

## ВАРІАНТ СПОСТЕРІГАЧА ПОТОКОЗЧЕПЛЕННЯ ДЛЯ СИСТЕМ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

Толочко О.І., Чекавський Г.С., Бухта Н.О.

Донецький національний технічний університет

gleb@elf.dgtu.donetsk.ua

**Вступ.** Реалізація високоякісної системи векторного керування асинхронним електроприводом (ЕП) з орієнтацією системи координат за узагальненим вектором потокозчеплення ротора потребує точного визначення модуля і просторового положення цього вектора. Оскільки вимірювання потокозчеплення за допомогою датчиків не є ефективним в промислових умовах, актуальною є задача синтезу обчислювальних пристроїв, що дозволяють встановити значення і кутове положення вектора потокозчеплення ротора, не прибігаючи до безпосереднього вимірювання.

Найбільш розповсюдженим способом ідентифікації вектора потокозчеплення ротора є поточне обчислення його значення [1] за допомогою відомих з теорії електричних машин математичних залежностей, які пов'язують між собою різні координати. Високий рівень розвитку мікропроцесорної техніки робить актуальним питання розробки і реалізації більш складних (з точки зору обсягів обчислень) ідентифікаторів – спостерігачів потокозчеплення (СП), які порівняно із математичними моделями є менш чутливими до зміни параметрів об'єкта і забезпечують більшу точність відновлення вектора потокозчеплення.

В деяких роботах, наприклад, [2, 3], побудування СП виконується у стаціонарній системі координат статора  $\alpha, \beta$ , при цьому задача забезпечення точності встановлення модуля і кутового положення вектора потокозчеплення ротора вирішується досить ефективно, проте таким СП властивий той недолік, що вибір коефіцієнтів коригувальних зв'язків СП у великій мірі виконується емпірично. Перехід до розглядання об'єкта регулювання в системі координат  $d, q$ , орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора, дозволяє застосовувати підхід [4], що полягає у забезпеченні заданих динамічних властивостей СП і системи в цілому шляхом вибору певного бажаного характеристичного поліному СП. Такі спостерігачі матимуть у порівнянні з відомими СП більш просту структуру і алгоритм вибору параметрів коригувальних зв'язків.

**Постановка задачі.** В даній роботі виконується синтез СП, побудованого на основі математичного опису АД в системі координат  $d, q$ , орієнтованій за узагальненим вектором потокозчеплення  $\vec{\Psi}_R$  ротора ( $\Psi_{Rd} = |\vec{\Psi}_R| = \Psi_R, \Psi_{Rq} \equiv 0$ ), і виконується аналіз статичних і динамічних властивостей системи векторного керування, замкненої за оцінками модуля і кутового положення вектора потокозчеплення ротора АД. При побудові СП доступними для виміру вважаються електричні величини АД (фазні струми, напруги) і швидкість обертання валу двигуна.

**Основний матеріал і результати досліджень.** При традиційному векторному керуванні короткозамкненим АД його математичною моделлю в ортогональній системі координат  $d, q$  є сукупність рівнянь:

$$\sigma L_S p i_{Sd} = u_{Sd} - R_l i_{Sd} + \sigma L_S \omega_C i_{Sq} + k_R T_R^{-1} \Psi_R; \quad (1)$$

$$\sigma L_S p i_{Sq} = u_{Sq} - R_l i_{Sq} - \sigma L_S \omega_C i_{Sd} - k_R \omega_R \Psi_R; \quad (2)$$

$$p \Psi_R = -T_R^{-1} \Psi_R + k_R R_R i_{Sd}; \quad (3)$$

$$\omega_C = \omega_R + k_R R_R i_{Sq} / \Psi_R; \quad (4)$$

$$M = 3z_p k_R \Psi_R i_{Sq} / 2; \quad (5)$$

$$J p \omega = M - M_C, \quad (6)$$

в якій застосовані позначення оператора диференціювання ( $p = d/dt$ ), координат АД ( $u_{Sd}, u_{Sq}, i_{Sd}, i_{Sq}, \Psi_R$  – складові вектора напруги  $\vec{U}_S$  і струму  $\vec{I}_S$  статора і модуль вектора потокозчеплення  $\vec{\Psi}_R$  ротора;  $M, M_C$  – електромагнітний момент і момент статичного навантаження, приведені до валу АД;  $\omega$  – частота обертання валу (швидкість) АД;  $\omega_R = z_p \omega$  – кутова швидкість АД, приведена до кількості пар полюсів  $z_p$  статора;  $\omega_C$  – кутова частота обертання системи координат  $d, q$ ), параметрів схеми заміщення ( $R_S, R_R$  – активні опори обмоток фаз статора і приведені ротора відповідно;  $L_S, L_R$  – повні індуктивності статора і ротора відповідно;  $L_m$  – взаємна індуктивність), сумарного моменту інерції  $J$  електромеханічної системи, приведеного до валу АД, і похідних параметрів ( $R_l = R_S + k_R^2 R_R$ ;  $T_R = L_R / R_R$ ;  $k_R = L_m / L_R$ ;  $\sigma = 1 - k_R L_m / L_S$ ).

При розгляданні об'єкта регулювання як такого, що описується рівняннями (1), (3), (4), і припущенні про збіг аналогічних параметрів об'єкта і спостерігача, може бути синтезований СП, структурна схема якого наведена на рис.1, де позначено  $T_l = \sigma L_S / R_l$ . Однією з відмінних рис цього СП є саме обрання рівнянь об'єкта, на підставі яких синтезується СП, що підвищує точність встановлення поточкозчеплення у порівнянні з іншим варіантом СП в системі координат  $d, q$ , розглянутого в роботі [5]. У вказаній роботі СП будується на підставі рівнянь (3) – (6) об'єкта, що обумовлює наявність в коригувальних коефіцієнтах змінного параметру (активної складової струму статора  $i_{Sq}$ ), що залежить від режиму роботи ЕП, крім того, робить СП чутливим до зміни моменту інерції  $J$  електромеханічної системи.

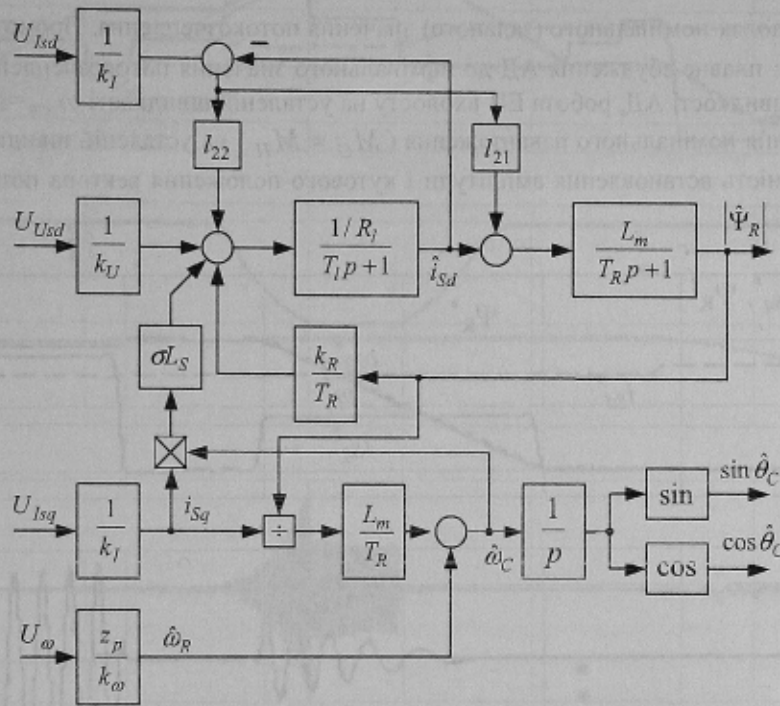


Рисунок 1 – Структурна схема СП.

Вхідними сигналами для СП (рис.1) є:

- напруга  $U_{U_{sd}} = k_U u_{sd}$ , яка є пропорційною складовій напруги статора  $u_{sd}$ , що через координатні перетворення обчислюється за вимірюваними (за допомогою датчика з коефіцієнтом передачі  $k_U$ ) фазними напругами статора АД;
- напруги  $U_{I_{sd}} = k_I i_{sd}$ ,  $U_{I_{sq}} = k_I i_{sq}$ , які є пропорційними відповідним складовим струму статора, що вимірюються (з урахуванням координатних перетворень) за допомогою датчиків з коефіцієнтом передачі  $k_I$ ;
- напруга  $U_{\omega} = k_{\omega} \omega$ , яка є пропорційною швидкості АД, що вимірюється за допомогою датчика з коефіцієнтом передачі  $k_{\omega}$ .

Аналіз структурної схеми (рис.1) показує, що в СП присутній нелінійний змінний збурюючий вплив  $e_q = \sigma L_S \omega_c i_{sq}$ . Це, як випливає з подальших досліджень, за умови наявності в системі керування відповідного компенсуючого зв'язку не порушує асимптотичності встановлення поточкозчеплення модуля і кутового положення вектора поточкозчеплення ротора.

Коригувальні коефіцієнти СП, при припущенні, що параметри АД є постійними, не залежать від режиму роботи ЕП і співпадають з аналогічними параметрами структурної схеми СП, при представленні бажаного поліному в формі  $H_2(p) = p^2 + \gamma \Omega_0 p + \Omega_0^2$ , дорівнюють:

$$\left. \begin{aligned} I_{21} &= \frac{\sigma L_S}{k_R L_m} (T_R^2 \Omega_0^2 - \gamma T_R \Omega_0 + 1) + 1; \\ I_{22} &= \sigma L_S (\gamma \Omega_0 - T_R^{-1}) - R_l, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

де  $\Omega_0$  – середньгеометричний корінь характеристичного полінома СП:

$$\Omega_0 = \lambda / T_{\mu};$$

$T_{\mu}$  – мала некомпенсована стала часу системи;  $\lambda = 0,5 \dots 2,0$ .

Для оцінки точності встановлення значення вектора потокозчеплення ротора була розглянута традиційна система „трансвектор”. При моделюванні задалися параметрами двигуна 4А-112-М4 (5,5 кВт, 380 В, 1448 об/хв., 10,4 А), а в якості характеристичного полінома СП прийняли поліном Баттерворта 2-го порядку ( $\gamma = \sqrt{2}$ ), і задалися величиною  $\lambda = 1$ . Динамічні властивості інвертора напруги (ІН) враховувалися за допомогою ланки чистого запізнювання на інтервал  $\tau = 2T_\mu$ . Для чисельного рішення рівнянь моделі системи застосовувався метод Рунге-Кутта 4-го порядку.

Результати моделювання паралельної роботи системи векторного керування і СП наведені на рис.2. Задана ( $\omega_3^*$ ) і дійсна ( $\omega$ ) швидкості вказані у долях синхронної швидкості АД, складові ( $i_{sd}^*$  і  $i_{sq}^*$ ) струму статора – у долях номінального значення струму статора АД, амплітуда вектора потокозчеплення ( $\Psi_R^*$ ) і похибка її оцінювання  $\tilde{\Psi}_R^*$  вказані у долях номінального (заданого) значення потокозчеплення. Промодельована така послідовність роботи системи: плавне збудження АД до номінального значення потокозчеплення, розгін без навантаження до синхронної швидкості АД, робота ЕП вхолосту на усталеній швидкості  $\omega_{ycm} = \omega_0$  (режим ідеального холостого ходу), накидання номінального навантаження ( $M_C = M_H$ ) на усталеній швидкості. Аналіз графіків свідчить про високу точність встановлення амплітуди і кутового положення вектора потокозчеплення ротора АД.

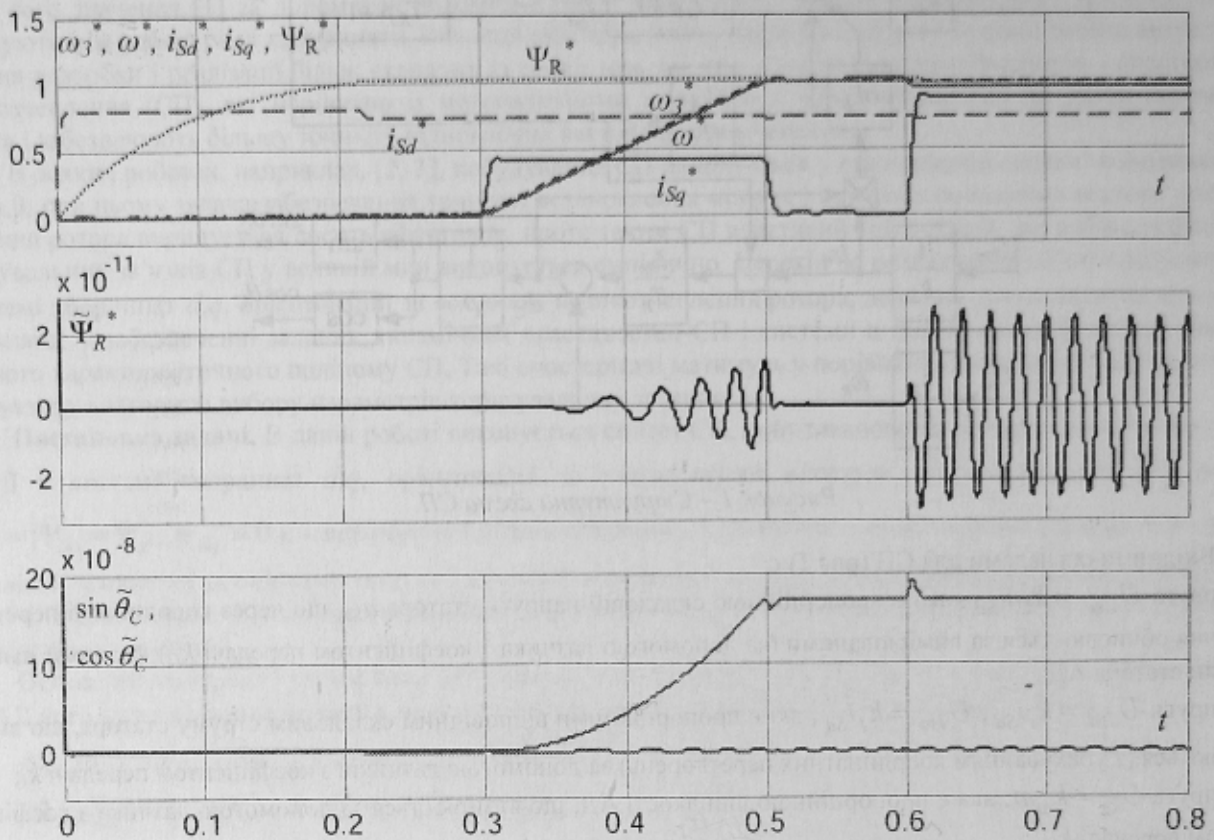


Рисунок 2 – Графіки процесів при паралельній роботі системи і СП

Дослідження статичних і динамічних властивостей системи векторного керування зі СП виконувалося за допомогою математичної моделі при замиканні контуру регулювання модуля вектора потокозчеплення ротора за його оцінкою  $\tilde{\Psi}_R$  і застосуванні гармонічних функцій відновленого значення кутового положення цього вектора –  $\sin \tilde{\theta}_c$  і  $\cos \tilde{\theta}_c$  – для орієнтації системи координат. На рис.3 наведені графіки перехідних процесів в системі при роботі з реактивним навантаженням  $M_C = |M_{Cp}| \text{sign}(\omega)$  на валу АД. Позначення і одиниці виміру величин відповідають таким на рис.2. Для ілюстрації властивостей системи обрана така послідовність роботи системи: плавне збудження АД до номінального значення потокозчеплення, розгін без навантаження до швидкості  $\omega = \omega_0$ , робота на усталеній (синхронній) швидкості вхолосту, накидання половинного навантаження  $|M_{Cp}| = 0,5M_H$  на усталеній швидкості і робота з навантаженням, підрозгін до подвійної швидкості ( $\omega_3 = 2\omega_0$ ), робота на усталеній подвійній швидкості, перехід на малу швидкість (сигнал завдання на швидкість  $\omega_3$  встановлений на рівні 10% від синхронної), робота з усталеною малою швидкістю, стрибкоподібне додавання поло-

винного навантаження ( $|M_{Cp\Sigma}| = M_H$ ) і робота з номінальним навантаженням на малій швидкості, реверсування (розгін у зворотному напрямку) до синхронної швидкості ( $\omega_3 = -\omega_0$ ), робота на усталеній швидкості з номінальним навантаженням, гальмування ЕП до нульової швидкості, зупин збудженого АД на нульовій швидкості. Аналіз графіків дозволяє зробити висновок про те, що за розглянутих умов система векторного керування зі зворотними зв'язками за оцінками амплітуди і кутового положення вектора потокозчеплення ротора має добрі статичні і динамічні властивості.

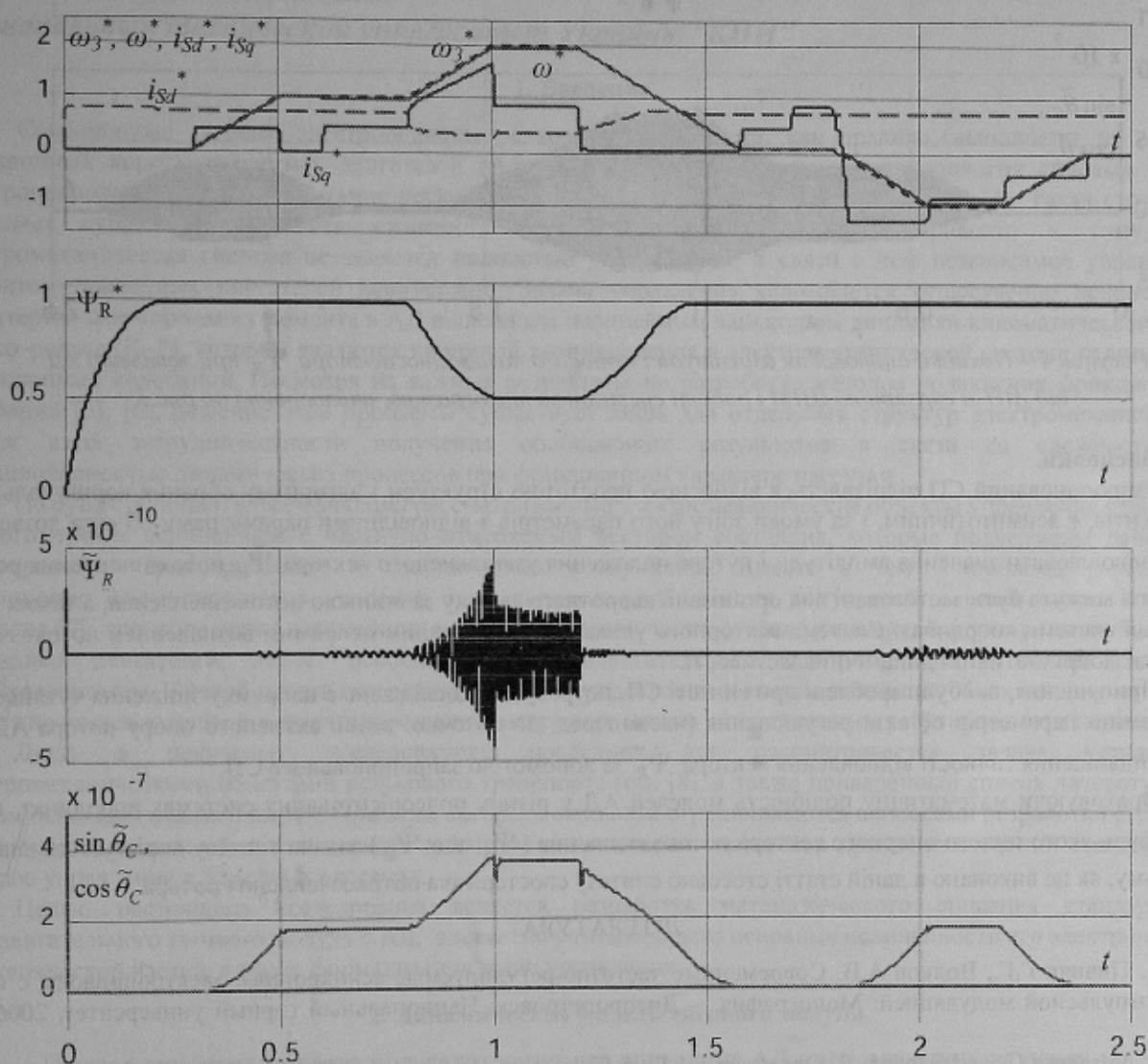


Рисунок 3 – Графіки процесів в системі, замкненій за оцінкою вектора потокозчеплення  $\tilde{\Psi}_R$

Були проведені також дослідження, які показали, що система зі СП має низьку чутливість до пульсацій вихідної напруги ІН з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), що важливо з огляду на те, що математично пов'язаний з нею сигнал  $u_{sd}$  є керуючим впливом для СП. Так, на прикладі застосування скалярного закону формування ШІМ для однорівневого ІН було встановлено, що наявність височастотних пульсацій вихідної напруги ІН не призводить до погіршення динамічних властивостей системи, хоча і спричинює деяке підвищення похибок оцінювання амплітуди і кутового положення вектора потокозчеплення ротора (рис.4).

Слід окремо зазначити, що представленому СП властивий недолік, який полягає у наявності в його параметрах в якості коефіцієнтів активних опорів ( $R_S$  і  $R_R$ ) обмоток АД, значення яких змінюється під впливом зміни теплового стану АД в процесі його роботи. При дослідженні впливу цього фактору за допомогою математичної моделі системи, замкненої за оцінкою вектора потокозчеплення ротора, встановлено, що при зміні поточних активних опорів обмоток двигуна в діапазоні 0,7...1,3 від їхніх розрахункових значень (тих, що були прийняті при синтезі системи регулювання і коригувальних коефіцієнтів СП) має місце зниження точності відновлення модуля і кутового положення вектора  $\tilde{\Psi}_R$  (похибка відновлення в окремих режимах зростала до 40%). З оглядом на велику кількість існуючих методів ідентифікації активних опорів АД, питання адаптації запропонованого СП до зміни активних опорів обмоток двигуна заслуговує на окреме широке дослідження.

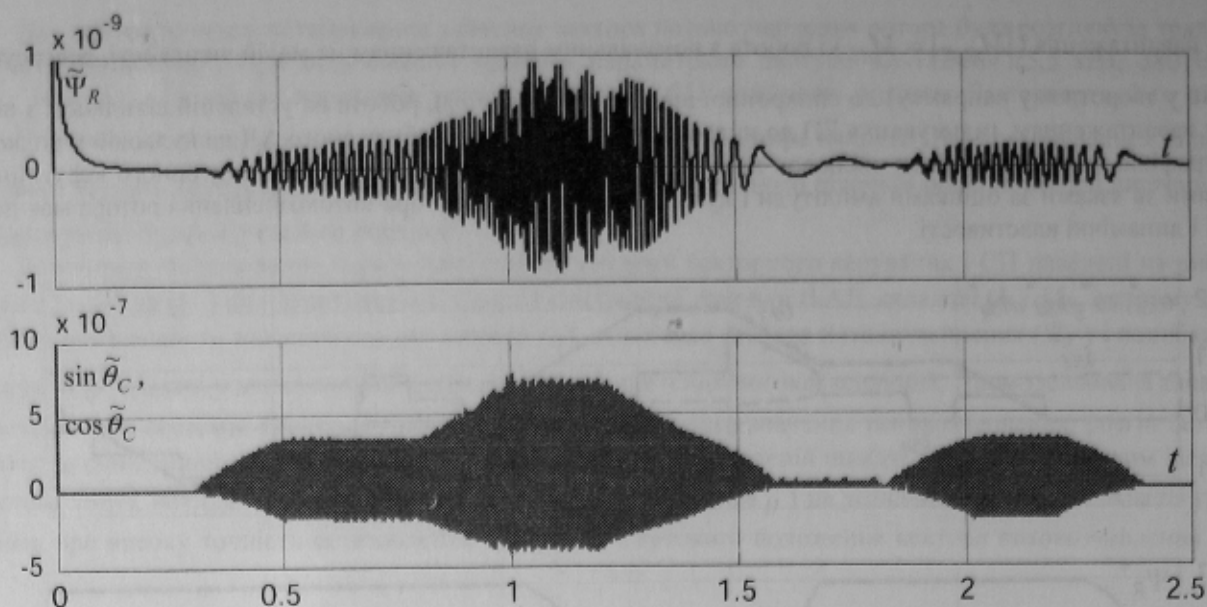


Рисунок 4 – Похибки оцінювання амплітуди і кутового положення вектора  $\tilde{\Psi}_R$  при живленні АД від АІН зі скалярною ШІМ і роботі системи за тахограмою, аналогічною до рис.3.

#### Висновки.

Запропонований СП відрізняється відносною простотою структури і алгоритму обрання коригувальних коефіцієнтів, є асимптотичним, і за умови збігу його параметрів з відповідними параметрами об'єкта дозволяє точно відновлювати значення амплітуди і кутового положення узагальненого вектора  $\tilde{\Psi}_R$  потокозчеплення ротора АД, які можуть бути застосовані для організації зворотного зв'язку за оцінкою потокозчеплення, а також для орієнтації системи координат. Система векторного управління із вказаним непрямим визначенням потокозчеплення має добрі статичні і динамічні властивості.

Припущення, що були зроблені при синтезі СП, потребують досліджень в напрямку зниження чутливості СП до зміни параметрів об'єкта регулювання (насамперед, до поточної зміни активного опору ротора АД) з метою підвищення точності відновлення вектора  $\tilde{\Psi}_R$  за допомогою запропонованого СП.

Враховуючи математичну подібність моделей АД у різних полеорієнтованих системах координат, при виборі будь-якого іншого опорного вектора потокозчеплення ( $\tilde{\Psi}_S$  або  $\tilde{\Psi}_m$ ) задача синтезу вирішується аналогічно тому, як це виконано в даній статті стосовно синтезу спостерігача потокозчеплення ротора.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Пивняк Г.Г., Волков А.В. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией: Монография. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2006. – 470 с.
2. Verghese G. and Sanders S. Observers for Flux Estimation In Induction Machines // IEEE Trans. On Industrial Electronics. – Vol.35. – No.1. – pp. 85 – 94. (1988)
3. Ковбаса С.Н. Исследование грубости наблюдателей магнитного потока асинхронного двигателя // Проблемы создания новых машин и технологий. Науч. тр. КГПУ. – Вып. 1/2001 (10). – Кременчуг: КГПУ, 2001. – С. 87 – 92.
4. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
5. Циценков Д.В. Пристрої спостереження в асинхронному електроприводі з векторним керуванням. Дис. к.т.н. (05.09.03). – Дніпропетровськ: Національна гірнична академія України, 2002. – 199 с.