

СИСТЕМИ НЕПРЯМОГО РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ЗІ СПОСТЕРІГАЧАМИ СТАНУ

Толочко О.І., Пісковатська О.В., Кудокоцев С.М.
Донецький національний технічний університет
ola@elf.dgtu.donetsk.ua

In article the system of indirect regulation of speed with two continuous-time state observers (SO) is considered. The comparative analysis of work of system with SO is carried out at load-on. Recommendations for achievement astaticism and improvements of quality of transients are given.

При відсутності високих вимог до точності підтримання швидкості ω часто використовують системи непрямого регулювання. Це дозволяє позбутися тахогенераторів, які вимагають додаткового догляду, не дуже надійні у порівнянні з статичними електронними датчиками та є джерелом додаткових перешкод у системі. Звичайно зовнішній регулятор в цих системах замикають через датчик напруги (ДН), датчик ЕРС (ДЕ), або через модель двигуна (МД), яка перетворює сигнал напруги двигуна у сигнал, пропорційний його швидкості при відсутності навантаження. Кожна з цих систем має свої недоліки, з яких можна відзначити залежність статичних та динамічних показників системи ДН від параметрів об'єкта регулювання, інерційність ДЕ, підвищений статизм за навантаженням в системах з ДЕ і МД, зниження швидкодії за керуючою дією в системах з ДЕ.

Усі перелічені вище системи непрямого регулювання швидкості застосовують переважно з пропорційним регулятором у зовнішньому контурі, внаслідок чого сигнал, пропорційний швидкості, відтворюється з помилкою, тобто такі системи є статичними за навантаженням. Якщо вимоги до системи керування електроприводом високі, але за деяких умов відсутній тахогенератор, то для відновлення сигналу швидкості можна використати спостерігачі стану (СС).

Розглянемо два варіанти систем непрямого підпорядкованого регулювання швидкості електромеханічним об'єктом ТП-Д (тиристорний перетворювач – двигун постійного струму) з ПІ-регулятором струму (РС), ПІ-регулятором швидкості (РШ) та СС другого порядку. Можливі наступні варіації вхідних та контролюючих сигналів СС:

СС1 – вхід за ЕРС E_{Π} тиристорного перетворювача, корекція за струмом якоря двигуна $I_{\text{дв}}$;

СС2 – вхід за струмом двигуна $I_{\text{дв}}$, корекція за напругою датчика ЕРС двигуна $U_{\text{де}}$.

Структурні схеми відповідних систем підпорядкованого регулювання (СПР) з СС у відносних одиницях (в.о.) наведені на рисунках 1, 2.

За базові величини основних сигналів прийняті швидкість ідеального холостого ходу ω_0 , струм короткого замикання $I_{\text{кз}}$ та номінальна напруга якоря двигуна $U_{\text{н}}$, тобто $\omega^* = \omega / \omega_0$, $I^* = I / I_{\text{кз}}$, $E^* = E / U_{\text{н}}$.

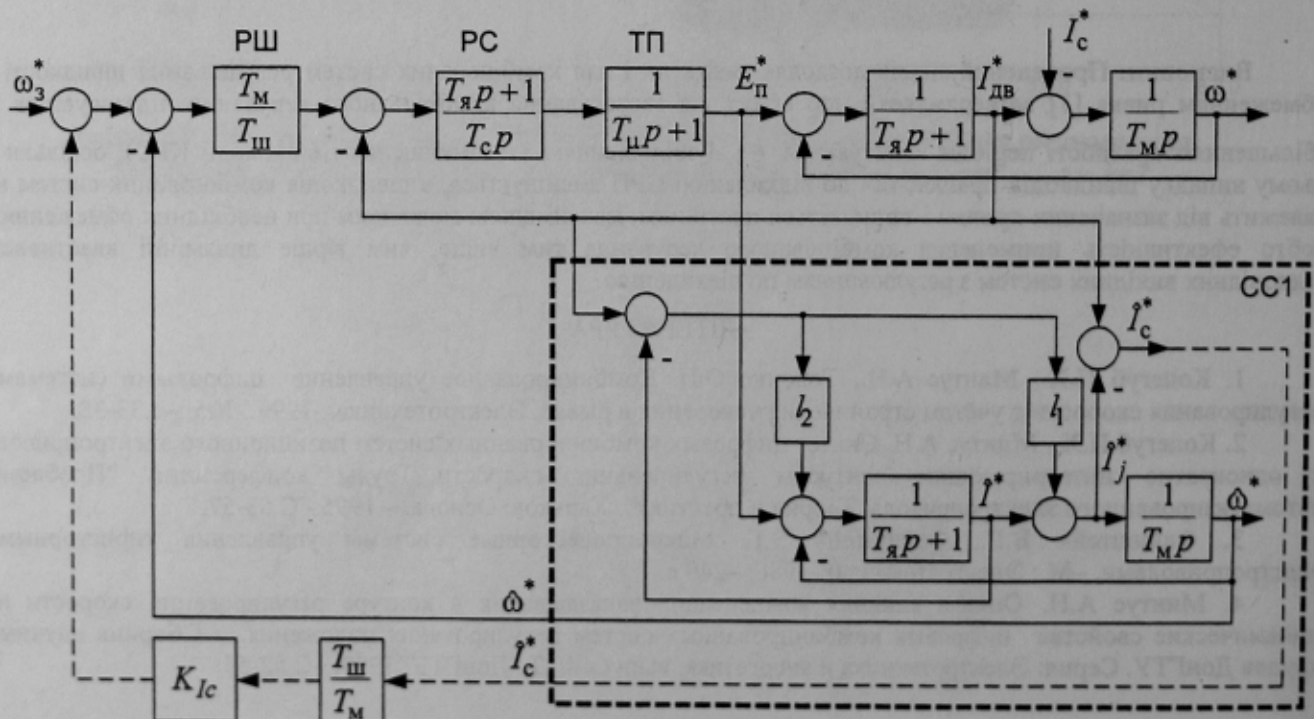


Рисунок 1 – Структурна схема СПР з СС1

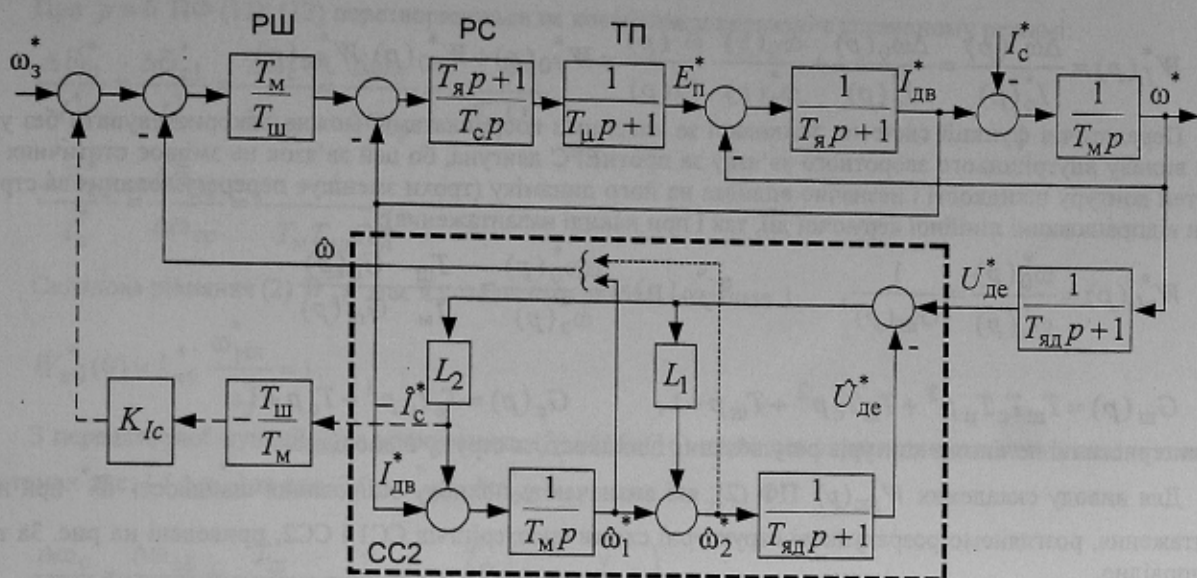


Рисунок 2 – Структурна схема СПР з СС2

На схемах позначені: $T_{\text{я}}$, $T_{\text{яд}}$ – електромагнітні сталі часу якорного кола ТП-Д і якоря двигуна; $T_{\text{м}}$ – електромеханічна стала часу привода; $T_{\text{ц}}$ – стала часу тиристорного перетворювача; $T_{\text{с}}$, $T_{\text{ш}}$ – сталі часу інтегрування розімкнених контурів струму і швидкості.

Звернемо увагу на те, що у системі рис. 2 запропоновано два способи оцінювання швидкості двигуна одним і тим же пристроєм спостереження, які відрізняються точкою знімання відновленого сигналу. У першому випадку, згідно з загальноприйнятою методикою синтезу, ця точка розташована на виході інтегратора (сигнал $\hat{\omega}_1^*$), а у другому випадку – на виході суматора, до якого надходить зворотний зв'язок з корегувальним коефіцієнтом L_1 (сигнал $\hat{\omega}_2^*$). Другий варіант запропоновано, виходячи з того, що при зміні невимірюваного струму (моменту) навантаження $I_{\text{с}}^*$ сигнал $\hat{\omega}_2^*$ буде точніше оцінювати швидкість, якщо корекція спостерігача виконується за вихідним сигналом ДЕ. Можна довести, що заміна зворотного зв'язку за оцінкою $\hat{\omega}_1^*$ на зворотний зв'язок за оцінкою $\hat{\omega}_2^*$ не впливає на характеристичний поліном системи і спостерігача, тобто теорема розподілу залишається справедливою в обох випадках.

Одночасно з ідентифікацією швидкості запропоновані СС дозволяють відновлювати і статичний струм, який можна використати для зменшення або ліквідації статизму за навантаженням (зворотний зв'язок за сигналом оцінки статичного струму спостерігача $I_{\text{с}}^*$ на схемах показано пунктиром). Ідентифікація $I_{\text{с}}^*$ відбувається за принципом, викладеним у [1].

Метою цієї статті є порівняльний аналіз систем з П- та ПІ-РШ, замкнених за вимірюною швидкістю, з системами, замкненими за оцінкою швидкості та оцінкою статичного струму $I_{\text{с}}^*$, відновленими за допомогою СС.

Якщо параметри моделей, покладених в основу СС, повністю співпадають з відповідними параметрами об'єкта регулювання, то динамічні властивості досліджуваних систем при відпрацюванні керуючої дії однакові. Порівняємо між собою поведінку систем зі спостерігачами СС1 і СС2 та без них при накиді навантаження. Почнемо з визначення статичного падіння швидкості в цьому режимі.

Як відомо, в системі регулювання з ПІ-РШ, замкненій за вимірюною швидкістю при відсутності додатного зв'язку за оцінкою $I_{\text{с}}^*$, цей параметр $\Delta\omega_{\text{с}0}$ знаходять за формулою

$$\frac{\Delta\omega_{\text{с}0}}{\Delta\omega_{\text{ср}}} = -\frac{\Delta\omega_{\text{с}0}^*}{I_{\text{с}}^*} = \frac{T_{\text{ш}}}{T_{\text{м}}}, \quad (1)$$

де $\Delta\omega_{\text{ср}}$ – статичне падіння швидкості у розімкненій системі ТП-Д.

У відповідності з формулами, виведеними в [2], передаточні функції (ПФ) за невимірюваним збуренням систем, замкнених через СС ($W_{\text{ф}}^*(p)$), складаються з ПФ за збуренням системи, замкненої за власними координатами ($W_{\text{ф}0}^*(p)$), та добутку ПФ за керуванням цієї ж системи ($W_{\text{ф}u}^*(p)$) і ПФ спостерігача, до якого прикладене збурення ($W_{\text{фс}}^*(p)$):

$$W_f^*(p) = \frac{\Delta\omega^*(p)}{I_c^*(p)} = \frac{\Delta\omega_0^*(p)}{I_c^*(p)} + \frac{\omega_0^*(p)}{\omega_3^*(p)} \cdot \frac{\tilde{\omega}^*(p)}{I_c^*(p)} = W_{f0}^*(p) + W_{u0}^*(p) \cdot W_{fcc}^*(p). \quad (2)$$

Передаточні функції системи, замкненої за власними координатами, можна використовувати без урахування впливу внутрішнього зворотного зв'язку за протиЕРС двигуна, бо цей зв'язок не змінює статичних властивостей контуру швидкості і незначно впливає на його динаміку (трохи зменшує перерегулювання за струмом як при відпрашванні лінійної керуючої дії, так і при нахиді навантаження):

$$W_{u0}^*(p) = \frac{\omega_0^*(p)}{\omega_3^*(p)} = \frac{1}{G_{ш}(p)}, \quad W_{f0}^*(p) = \frac{\Delta\omega_0^*(p)}{\omega_3^*(p)} = -\frac{T_{ш}}{T_{м}} \cdot \frac{G_c(p)}{G_{ш}(p)}, \quad (3)$$

де

$$G_{ш}(p) = T_{ш}T_cT_{\mu}p^3 + T_{ш}T_cp^2 + T_{ш}p + 1, \quad G_c(p) = T_cT_{\mu}p^3 + T_cp + 1 \quad (4)$$

– характеристичні поліноми контурів регулювання швидкості та струму відповідно.

Для виводу складових $W_{fcc}^*(p)$ ПФ (2), які визначають похибку оцінювання швидкості $\tilde{\omega}^*$ при нахиді навантаження, розглянемо розрахункові структурні схеми спостерігачів СС1 і СС2, приведені на рис. 3а та рис 3б відповідно.

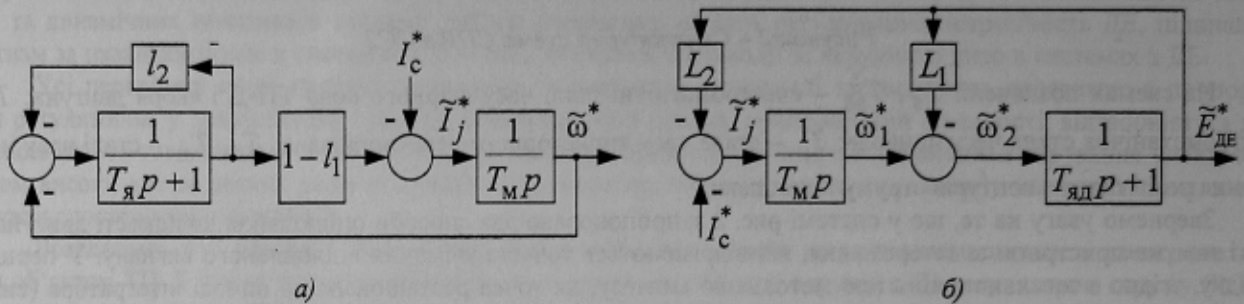


Рисунок 3 – Розрахункові структурні схеми спостерігачів СС1 і СС2

Із аналізу схем рис. 3 отримуємо:

$$\frac{\tilde{\omega}^*(p)}{I_c^*(p)} = -\frac{T_я p + (l_2 + 1)}{T_м T_я p^2 + T_м (l_2 + 1)p + (1 - l_1)}, \quad (5)$$

$$\frac{\Delta\tilde{\omega}_1^*(p)}{I_c^*(p)} = -\frac{T_яд p + (L_1 + 1)}{T_м T_яд p^2 + T_м (L_1 + 1)p + L_2}, \quad (6)$$

$$\frac{\Delta\tilde{\omega}_2^*(p)}{I_c^*(p)} = -\frac{T_яд p + 1}{T_м T_яд p^2 + T_м (L_1 + 1)p + L_2}. \quad (7)$$

Задавшись бажаним характеристичним поліномом (ХП) другого порядку

$$G_{2ж}(p) = p^2 + \gamma\Omega_H p + \Omega_H^2, \quad (8)$$

де Ω_H і γ – середньо геометричний корінь (СГК) та коефіцієнт бажаного ХП, знаходимо стандартним способом [3] коефіцієнти коригувальних зв'язків СС

$$l_1 = 1 - T_я T_м \Omega_H^2, \quad l_2 = \Omega_H \gamma T_я - 1; \quad (9)$$

$$L_1 = T_яд \Omega_H \gamma - 1, \quad L_2 = \Omega_H^2 T_яд T_м. \quad (10)$$

Підставляючи вирази (9) у рівняння (5), а вирази (10) у рівняння (6), (7), маємо:

$$\frac{\Delta\tilde{\omega}^*(p)}{I_c^*(p)} = \frac{\Delta\tilde{\omega}_1^*(p)}{I_c^*(p)} = -\frac{p + \gamma\Omega_H}{T_м (p^2 + \gamma\Omega_H p + \Omega_H^2)} = -\frac{\gamma}{T_м \Omega_H} \cdot \frac{\frac{1}{\gamma\Omega_H} p + 1}{G_H(p)}, \quad (11)$$

$$\frac{\Delta\tilde{\omega}_2^*(p)}{I_c^*(p)} = -\frac{T_яд p + 1}{T_м T_яд (p^2 + \gamma\Omega_H p + \Omega_H^2)} = -\frac{1}{T_м T_яд \Omega_H^2} \cdot \frac{T_яд p + 1}{G_H(p)}, \quad (12)$$

де

$$G_H(p) = \frac{1}{\Omega_H^2} p^2 + \frac{\gamma}{\Omega_H} p + 1 \quad (13)$$

– ХП замкнених спостерігачів стану, унормований за вільним членом.

При $p = 0$ ПФ (11), (12) перетворюються на коефіцієнти передачі в ustalеному режимі:

$$\frac{\Delta \tilde{\omega}_c^*}{I_c^*} = \frac{\Delta \tilde{\omega}_{c1}^*}{I_c^*} = \frac{\Delta \tilde{\omega}_c}{\Delta \omega_{cp}} = \frac{\Delta \tilde{\omega}_c}{\Delta \omega_{cp}} = -\frac{\gamma}{T_M \Omega_H}, \quad (14)$$

$$\frac{\Delta \tilde{\omega}_{c2}^*}{I_c^*} = \frac{\Delta \tilde{\omega}_{c2}}{\Delta \omega_{cp}} = -\frac{1}{T_M T_{яд} \Omega_H^2}. \quad (15)$$

Складова рівняння (2) W_{u0}^* має в ustalеному режимі значення 1:

$$W_{u0}^*(0) = k_{u0}^* \frac{\omega_{уст}^*}{\omega_3^*} = 1. \quad (16)$$

З передаточної функції (2) з урахуванням (1) і (14)-(16) знайдемо вирази для статичних падінь швидкості у системах рис. 1 ($\Delta \omega_c^*$) та рис. 2 ($\Delta \omega_{c1}^*$ і $\Delta \omega_{c2}^*$):

$$\frac{\Delta \omega_c^*}{I_c^*} = \frac{\Delta \omega_{c1}^*}{I_c^*} = -\frac{T_{ш}}{T_M} - \frac{\gamma}{T_M \Omega_H} = -\frac{T_{ш}}{T_M} \left(1 + \frac{\gamma}{T_{ш} \Omega_H} \right), \quad (17)$$

$$\frac{\Delta \omega_{c2}^*}{I_c^*} = -\frac{T_{ш}}{T_M} - \frac{1}{T_M T_{яд} \Omega_H^2} = -\frac{T_{ш}}{T_M} \left(1 + \frac{1}{T_{ш} T_{яд} \Omega_H^2} \right). \quad (18)$$

До речі, статичне падіння швидкості у системі, замкненій за ЕРС двигуна, при налаштуванні її методом подвійних пропорцій [3] складає

$$\frac{\Delta \omega_{cc}^*}{I_c^*} = -\frac{T_c}{T_M} = -\frac{2(T_c + T_{яд})}{T_M} = -\frac{T_{ш} + 2T_{яд}}{T_M} = -\frac{T_{ш}}{T_M} \left(1 + \frac{2T_{яд}}{T_{ш}} \right). \quad (19)$$

Отже, з аналізу формул (11)-(15), (17)-(19) витікає:

- 1) статичне падіння швидкості при нахилі навантаження в СПР з СС перевищує статичне падіння швидкості в аналогічній системі, замкненій за виміряною швидкістю, на величину (11), або (12), в залежності від типу СС;
- 2) СПР з СС1 та СС2 з оцінкою швидкості $\hat{\omega}_1$ (назвемо його СС21) при однаковому налаштуванні СС повністю тотожні одна одній;
- 3) заміна в СПР з СС2 зворотного зв'язку за сигналом $\hat{\omega}_1$ на зворотний зв'язок за сигналом $\hat{\omega}_2$ (назвемо такий варіант спостерігача СС22) дозволяє зменшити різницю між статичною помилкою швидкості при нахилі навантаження в СПР з СС і в СПР без СС в $\gamma T_{яд} \Omega_H$ разів;
- 4) в області реальних параметрів СПР, замкнена за виходом інерційного ДЕ, має більший статизм за навантаженням, ніж системи з будь-яким із запропонованих СС;
- 5) для ліквідації різниці між статизмом за навантаженням у системі зі зворотним зв'язком за виміряною швидкістю та у системі зі зворотним зв'язком за оцінками швидкості останній треба доповнити додатним зв'язком за відновленим статичним струмом, заведеним на вхід РШ з коефіцієнтами передачі

$$K_{Ic1} = \frac{\gamma}{T_{ш} \Omega_H}, \quad K_{Ic2} = \frac{1}{T_{ш} T_{яд} \Omega_H^2} \quad (20)$$

відповідно, помноженими на коефіцієнт, зворотний до коефіцієнта підсилення регулятора швидкості;

- 6) для того, щоб досліджувані СПР з СС стали астатичними за навантаженням, складові коефіцієнтів передачі додатних зв'язків K_{Ic1} , K_{Ic2} за \hat{I}_c треба підвищити на 1, тобто

$$K_{Ic1a} = 1 + K_{Ic1} = 1 + \frac{\gamma}{\Omega_H T_{ш}}, \quad K_{Ic2a} = 1 + K_{Ic2} = 1 + \frac{1}{\Omega_H^2 T_{яд} T_{ш}}. \quad (21)$$

Таким чином, при наявності комбінованого керування за оцінкою струму навантаження вибором коефіцієнтів K_{Ic} можна забезпечити однакоє статичне падіння швидкості в системах з будь-якими із запропонованих у даній роботі спостерігачів стану. У цьому випадку і динамічні властивості систем стають однаковими. Про це свідчать їхні ПФ від I_c до I , які при виконанні умов (20) або (21) збігаються для усіх СС і мають вигляд:

при частковій компенсації статизму –

$$W_I^*(p) = \frac{I^*(p)}{I_c^*(p)} = \frac{I(p)}{I_c(p)} = \frac{(\gamma/\Omega_H)p+1}{G_{ш}(p)G_H(p)}, \quad (22)$$

при повній компенсації статизму –

$$W_{Ia}^*(p) = \frac{I^*(p)}{I_c^*(p)} = \frac{I(p)}{I_c(p)} = \frac{(T_{ш} + \gamma/\Omega_H)p+1}{G_{ш}(p)G_H(p)}. \quad (23)$$

Тепер порівняємо поведінку досліджуваних систем у перехідних процесах. Для цього задамо конкретні параметри об'єкта регулювання ($T_{я} = 4T_{\mu}$; $T_{яд} = 5T_{\mu}$; $T_M = 16T_{\mu}$) та спостерігачів ($\gamma = \sqrt{2}$ – поліном Баттеворта). Для визначення SGK Ω_H бажаного ХП спостерігача знайдемо SGK Ω_0 системи, замкненої за вимірною швидкістю.

При оптимізації цієї системи з умов модульного оптимуму ($T_c = 2T_{\mu}$, $T_{ш} = 2T_c = 4T_{\mu}$)

$$\Omega_0 = \frac{1}{\sqrt[3]{T_{ш}T_cT_{\mu}}} = \frac{1}{\sqrt[3]{8T_{\mu}^3}} = \frac{1}{2T_{\mu}}. \quad (24)$$

Реакція систем непрямого регулювання швидкості з розглянутими спостерігачами стану при $\Omega_H = 2\Omega_0 = 1/T_{\mu}$ на накид номінального навантаження приведена у вигляді перехідних функцій $\Delta\omega/\Delta\omega_{c0}$ (а) та $I_{дв}/I_H$ (б) на рис. 4, де цифрами позначені графіки для наступних систем: 0 – еталонна однократно інтегруюча СПР з П-РС, замкнена за власними координатами, 1 – СПР з СС1 та СС21 без компенсації статизму, 2 – СПР з СС22 без компенсації статизму, 3 – СПР з СС1, СС21 та СС22 з частковою компенсацією статизму.

На рис. 5 приведені аналогічні перехідні функції для астатичних за навантаженням систем: 0 – для еталонної двократно інтегруючої СПР з ПІ-РС, замкненої за власними координатами і оптимізованої за симетричним оптимумом, 1, 2, 3 – для СПР з СС1, СС21 та СС22 з повною компенсацією статизму при різних SGK спостерігачів ($1 - \Omega_H = 2\Omega_0$, $2 - \Omega_H = 4\Omega_0$, $3 - \Omega_H = 8\Omega_0$).

Показані графіки підтверджують правильність формул (14), (15), (17), (18), (20), (21).

Крім того, з них видно, що в СПР зі спостерігачами з частковою компенсацією статизму за навантаженням можна отримати точно таке статичне падіння швидкості, як і в СПР, замкненої за вимірною швидкістю, при цілком задовільній якості зміни струму якоря (перерегулювання σ дорівнює 10,2%, а час першого узгодження з усталеним значенням $t_c - 6,95T_{\mu}$). При підвищенні Ω_H криві 2 будуть наближатися до кривих 0.

При повній компенсації статизму СПР з СС мають меншу динамічну просадку швидкості ($\Delta\omega_{\max} = 0,687\Delta\omega_{c0}$) та менший час перебігу перехідних процесів, але більше перерегулювання за струмом ($\sigma = 67\%$), ніж еталонна СПР з ПІ-РШ, для якої відповідні показники мають такі значення: $\Delta\omega_{\max} = 0,95\Delta\omega_{c0}$, $\sigma = 53,7\%$.

Якщо збільшувати величину середньо геометричного кореня Ω_H , можливо зменшити перерегулювання за струмом σ до 46,6% та величину динамічної просадки швидкості $\Delta\omega_{\max}/\Delta\omega_{c0}$ до 46,5% при $\Omega_H = 16\Omega_0 = 8/T_{\mu}$ (рисунок 6).

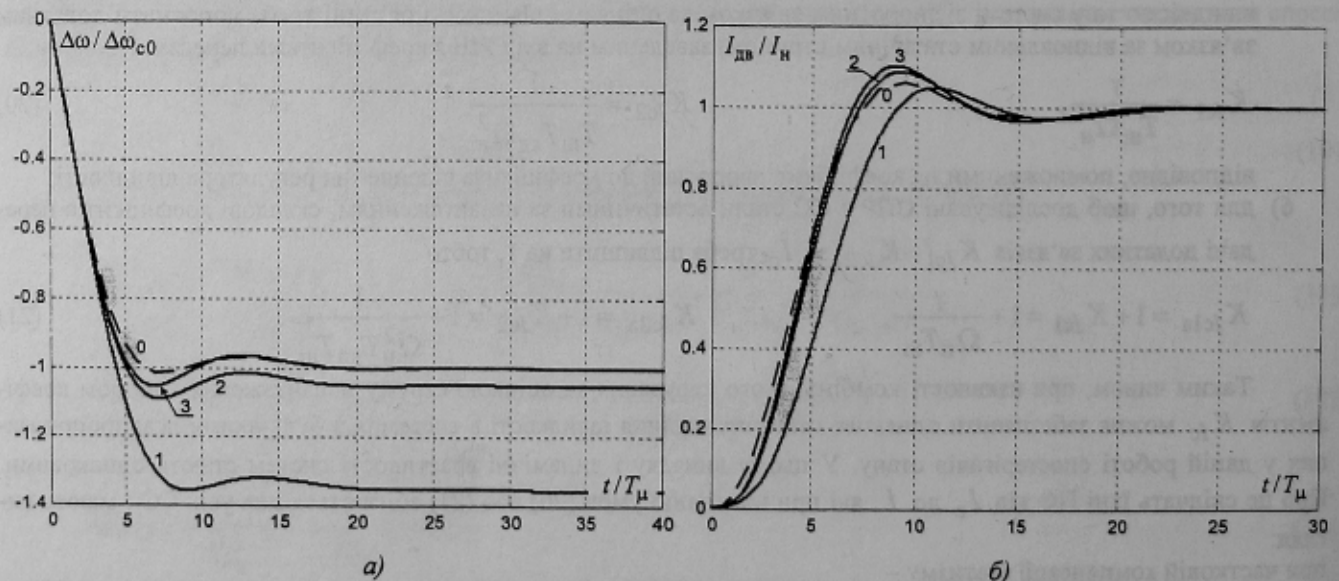


Рисунок 4 – Графіки перехідних процесів в СПР з СС при частковій компенсації статизму

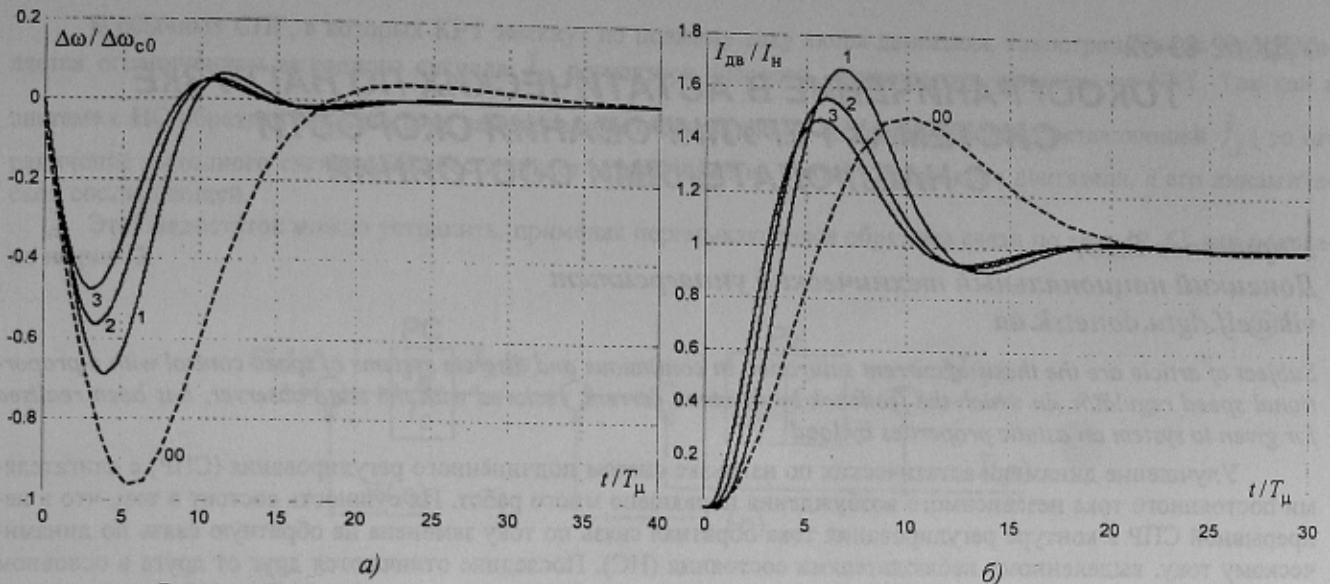


Рисунок 5 – Графіки перехідних процесів в СПР з СС при повній компенсації статизму

Показники якості перехідних процесів в системі з СС залежать тільки від параметрів характеристичних поліномів системи та спостерігача.

Отже, кращим з розглянутих варіантів при відсутності каналу компенсації статизму за навантаженням є спостерігач СС2 при замиканні КРШ за умовою $\hat{\omega}_2$. При компенсації статичного струму усі СС рівноцінні як за статичними, так і за динамічними властивостями.

Деяким недоліком спостерігачів СС2 можна вважати наявність в них датчика ЕРС, а спостерігача СС1 неможливість безпосереднього вимірювання ЕРС перетворювача. Сигнал E_p^* можна отримати пропусканням через аперіодичну ланку зі сталою часу T_μ сигналу керування тиристорним перетворювачем.

Другим розв'язком цієї задачі є заміна сигналу ЕРС перетворювача на його випрямлену напругу U_d з відповідною зміною параметрів СС

(T_π замінюється на $T_{\pi d}$, а T_M – на $T_{M d} = T_M R_{\pi d} / R_\pi$). Однак при практичній реалізації треба урахувати, що випрямлена напруга є сигналом, що отримує у своєму складі багато перешкод.

Для заключного висновку про можливість та доцільність практичного використання запропонованих спостерігачів треба виконати експериментальні дослідження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Коцегуб П.Х., Толочко О.И., Мариничев В.Ю., Розкарьяк П.И. Система подчиненного регулирования скорости с наблюдателем динамического и статического токов первого порядка // Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды КГПУ. – Кременчуг: КГПУ. – 2001. – №1(10) – С. 103-109.
2. Толочко О.И., Коцегуб П.Х., Федоряк Р.В. Анализ линейных систем с наблюдателями состояния // Вісник Харківського державного політехнічного університету. Збірка наукових праць. – Харків: ХДПУ. – 2000. – №113. – С. 78-82.
3. Толочко О.И., Коцегуб П.Х., Губарь Ю.В., Федоряк Р.В. Конструирование передаточных функций линейных САУ из условий модульного оптимума // Збірник наукових праць ДонДТУ. Серія "Електротехніка і енергетика". – Донецьк: ДонДТУ. – 2000. – №17. – С. 24-30.
4. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.

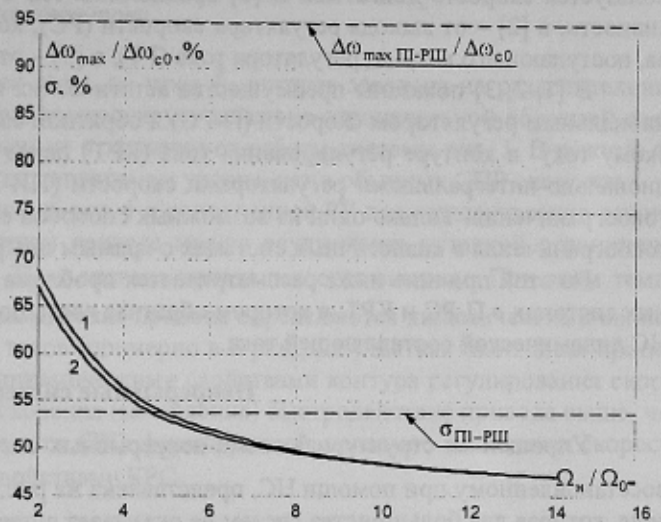


Рисунок 6 – Залежність динамічної просадки швидкості (1) та перерегулювання за струмом (2) від СГК Ω_H