданні роботи АД на лінійній ділянці механічних характеристик у складі частотно-регульованого електропривода, і

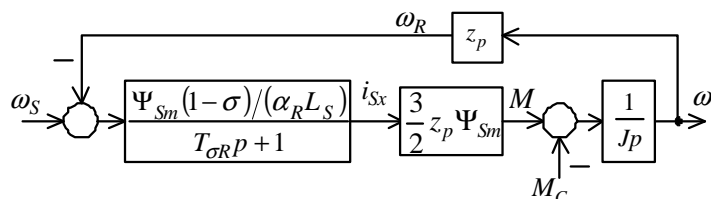


Рис. 2. Лінеаризована структурна схема АД.

тому може бути застосована для побудови на її основі спрощених спостерігачів, що відновлюють статичну та динамічну складові електромагнітного моменту АД. Нижче наведені результати синтезу спрощених спостерігачів, що застосовують корекцію за швидкістю (використовуються, якщо в системі регулювання присутній датчик швидкості) та за активною складовою струму статора (використовуються, якщо в системі регулювання немає датчика швидкості або положення), і є більш загальним випадком спостерігачів, у порівнянні з описаними у роботі [5].

**Спостерігач 2-го порядку з корекцією за швидкістю** будується на підставі моделі (1), (9), (10) об'єкта регулювання і описується рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} \hat{M}_j &= J \frac{d\hat{\omega}}{dt} = \frac{3}{2} z_p \Psi_{Sm} \hat{i}_{Sx} + l_{21\omega}^o \tilde{\omega}; \\ \sigma L_S \frac{d\hat{i}_{Sx}}{dt} &= (\omega_S - z_p \hat{\omega})(1-\sigma)\Psi_{Sm} - \alpha_R L_S \hat{i}_{Sx} + l_{22\omega}^o \tilde{\omega}, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

де  $\hat{M}_j$  – оцінка (відновлене значення) динамічного моменту;  $\hat{\omega}$ ,  $\tilde{\omega} = \omega - \hat{\omega}$  – оцінка швидкості та похибка оцінювання швидкості;  $\hat{i}_{Sx}$  – оцінка активної складової струму статора;  $l_{21\omega}^o$ ,  $l_{22\omega}^o$  – коригувальні коефіцієнти, які з умови забезпечення бажаного характеристичного поліному спостерігача

$$H_2^*(p) = p^2 + \gamma \Omega_0 p + \Omega_0^2, \quad (12)$$

обчислюються за формулами:

$$l_{21\omega}^o = J \left( \gamma \Omega_0 - \frac{1}{T_{\sigma R}} \right); \quad l_{22\omega}^o = \frac{2J\sigma L_S}{3z_p \Psi_{Sm}} \left[ \Omega_0^2 - \frac{1}{T_{\sigma R}} \left( \gamma \Omega_0 - \frac{1}{T_{\sigma R}} \right) \right] - z_p (1-\sigma) \Psi_{Sm}. \quad (13)$$

У (12)  $\gamma$  – коефіцієнт, що задає деяку стандартну форму характеристичного поліному спостерігача. В подальшому в якості бажаного характеристичного поліному спостерігача прийнятий поліном Баттерворта 2-го порядку ( $\gamma = \sqrt{2}$ ).

В даному спостерігачі координата  $i_{Sx}$  вважається невимірюваною,  $\omega$  – вимірюваною, а сигнали  $\omega_S$ ,  $\Psi_{Sm}$  – значеннями координат, які дорівнюють відповідним заданим значенням

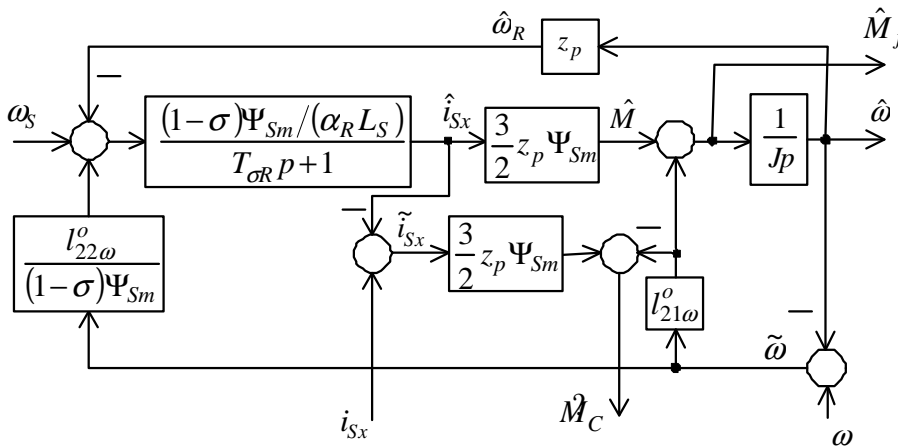


Рис. 3. Структурна схема спрощеного спостерігача з корекцією за швидкістю.

$$\hat{M}_C = -l_{21\omega}^o \tilde{\omega} + \frac{3}{2} z_p \Psi_{Sm} \tilde{i}_{Sx}.$$

Відповідна структурна схема спостерігача наведена на рис. 3.

**Спостерігач стану 2-го порядку з корекцією за активною складовою вектора струму статора** є доцільним у застосуванні в системах частотно-регульованого ЕП без датчика швидкості. Рівняння спостерігача є подібними до (11):

$$\left. \begin{aligned} \hat{M}_j &= J \frac{d\hat{\omega}}{dt} = \frac{3}{2} z_p \Psi_{Sm} \hat{i}_{Sx} + l_{21i}^o \tilde{i}_{Sx}; \\ \sigma L_S \frac{d\hat{i}_{Sx}}{dt} &= (\omega_S - z_p \hat{\omega})(1-\sigma)\Psi_{Sm} - \alpha_R L_S \hat{i}_{Sx} + l_{22i}^o \tilde{i}_{Sx}, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

де  $\tilde{i}_{Sx} = i_{Sx} - \hat{i}_{Sx}$  – похибка оцінювання активної складової струму статора;  $l_{21i}^o$ ,  $l_{22i}^o$  – коригувальні коефіцієнти, які за умови забезпечення характеристичного поліному (12) спостерігача обчислюються за виразами:

$$l_{21i}^o = \frac{3}{2} z_p \Psi_{Sm} - \frac{\sigma L_S J \Omega_0^2}{z_p \Psi_{Sm} (1-\sigma)}; \quad l_{22i}^o = \sigma L_S \left( \gamma \Omega_0 - \frac{1}{T_{\sigma R}} \right). \quad (15)$$

$\omega_S = \omega_S^*$ ;  $\Psi_{Sm} = \Psi_{Sm}^*$ , що можуть бути отримані з регулювальної частини системи.

Беручи до уваги (1), (4) та перше рівняння (11), можна отримати рівняння динаміки похибки оцінювання швидкості:

$$J \frac{d\tilde{\omega}}{dt} = -l_{21\omega}^o \tilde{\omega} + \frac{3}{2} z_p \Psi_{Sm} \tilde{i}_{Sx} - M_C$$

звідки виходить, що в усталеному режимі оцінка статичного моменту складає:

В цьому спостерігачі швидкість  $\omega$  вважається не вимірюваною, а активна складова  $i_{sx}$  струму статора – вимірюваною або такою, що розраховується за відомими модулем  $I_{Sm}$  та фазовими кутами  $\theta_{Is}$  струму та  $\theta_{Us}$  напруги статора:

$$i_{sx} = I_{Sm} \cos(\theta_{Us} - \theta_{Is}).$$

Беручи до уваги (1), (4) та перше рівняння (14), можна отримати рівняння динаміки похибки оцінювання швидкості:

$$J \frac{d\tilde{\omega}}{dt} = \left( \frac{3}{2} z_p \Psi_{Sm} - l_{21i}^o \right) \tilde{i}_{sx} - M_C,$$

звідки оцінка статичного моменту в усталеному режимі

$$\hat{M}_C = \left( \frac{3}{2} z_p \Psi_{Sm} - l_{21i}^o \right) \tilde{i}_{sx}.$$

Відповідна структурна схема спостерігача наведена на рис. 4.

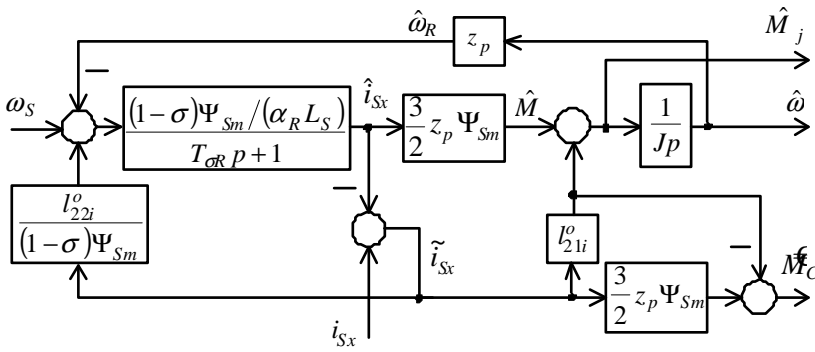


Рис. 4. Структурна схема спрощеного спостерігача з корекцією за активною складовою струму статора (базовий варіант).

Точність відновлення статичної складової електромагнітного моменту АД за допомогою запропонованих спостерігачів (рис. 3, 4) проілюстровано на рис. 5 для режиму стрибкоподібного прикладання до двигуна статичного моменту, що дорівнює номінальному моменту

АД ( $M_C = M_H$ ), і паралельній роботі спостерігачів. Графіки перехідних процесів отримані в результаті моделювання системи з роздільним регулюванням електромагнітного моменту і складових вектора потокозчеплення статора з примусовим пригальмуванням його активної складової [4] для двигуна 4А-180-М4 (30 кВт) з такими даними:  $z_p = 2$ ;  $\alpha_R = 1,55 \text{ с}^{-1}$ ;  $\sigma L_S = 2,8 \text{ мГн}$ ;  $R_e = 0,237 \text{ Ом}$ ;  $J = 0,2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ , еквівалентна інерційність інвертора напруги –  $T_\mu = 1 \text{ мс}$ , власна частота спостерігачів –  $\Omega_0 = 1/T_\mu$ .

Особливістю спрощеного спостерігача с корекцією за активною складовою струму статора, зображеного на рис.4, є те, що відновлення швидкості виконується з похибкою, яка визначається двома факторами: дією моменту статичного навантаження на об'єкт регулювання, та розбіжністю між вихідною (рис. 1) та лінеаризованою (рис. 2) моделями АД.

Порівнюючи об'єкт регулювання, що описується рівняннями (1), (4) та першим рівнянням (3), і спостерігач, що описується рівняннями (14), (15), можна отримати систему рівнянь, що описують динаміку

зміни похибок оцінювання. Зокрема, для випадку, коли керування АД будується у відповідності до умови (6), така система рівнянь має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} J \frac{d\tilde{\omega}}{dt} &= \frac{\sigma L_S J \Omega_0^2}{z_p \Psi_{Sm} (1-\sigma)} \tilde{i}_{sx} - M_C; \\ \gamma L_S \frac{d\tilde{i}_{sx}}{dt} &= (u_{s0} - z_p u_i) \gamma L_S i_{sy} + [\sigma(u_{s0} - z_p u_i) - z_p \tilde{u}_i] \Psi_{Sm} - \sigma L_S \gamma \Omega_0 \tilde{i}_{sx}, \end{aligned} \right\}$$

звідки для усталеного режиму можна отримати такий вираз для похибки оцінювання швидкості:

$$\tilde{u}_{\Sigma, ycm} = \tilde{u}_C + \tilde{u}_{m1} + \tilde{u}_{m2} = -\frac{\gamma}{J \Omega_0} (1-\sigma) M_C + \sigma \left[ (u_{s0} - u_i) + \frac{L_S i_{sy}}{\Psi_{Sm}} \Delta u \right], \quad (16)$$

де  $\Delta \omega = \omega_0 - \omega$  – помилка регулювання швидкості;  $\omega_0 = \omega_s / z_p$  – задана синхронна швидкість обертання валу двигуна;  $\tilde{\omega}_C = -\gamma(1-\sigma)M_C / J\Omega_0$  – складова похибки оцінювання від дії статичного моменту на об'єкт регулювання;  $\tilde{\omega}_{m1} = \sigma(\omega_s / z_p - \hat{\omega})$  – складова похибки оцінювання, що вноситься розбіжністю між вихідною та лінеаризованою моделями об'єкта регулювання, та залежить від оціненої швидкості АД;  $\tilde{\omega}_{m2} = \sigma L_S i_{sy} \Delta u / \Psi_{Sm}$  – аналогічна складова похибки оцінювання, яка залежить від фактичної швидкості АД.

Аналізуючи (16), можна прийти до висновку, що при відомій оцінці  $\hat{M}_C$  статичного моменту можна вико-

нати компенсацію складових  $\tilde{\omega}_c$  та  $\tilde{\omega}_{m1}$  усталеної похибки оцінювання, у той же час компенсація складової  $\tilde{\omega}_{m2}$  представляє суто теоретичний інтерес. З урахуванням викладеного структурна схема доповненого спостерігача з компенсацією усталеної похибки оцінювання швидкості наведена на рис. 6.

Точність відновлення швидкості за допомогою доповненого спостерігача з компенсацією похибки оцінювання проілюстровано на рис. 7 для режиму стрибкоподібного прикладання до валу двигуна статичного моменту, що дорівнює номінальному моменту АД. Для ілюстрації складових повної похибки оцінювання моделювалася система регулювання [4], статична за навантаженням, з паралельною роботою спостерігача.

Проведені дослідження вказують на доцільність застосування розроблених спостерігачів в складі систем частотно-регульованого асинхронного ЕП для поліпшення якості статичних характеристик таких систем.

**Висновки.** 1. Для оцінювання статичної та динамічної складових електромагнітного моменту АД запропоновано застосовувати спостерігачі, в основу яких покладено лінеаризовану модель АД, яка припускає забезпечення засобами системи скалярного частотного керування постійність модуля вектора потокозчеплення статора та реактивної складової вектора струму статора. В залежності від структури системи скалярного частотного керування (наявний датчик швидкості або ні), спостерігач може застосовувати корекцію за кутвою швидкістю або за активною складовою струму статора.

2. Доведено, що відновлення швидкості за допомогою спрощеного спостерігача з корекцією за активною складовою вектора струму статора відбувається з похибкою, яка визначається двома факторами – дією моменту статичного навантаження на об'єкт регулювання, та розбіжністю між повною та лінеаризованою моделями АД. Отримані аналітичні вирази для усталеної похибки оцінювання швидкості та окремих її складових, показано, що цю похибку можна зменшити.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін. [За ред. М.Г. Поповича, О.Ю. Лозинського]. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.

2. Терехов В.М. Системы управления электроприводов: Учебник для вузов / В.М. Терехов, О.И. Осипов [Под редакцией В.М. Терехова]. – М.: Изд. центр «Академия», 2006. – 302 с.

3. P.B. Schmidt and R.D. Lorenz, "Design Principles and Implementation of Acceleration Feedback to Improve Performance of DC Drives," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, (May/June 1992): 594–599.

4. Толочко О.И. Формирование вектора напряжения статора асинхронного двигателя в системе скалярного частотного управления для улучшения динамических характеристик / Толочко О.И., Чекавский Г.С., Розкарьяк П.И. // Збірник наукових праць ДонНТУ. Серія «Електротехніка і енергетика». – 2013. – Вип. 1 (14). – Донецьк: ДонНТУ, 2013. – С. 271 – 277.

5. Толочко О.И. Оцінка динамічного моменту асинхронного двигуна в системах частотно-регульованого електропривода зі скалярним керуванням / Толочко О.И., Чекавський Г.С. // Електротехніка та електроенергетика (науковий журнал). – Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. – №2. – С.47 – 50.

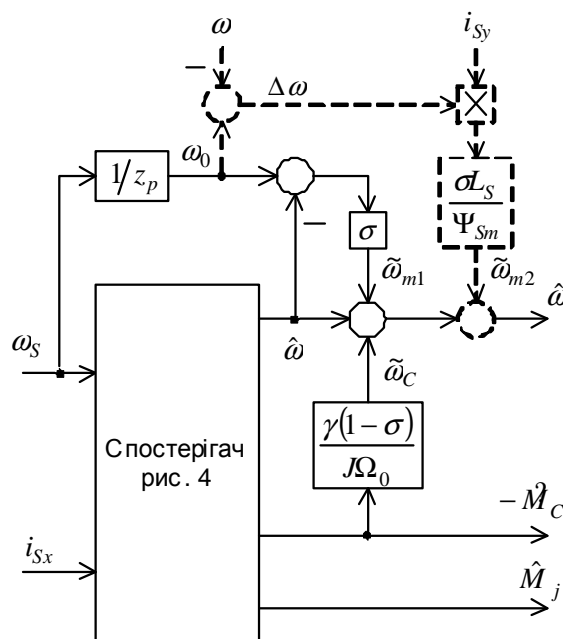


Рис. 6. Спостерігач з корекцією за активною складовою вектора струму статора з компенсацією усталеної похибки оцінювання.

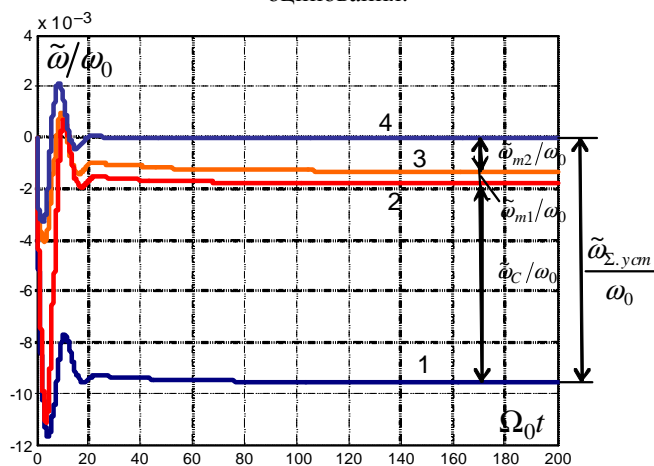


Рис. 7. Графіки похибки оцінювання швидкості АД за допомогою спостерігача з корекцією за активною складовою струму статора при накиданні номінального навантаження на усталеній швидкості:

- 1 – спостерігач без компенсації похибки оцінювання;
- 2 – спостерігач з компенсацією похибки  $\tilde{\omega}_c$ ;
- 3 – спостерігач з компенсацією похибки  $\tilde{\omega}_c + \tilde{\omega}_{m1}$ ;
- 4 – спостерігач з компенсацією повної похибки оцінювання [графік наведений для повноти ілюстрації виразу (16)]