

# ВПЛИВ ІНЕРЦІЙНОГО ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ НА ДИНАМІКУ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ВЕКТОРНО-КЕРОВАНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Дудник О.С., Осанадзе О.Г., студенти, Приймак Б.І., к.т.н., доц.

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу*

**Вступ.** Системи векторного керування асинхронними двигунами (АД) на сьогодні знаходять широке застосування у промисловості. В таких системах, завдяки полеорієнтуванню та компенсуванню перехресних зв'язків моделі АД, стає можливим застосування автономних систем автоматичного регулювання (САР) швидкості та потокозчеплення двигуна [2]. Згідно із принципом підпорядкованого керування регулятор швидкості налаштовується, виходячи із малої некомпенсованої сталої часу в контурі швидкості, яка вдвічі більша від малої сталої часу  $T_u$  у контурі струму. Остання визначається періодом ШІМ у живлячому АД інверторі напруги, який вимірюється десятими долями мілісекунди.

Поряд з цим, у зворотному зв'язку за швидкістю може існувати інерційне запізнення співмірне або й істотно більше за  $2T_u$ . Зокрема, дана ситуація виникає, якщо сигнал давача швидкості має високий рівень шуму і пропускається через фільтр з відповідно звуженою смугою пропускання частот. За таких умов стає актуальним оцінити вплив інерційного зворотного зв'язку на динаміку САР. Дане питання досліджується у цій статті.

**Мета роботи** – дослідити вплив інерційного зворотного зв'язку на динамічні властивості системи регулювання швидкості векторно-керованого асинхронного двигуна.

**Матеріали і результати досліджень.** Структурна схема САР швидкості двигуна зображена на рис. 1, де  $\omega$ ,  $\omega^*$  – швидкість ротора АД та її завдання;  $e$ ,  $u$  – помилка регулювання та сигнал керування;  $M$ ,  $M_L$  – момент двигуна та момент навантаження відповідно;  $\Psi_r$ ,  $\hat{\Psi}_r$  – реальне та оцінене потокозчеплення ротора. Об'єкт керування (ОК) складається із аперіодичної ланки 1-го порядку, пропорційної ланки, елемента множення та інтегрувальної ланки.

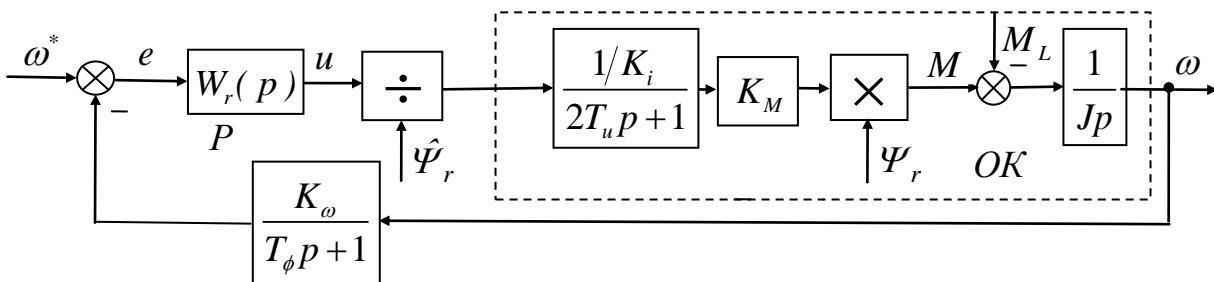


Рисунок 1 – Структурна схема САР швидкості АД з інерційним зворотним зв'язком

Перша з них описує замкнутий контур регулювання моментної складової вектора струму з пропорційно-інтегральним (ПІ) регулятором, налаштованим на модульний оптимум, де  $T_u$  – некомпенсована стала часу у контурі струму;  $K_i$  – коефіцієнт передачі давача струму. Інтегровальна ланка описує інерційність механічної частини, де  $J$  – сумарний момент інерції двигуна разом з робочим механізмом (зведеним до вала двигуна).

В системі регулятором швидкості є ПІ-регулятор з передатною функцією  $W_r(p)$ . Вихідний сигнал регулятора ділиться на  $\hat{\Psi}_r$ , щоб компенсувати наявне в ОК множення на  $\Psi_r$  і таким чином лінеаризувати об'єкт. Нижче вважатимемо, що  $\hat{\Psi}_r \cong \Psi_r$ . Інерційність зворотного зв'язку в САР відображено аперіодичною ланкою 1-го порядку з коефіцієнтом передачі  $K_\omega$  та сталою часу  $T_\phi$ .

Номинальні значення параметрів моделі системи подані в табл. 1.

Таблиця 1 – Значення параметрів моделі системи

Параметр	$K_i$	$K_M$	$J$	$K_\omega$	$T_u$
Значення	1 В/А	2,82	0,005 кг·м <sup>2</sup>	0,0636 В·с/рад	0,5 мс

Передатна функція ПІ-регулятора швидкості має вигляд

$$W_r(p) = \frac{K_1 p + K_2}{p} \quad (1)$$

За налаштування регулятора на симетричний оптимум його параметри дорівнюють

$$K_1 = 4T_v K_2, \quad K_2 = \frac{K_i J}{8T_v^2 K_M K_\omega} \quad (2)$$

де  $T_v$  – некомпенсована стала часу контуру швидкості. Нижче дослідимо два варіанти системи. У 1-му варіанті інерційність зворотного зв'язку не враховуватиметься в налаштуванні регулятора. У цьому разі некомпенсована стала часу задаватиметься як

$$T_v = T_i, \quad (3)$$

де  $T_i = 2T_u$  – стала часу замкнутого контуру струму. В 2-му варіанті інерційність зворотного зв'язку враховуватиметься в налаштуванні регулятора. Тут некомпенсована стала часу задаватиметься як

$$T_v = T_i + T_\phi \quad (4)$$

Виконаємо дослідження динамічних властивостей обох варіантів САР шляхом математичного моделювання. Отримані результати представлені на рис. 2-5, де криві 1 відповідають першому варіанту САР, а криві 2 – другому.

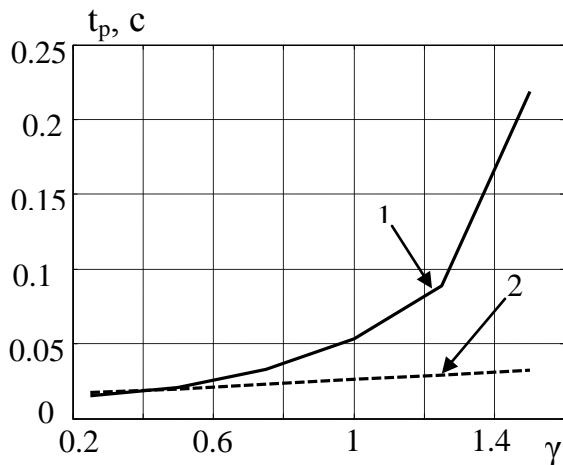


Рисунок 2 – Залежності часу регулювання від співвідношення сталих часу за східчастого завдання

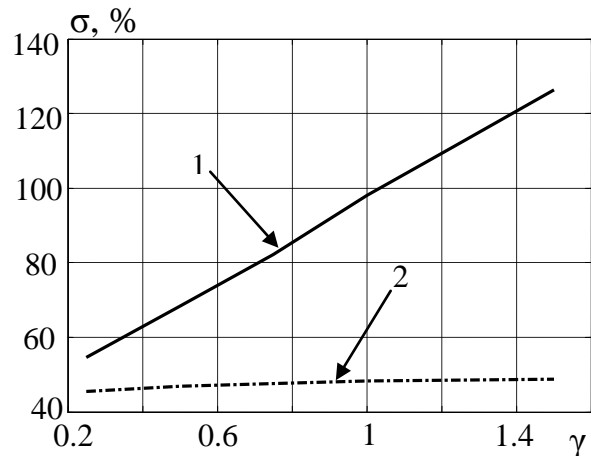


Рисунок 3 – Залежності перерегулювання від співвідношення сталих часу за східчастого завдання

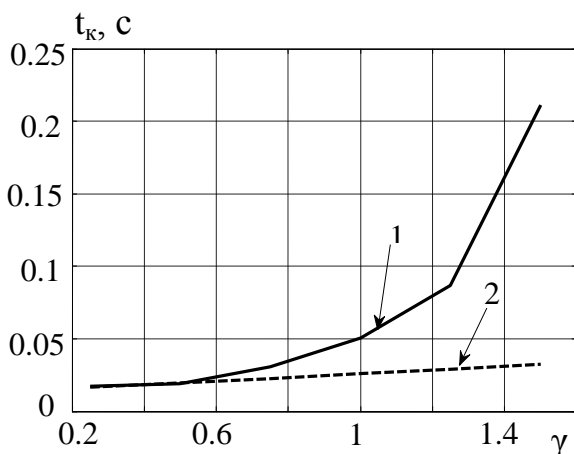


Рисунок 4 – Залежності часу компенсування східчастого збурення від співвідношення сталих часу

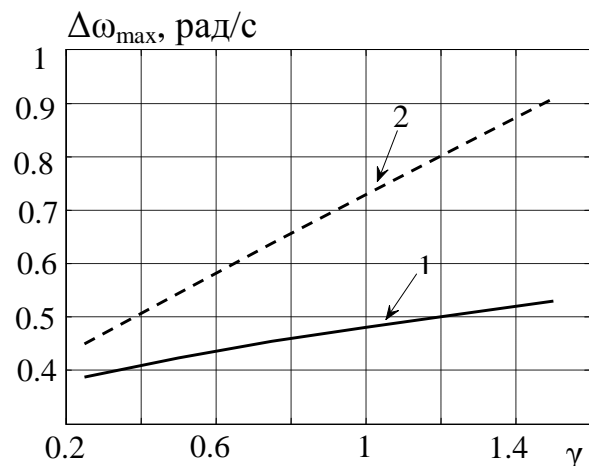


Рисунок 5 – Залежності максимального відхилення  $\omega$  за східчастого збурення від співвідношення сталих часу

На рис. 2 та рис. 3 побудовані залежності часу регулювання  $t_p$  та перерегулювання  $\sigma$  за стрибкоподібної зміни завдання  $\omega^*$  від співвідношення сталих часу

$$\gamma = T_\phi / T_i . \quad (5)$$

На рис. 4-5 наведені залежності часу компенсування  $t_k$  та максимального відхилення швидкості  $\Delta\omega_{max}$  за стрибкоподібної зміни збурення  $M_L$  від  $\gamma$ .

Як видно з наведених рисунків, перші три показники якості перехідних процесів із зростанням  $\gamma$  для 1-го варіанту САР різко погіршуються, а для 2-го варіанту САР – змінюються досить мало. Проте  $\Delta\omega_{max}$  приблизно вдвічі менше

для 1-го варіанту САР ніж для другого. У цілому динамічні властивості 2-го варіанту САР менше залежать від впливу інерційного зворотного зв'язку.

Важливо дослідити залежність межі стійкості обох варіантів систем від співвідношення сталих часу  $\gamma$ . Для цього скористаємося критерієм стійкості Гурвіца. Як відомо [2], для системи 4 порядку з характеристичним поліномом

$$H(p) = a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4 = 0, \quad (6)$$

умовою стійкості є додатність діагонального мінору третього порядку визначника Гурвіца, що має вигляд

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = a_1 a_2 a_3 - a_0 a_3^2 - a_1^2 a_4. \quad (7)$$

Для 1-го варіанту САР були отримані коефіцієнти  $H(p)$  у вигляді  $a_0 = 8 \cdot 10^{-12} \gamma$ ,  $a_1 = 8 \cdot 10^{-9} (1 + \gamma)$ ,  $a_2 = 8 \cdot 10^{-6}$ ,  $a_3 = 4 \cdot 10^{-3}$ ,  $a_4 = 1$ . Підставивши ці коефіцієнти у праву частину (7) та прирівнявши її до нуля, було отримано наступний розв'язок рівняння:  $\gamma = \sqrt{3}$ . Це межа стійкості 1-го варіанту САР.

Для 2-го варіанту САР були отримані коефіцієнти  $H(p)$  у вигляді  $a_0 = 8 \cdot 10^{-12} \gamma (\gamma + 1)^2$ ,  $a_1 = 8 \cdot 10^{-9} (\gamma + 1)^3$ ,  $a_2 = 8 \cdot 10^{-6} (\gamma + 1)^2$ ,  $a_3 = 4 \cdot 10^{-3} (\gamma + 1)$ ,  $a_4 = 1$ . Підставивши ці коефіцієнти у праву частину (7), отримаємо

$$\Delta_3 = 3\gamma^6 + 16\gamma^5 + 37\gamma^4 + 48\gamma^3 + 37\gamma^2 + 37\gamma + 3. \quad (8)$$

Оскільки за наявності інерційного зворотного зв'язку  $T_\phi > 0$ , то, згідно з (5),  $\gamma > 0$ , тому вираз (8) завжди буде додатним. Це значить, що 2-й варіант САР буде стійким за довільних значень  $\gamma$ .

**Висновки.** Для зменшення впливу інерційного зворотного зв'язку на динамічні показники САР швидкості АД при налаштуванні ПІ-регулятора на симетричний оптимум некомпенсовану сталу часу контуру швидкості слід задавати як суму сталих часу замкнутого контура струму та інерційного зворотного зв'язку. Якщо не враховувати інерційність зворотного зв'язку в налаштуванні регулятора, то межею стійкості САР буде значення співвідношення сталих часу  $\gamma = \sqrt{3}$ . Проте в іншому випадку стійкість САР від  $\gamma$  не залежатиме.

#### Перелік посилань

1. Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов: учебник для вузов / О.П. Михайлов. – М.: Машиностроение, 1990. – 304 с.
2. Попович М.Г. Теорія автоматичного керування: підруч. для студ. вищ. техн. навч. закл. / М.Г. Попович, О.В. Ковальчук. – К.: Либідь, 2007. – 656 с.