

СИСТЕМА ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ІЗ РЕГУЛЮВАННЯМ ДИНАМІЧНОГО МОМЕНТУ ДВИГУНА

Толочко О.І., Чекавський Г.С., Бондаренко О.О.,
Донецький національний технічний університет

Вступ. Системи векторного керування (СВК) асинхронним електроприводом (ЕП), як відомо, характеризуються досить високими статичними і динамічними показниками роботи. Відомо, що традиційна структура СВК полягає в організації двох каналів регулювання – потокозчеплення і швидкості – шляхом організації в кожному з них двоконтурних систем підпорядкованого регулювання. У той же час підвищення жорсткості статичних характеристик ЕП (забезпечення астатизму системи за навантаженням) шляхом застосування пропорційно-інтегрального (ПІ-) регулятора швидкості (РШ) замість пропорційного (П-) пов'язане в загальному випадку із помітним погіршенням її динамічних властивостей.

Враховуючи той факт, що забезпечення астатизму за навантаженням сприяє підвищенню продуктивності роботи системи ЕП, актуальним є вдосконалення структури СВК асинхронним ЕП з метою отримання абсолютної жорсткості статичних характеристик за умов зберігання якості динамічних характеристик, властивої СВК з традиційною структурою.

В теперішній час теорія синтезу спостерігачів стану (СС) лінійних стаціонарних систем розроблена достатньо широко. Серед лінійних СС з урахуванням викладеного слід виділити спостерігачі, які дозволяють встановлювати сигнал динамічного струму (моменту), який не можна виміряти безпосередньо, з метою забезпечення астатизму системи підпорядкованого регулювання швидкості ЕП постійного струму за збуренням (статичним навантаженням) без зайвого підвищення її інерційності [1]. Ця ідея може бути застосована і до СВК асинхронним ЕП.

Мета і задачі досліджень. *Метою* даної роботи є розробка і синтез СВК асинхронним ЕП з орієнтацією за вектором потокозчеплення ротора з регулюванням динамічного моменту (ДМ) короткозамкненого асинхронного двигуна (АД).

Для цього вирішуються такі *задачі*:

- отримання моделі об'єкта спостереження (ОС);
- синтез лінійних СС;
- розробка функціональної схеми СВК асинхронним ЕП з регулюванням ДМ;
- оцінка точності відновлення динамічного моменту АД за допомогою СС;
- дослідження роботи запропонованої СВК у штатних режимах.

Математичний опис ОС. Операторні рівняння, що описують процеси в короткозамкненому асинхронному двигуні (АД) в ортогональній системі координат d, q , орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора, до якої входять

складові напруги u_{sd} , u_{sq} , струму i_{sd} , i_{sq} статора, а також потокозчеплення ротора Ψ_R , мають вигляд:

$$\begin{aligned} \sigma L_S p i_{sd} &= u_{sd} - R_l i_{sd} + \omega_C \sigma L_S i_{sq} + K_R \alpha_R \Psi_R; \\ \sigma L_S p i_{sq} &= u_{sq} - R_l i_{sq} - \omega_C \sigma L_S i_{sd} - \omega_R K_R \Psi_R; \\ p \Psi_R &= -\alpha_R \Psi_R + K_R R_R i_{sd}; \quad \omega_C = \omega_R + K_R R_R \frac{i_{sq}}{\Psi_R}; \\ M &= \frac{3}{2} z_p K_R \Psi_R i_{sq}; \quad J p \omega = M - M_C, \end{aligned} \quad (1)$$

де $R_l = R_S + K_R^2 R_R$ – еквівалентний активний опір АД; $\alpha_R = R_R / L_R$ – коефіцієнт згасання ротора; R_S , R_R – активні опори обмоток фаз статора і приведений ротора відповідно; L_S , L_R – повні індуктивності статора і ротора відповідно; $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_S L_R)$ – коефіцієнт розсіювання; L_m – взаємоіндуктивність; $K_R = L_m / L_R$ – коефіцієнт електромагнітного зв'язку ротора; ω_C – кутова частота обертання системи координат d, q ; $\omega_R = z_p \omega$ – кутова частота обертання ротора, приведена до кількості пар полюсів z_p статора; J , M_C – сумарні момент інерції системи „двигун – механізм” і момент статичного навантаження відповідно, приведені до валу АД.

За умови живлення АД від ідеалізованого інвертора напруги (ІН), а також вважаючи, що внутрішні перехресні зв'язки АД повністю скомпенсовані, можна зобразити структурну схему об'єкта в каналі регулювання швидкості СВК (рис.1), який в подальшому розглядається як ОС.

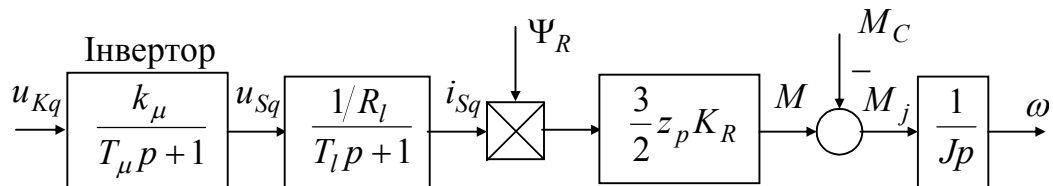


Рис.1. Структурна схема ОС.

Для забезпечення астатизму СВК за збурюючим впливом M_C запропонуємо вдосконалення її каналу регулювання швидкості, яке полягає у заміні внутрішнього контуру складової моментоутворюючої складової струму i_{sq} на контур ДМ, значення якого оцінюється за допомогою СС.

Спостерігач стану. На основі структурної схеми ОС (рис.1), зокрема, можуть бути синтезовані СС повного порядку [2] із організацією коригувального зворотного зв'язку за різницею вимірної і оціненої швидкостей. При цьому за умови можливості виміру складової струму статора i_{sq} для оцінки ДМ двигуна доцільно обмежитись застосуванням СС першого порядку, вираз для коригувального коефіцієнту якого при обранні у якості бажаного поліному Баттерворта першого порядку має вигляд:

$$l_1 = J \Omega_0, \quad (2)$$

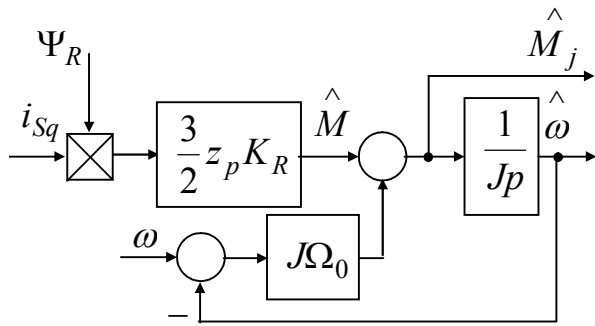


Рис.2. Спостерігач стану.

де Ω_0 – середньгеометричний корінь СС (у подальших дослідженнях обираємо $\Omega_0 = 1/T_\mu$).

Відповідна структурна схема СС має вигляд, наведений на рис.2.

Функціональна схема СВК зі зворотним зв'язком за оцінкою динамічного моменту АД наведена на рис.3.

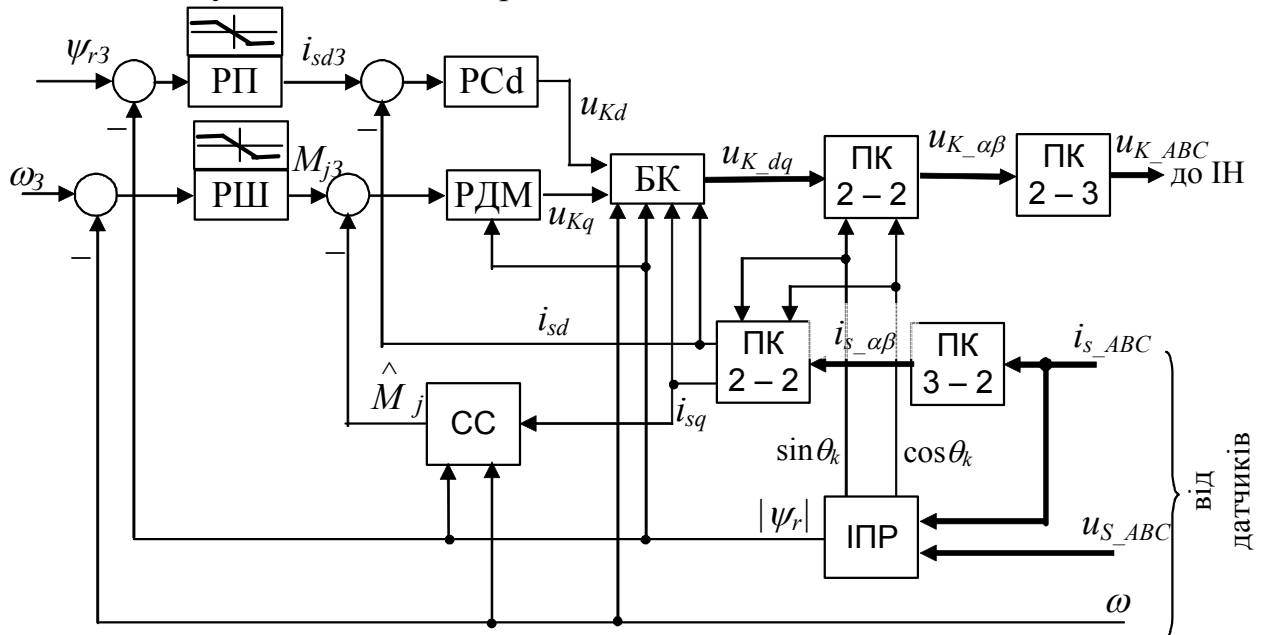


Рис.3. Функціональна схема керуючої частини СВК з орієнтацією за вектором $\vec{\Psi}_R$ та зворотним зв'язком за оцінкою динамічного моменту.

На функціональній схемі позначено: ПК – перетворювачі координат; ППР – ідентифікатор потокозчеплення ротора; БК – блок компенсації; РШ, РП, РСd, РДМ – регулятори швидкості, потокозчеплення ротора, d-складової струму статора та ДМ відповідно.

Синтез регуляторів каналу регулювання потокозчеплення виконується традиційно. Регулятор ДМ може мати передавальну функцію

$$W_{РДМ}(p) = \frac{2R_l}{3z_p K_R k_m k_\mu \Psi_R} \cdot \frac{T_l p + 1}{T_m p}, \quad (3)$$

де k_m – коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за оцінкою ДМ;

$T_m = 2T_\mu$ – стала часу інтегрування регулятора.

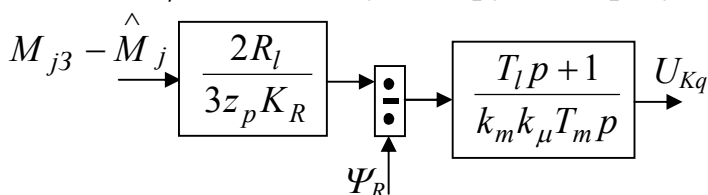


Рис.4. Структурна схема регулятора динамічного моменту

Відповідна структурна схема регулятора ДМ наведена на рис.4.

Передавальна функція П-РШ в такому випадку матиме вигляд:

$$W_{PII}(p) = \frac{k_m J}{k_\omega T_\omega}. \quad (4)$$

Оцінка точності встановлення сигналу динамічного моменту АД.

Розглянемо ідеалізований випадок, коли контур регулювання ДМ замкнений за дійсним ДМ двигуна, який вимірюється абсолютно точно. Моделювався розгін до швидкості, яка відповідає синхронній ω_{0H} при номінальній частоті АД, з наступним накиданням номінального навантаження $M_C = M_H$ на усталеній швидкості. Дослідження виконані на прикладі двигуна МТК-12-6 (3,5 кВт, 380 В, 9,6 А).

Аналіз результатів моделювання такої системи показав, що відмінність значення ДМ \hat{M}_j , оціненого за допомогою СС (рис.2), від дійсного значення M_j має місце лише в перехідному режимі, який викликаний зміною навантаження M_C , прикладеного до валу АД (рис.5). Таким чином, синтезований СС має асимптотичні властивості і може бути застосований для організації зворотного зв'язку за цією величиною.

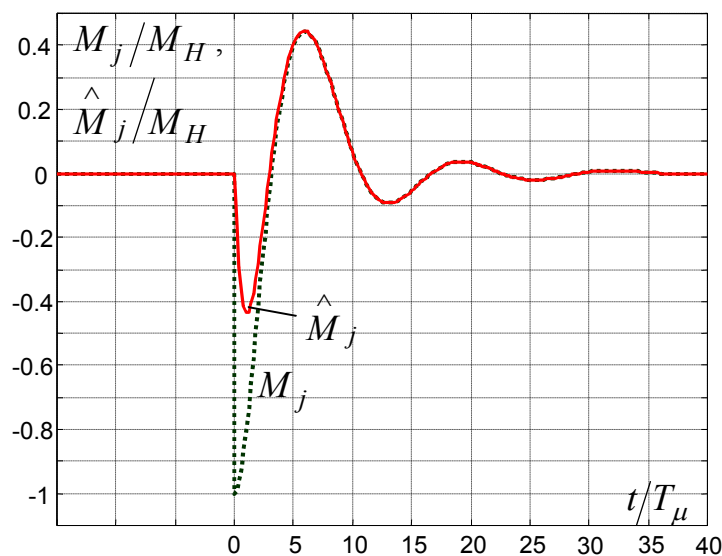


Рис.5. Зміна динамічного моменту АД і його оцінки при ступінчатому прикладанні номінального навантаження в СВК, замкненій за дійсним динамічним моментом АД.

Дослідження статичних та динамічних властивостей СВК, замкненої за оцінкою динамічного моменту АД.

При дослідженнях виконаємо порівняння синтезованої СВК з СВК з ПІ-РШ, у якій канал регулювання швидкості синтезований традиційно за симетричним оптимумом. Шляхом моделювання режимів розгону та накидання номінального навантаження були отримані залежності електромагнітного моменту і швидкості АД в функції часу в початковий період розгону (рис.6а), а також залежності електромагнітного моменту (рис.6б), швидкості (рис.6в) і потокозчеплення ротора АД (рис.6д) в функції часу в режимі накидання навантаження.

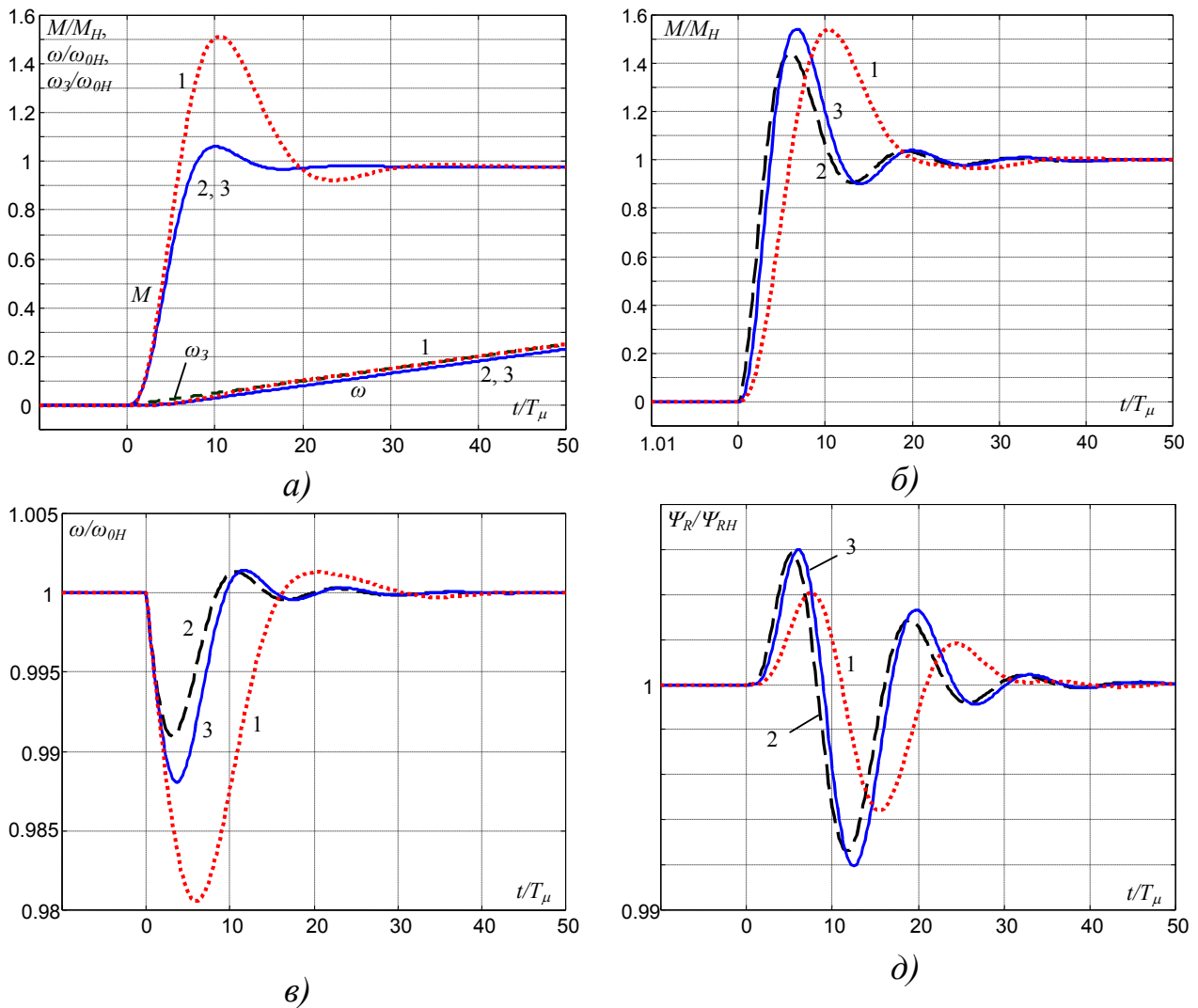


Рис.6. Перехідні процеси в різних СВК: 1 – у традиційній СВК з ПІ-РШ; 2 – в СВК зі зворотним зв'язком за дійсним ДМ (ідеалізований варіант); 3 – в СВК зі зворотним зв'язком за оцінкою ДМ.

Чисельні параметри процесів зведені в табл.1.

Аналіз даних (табл.1) дозволяє зробити такі висновки:

- на початковому інтервалі розгону робота СВК зі зворотним зв'язком за оцінкою ДМ не відрізняється від роботи ідеалізованої СВК і характеризується кращими динамічними показниками: при незначному зменшенні швидкодії перерегулювання за електромагнітним моментом АД зменшується суттєво (рис.6а);
- в режимі накидання номінального навантаження в ідеалізованій СВК перехідні процеси за електромагнітними (рис.6б) і механічними (рис.6в) величинами каналу регулювання швидкості протікають майже удвічі швидше при помітному зменшенні перерегулювання; застосування СС для оцінки значення ДМ практично не призводить до уповільнення процесів, але перерегулювання збільшуються до практично до рівня перерегулювання в СВК з ПІ-РШ;

Табл.1. Показники перехідних процесів

Режим роботи	Величина	Варіант СВК	Час першого узгодження з усталеним значенням ¹ t_y/T_μ	Перерегулювання ² $\sigma, \%$
Початок розгону	M	1. СВК з ПП-РШ	6,0	54,0
		2. Ідеалізований варіант	7,7	8,4
		3. СВК зі зворотним зв'язком за \hat{M}_j	7,7	8,4
Накидання навантаження	M	1. СВК з ПП-РШ	6,0	54,0
		2. Ідеалізований варіант	3,1	44,2
		3. СВК зі зворотним зв'язком за \hat{M}_j	3,7	54,2
	ω	1. СВК з ПП-РШ	16,2	1,9
		2. Ідеалізований варіант	8,5	0,9
		3. СВК зі зворотним зв'язком за \hat{M}_j	9,5	1,2
	Ψ_R	1. СВК з ПП-РШ	11,1	0,56
		2. Ідеалізований варіант	8,2	0,74
		3. СВК зі зворотним зв'язком за \hat{M}_j	8,9	0,81

Примітки: ¹ Для швидкості ω і потокозчеплення ротора Ψ_R наведений час першого узгодження після першого відхилення.

² Для швидкості ω і потокозчеплення ротора Ψ_R наведено максимальне відхилення.

- в режимі накидання номінального навантаження погіршуються показники стабільності потокозчеплення ротора (рис.6д), але у зв'язку із малим абсолютним значенням відхилень вони не призведуть до порушення роботи АД через насичення магнітного кола.

Таким чином, запропонована СВК асинхронним ЕП зі зворотним зв'язком за оцінкою ДМ забезпечує абсолютно жорсткі характеристики ЕП і має динамічні властивості, в загальному випадку кращі за аналогічні показники СВК з ПП-РШ. Крім того, проведені додаткові дослідження дозволяють стверджувати, що така СВК є працездатною і має добрі показники і при двозонному регулюванні швидкості АД.

За умови регулювання швидкості АД тільки у першій зоні ($\omega \leq \omega_{0H}$) блок перемноження в СС (рис.2) може бути замінений на пропорційну ланку з коефіцієнтом передачі $k = \Psi_{R3} = \Psi_{RH}$, що відповідає номінальному потоку АД. Така заміна не призводить до суттєвого погіршення властивостей системи.

Висновки. Спроектована СВК зі зворотним зв'язком за оцінкою ДМ забезпечує абсолютно жорсткі статичні механічні характеристики асинхронного ЕП, є альтернативою до СВК з ПІ-РШ і може бути рекомендована до впровадження у системи ЕП промислових механізмів, які потребують високоякісних статичних і динамічних характеристик АД, у першу чергу – підвищення швидкодії регулювання. Система зберігає просту структуру традиційних СВК, тому стосовно неї залишаються справедливими усі загальні положення щодо можливості застосування часткової компенсації внутрішніх перехресних зв'язків двигуна, застосування попереджувального управління тощо.

Система може застосовуватися як при однозонному, так і при двозонному регулюванні без зайвої зміни структури та параметрів СС.

Подальші дослідження в цьому напрямку повинні бути зосереджені на питаннях практичної реалізації синтезованих СС і СВК в цілому та налагодженні системи.

Література

1. Система подчиненого регулювання швидкості з обратной зв'язкою по оцінці динамічного струму / Коцегуб П.Х., Толочко О.І., Мариничев В.Ю., Никорюк Н.С., Розкаряка П.И. // Збірник наукових праць ДонНТУ. Серія "Електротехніка і енергетика". – Випуск 28. – Донецьк: ДонНТУ, 2001. – С. 18 – 26.

2. Толочко О.І. Аналіз та синтез електромеханічних систем зі спостережачими станами: Навч. посібник. – Донецьк: Норд-Прес, 2004. – 298 с.