

деление параметров электрической машины с массивным ротором на основе расчетов поля методом конечных элементов / В.Н. Асанбаев, Ю.А. Шумилов, Е.В. Струневич, В.А. Саратов. Препр. / АН УССР. Ин-т электродинамики. – К.: 1984. – 358.– 53 с. 6. Горячко В., Коцюба М., Рижий Т. Визначення диференційних електромагнетних параметрів у математичних моделях неявнополюсних машин з єдиним магнетним потоком // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2004. – № 511. – С. 19–22. 7. Чабан В.И. Ускоренный поиск вынужденных периодических режимов в цепях с магнитопроводами // Электричество. – 1996. – № 6. – С. 69–70. 8. Синицкий Л.Я., Хвищун И.А., Шмигельский Я.А. О надежном алгоритме поиска периодического режима в нелинейных цепях // Теоретическая электротехника. – 1981. – Вып. 30. – С. 114–125. 9. Маляр В.С. Основные положения сплайн-метода расчета периодических режимов работы электрических цепей // Электроника и связь. – 1998. – Вып. 5. – С. 11–14. 10. Яковлев М.Н. К решению систем нелинейных уравнений методом дифференцирования по параметру // ЖВМ и МФ. Т. 4. – 1964. – № 1. – С. 146–149.

УДК 62-83

Я.Ю. Марущак, А.П. Кушнір

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра ЕАП

СИНТЕЗ СПОСТЕРІГАЧА ДЛЯ ДВОМАСОВОЇ ПОЗИЦІЙНОЇ СМР ПЕРЕМІЩЕННЯМ ЕЛЕКТРОДІВ З УРАХУВАННЯМ НУЛІВ ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ

© Марущак Я.Ю., Кушнір А.П., 2006

Запропоновано методику синтезу спостерігачів з усуненням нулів передавальної функції модифікованим кореневим методом. Досліджено характеристики системи модального регулювання переміщенням електродів з таким спостерігачем. Результати дослідження показали, що цей спостерігач дає змогу покращити характеристики системи модального регулювання переміщенням електродів і, отже, зменшити дисперсію потужності дуг.

The method of synthesis of observers with zero eliminate of transfer function by the modified root method is proposed. The performances of the modal control system for electrodes motion with such observer are researched. This observer allows to improve performances of the modal control systems for electrodes motion and, thus, decrease of dispersion of arc power.

Постановка проблеми. Основні техніко-економічні показники дугової сталеплавильної печі (ДСП) значною мірою залежать від роботи системи автоматичного керування (САК) переміщенням електродів. Її основним завданням є стабілізація довжини дуги на заданому рівні. Довжина дуги визначає її потужність при певних характеристиках системи живлення. Змінюючи довжину дуги, здійснюється керування потужністю, яка вводиться в пічний простір і плавить метал.

Основним завданням синтезу САК переміщенням електродів є збільшення швидкодії в поєднанні із аперіодичним перехідним процесом переміщення електрода. Це дасть змогу не тільки рівномірно вводити задану потужність у піч, але й швидше відновлювати нормальний режим роботи печі при виникненні технологічних к.з., обривів дуг, а також зменшити час аварійних простоїв печі через поломки електродів, коли під час запалювання дуги електроди доторкнуться до шихти з недопустимими зусиллями.

Через недосконалість традиційних САК переміщенням електродів збільшення швидкодії зумовлює збільшення пружних коливань вихідної координати, що є причиною зростання дисперсії потужностей дуг і поломок електрода, а отже, це призводить до погіршення техніко-економічних показників функціонування ДСП. Збільшення швидкодії системи обмежується пружністю елементів виконавчого механізму. Тому швидкодію спеціально занижують, щоб не виникали пружні коливання регульованих координат, що призводять до збільшення дисперсії потужностей дуг та до динамічних перевантажень в конструкціях механічної частини, а також прискорює старіння і спричинює відкручування електродів у ніпельному з'єднанні.

Сучасні САК переміщенням електродів повинні усувати відхилення електричного режиму від заданого якнайшвидше (частки секунди). Електрод необхідно позиціонувати відповідно до заданої довжини з точністю до одного або декількох міліметрів, причому довжина дуги для різних ДСП і різних періодів виплавлення сталі може становити від кількох до десятків міліметрів. Перехідний процес повинен бути швидким та з мінімальним перерегулюванням.

Аналіз останніх досліджень. Для забезпечення зменшення дисперсії довжини дуги в усі періоди плавлення необхідно синтезувати САК, яка б забезпечувала стабілізацію довжини дуги в кожний момент часу на заданому рівні. Інакше значний час ДСП працює в режимах, відмінних від заданих, а це призводить до погіршення техніко-економічних показників ДСП.

У разі появи ефекту двомасовості, одним із шляхів зниження рівня дисперсії довжини дуги є покращання динамічних показників САК переміщенням електродів за допомогою модального регулятора [1, 2]. Синтезована система модального регулювання (СМР) демпфує пружні коливання і дає можливість формувати аперіодичний перехідний процес із заданою швидкодією. Для реалізації такої системи керування необхідно мати інформацію про всі координати регулювання, а саме: швидкість двигуна, характеристики пружного елемента, швидкість електрода і напругу розузгодження Δ . Вони і формують повний вектор стану об'єкта, не всі елементи якого можна виміряти безпосередньо. Для відтворення таких координат запропоновано використовувати спостерігачі. Внаслідок цього на перехідний процес СМР переміщенням електродів починає впливати спостерігач.

Традиційно синтез спостерігача здійснюють кореневим методом [3, 4]. Якщо в передавальній функції спостерігача є нулі, то їх як правило ігнорують. За такого підходу до синтезу спостерігача забезпечується лише його стійкість, а про якісні характеристики перехідного процесу вже не йдеться. Вважається, що завдяки високій швидкодії спостерігача, його нулі на перехідний процес системи впливати не будуть [4]. Але в цьому випадку виникає інша проблема. Висока швидкодія спостерігача призводить до великих значень його коефіцієнтів зворотних зв'язків, які знаходять під час синтезу. Якщо спостерігач реалізований в аналоговому вигляді, тоді він стає нелінійним і в цьому разі необхідно досліджувати поведінку системи загалом. За цифрової реалізації спостерігача, виникає проблема додавання двох чисел, які за своїми значеннями істотно відрізняються порядками [5]. Крім того, на спостерігач діють інформаційні збурення у вигляді високочастотних пульсацій, які підсилюються великими коефіцієнтами зворотних зв'язків. Це призводить до втрати стійкості всієї системи. З іншого боку, зниження швидкодії спостерігача призводить до того, що динаміка спостерігача починає впливати на всю систему.

Задачі дослідження. Основне завдання роботи полягає в тому, щоб синтезувати спостерігач для СМР переміщенням електродів, який би покращив динамічні характеристики СМР і, отже, забезпечив мінімум дисперсії довжини дуги, а значить, дисперсії потужності дуги, внаслідок чого покращуються техніко-економічні показники функціонування ДСП.

Вирішення проблеми. У роботах [6, 7] запропоновано методики синтезу спостерігачів з усуненням нулів передавальної функції. Зокрема у роботі [6] запропоновано для усунення нулів передавальної функції здійснювати корекцію спостерігача за двома координатами регулювання. Це дає можливість, завдяки надлишковій кількості коефіцієнтів зворотного зв'язку, усунути вплив нулів на перехідний процес спостерігача. Оскільки не завжди є можливість здійснювати корекцію

за декількома координатами, то пропонується використовувати модифікований кореневий метод [7], суть якого розглянута в роботі [8]. У [7] цим методом був синтезований спостерігач для двомасової СМР швидкістю. Отримані результати дають змогу стверджувати, що в СМР зі спостерігачем, який синтезувався з усуненням нулів передавальної функції модифікованим кореневим методом, при параметричних збуреннях забезпечуються кращі динамічні характеристики, ніж у системі, коли спостерігач синтезувався традиційним кореневим методом як з погляду величини перерегулювання, так і з погляду її швидкодії.

Структурна схема спостерігача для двомасової СМР переміщенням електродів показана на рис. 1. Координати тут показані у відносних одиницях.

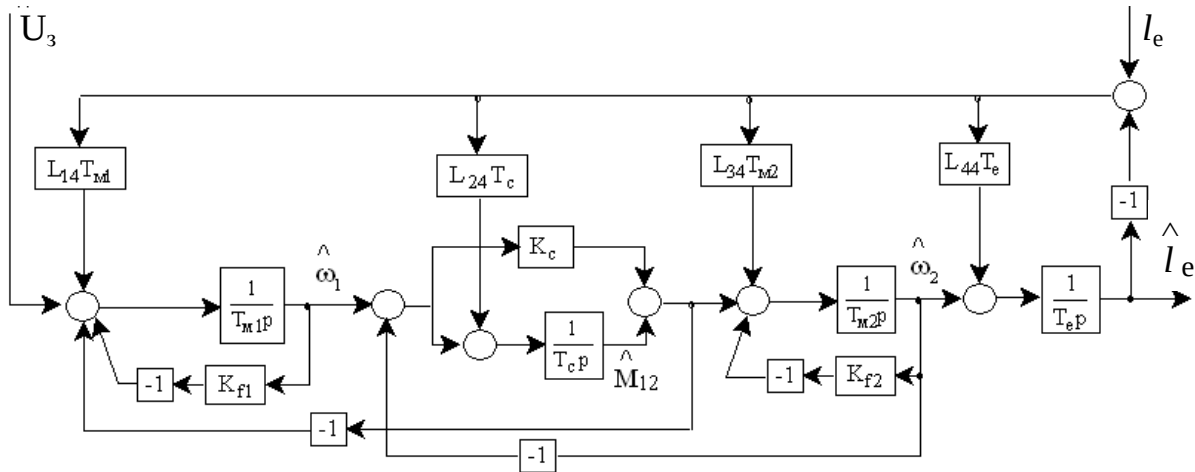


Рис. 1. Структурна схема спостерігача

Передавальна функція такого спостерігача має вигляд

$$\begin{aligned}
 W_{\text{сп}}(p) = & \frac{(T_c T_{m2} T_e)^{-1} + p K_c (T_{m2} T_e)^{-1}}{T_{m1} [p^4 + (K_{f1} T_{m1}^{-1} + K_c T_{m1}^{-1} + K_c T_{m2}^{-1} + K_{f2} T_{m2}^{-1} + L_{44}) p^3 + \rightarrow \\
 \rightarrow & + (K_{f1} K_c (T_{m1} T_{m2})^{-1} + (T_c T_{m2})^{-1} + L_{44} K_{f1} T_{m1}^{-1} + L_{44} K_c T_{m1}^{-1} + (T_{m1} T_c)^{-1} + \rightarrow \\
 \rightarrow & + K_{f1} K_{f2} (T_{m1} T_{m2})^{-1} + K_c K_{f2} (T_{m1} T_{m2})^{-1} + L_{34} T_e^{-1} + L_{44} K_c T_{m2}^{-1} + L_{44} K_{f2} T_{m2}^{-1}) p^2 + \rightarrow \\
 \rightarrow & + (K_{f1} (T_{m1} T_c T_{m2})^{-1} + L_{14} K_c T_{m2}^{-1} + L_{24} (T_{m2} T_e)^{-1} + L_{44} K_{f1} K_{f2} (T_{m1} T_{m2})^{-1} + \rightarrow \\
 \rightarrow & + K_{f2} (T_{m1} T_c T_{m2})^{-1} + L_{44} K_c K_{f2} (T_{m1} T_{m2})^{-1} + L_{44} K_{f1} K_c (T_{m1} T_{m2})^{-1} + L_{44} (T_{m1} T_c)^{-1} + \rightarrow \\
 \rightarrow & + L_{34} K_{f1} (T_{m1} T_e)^{-1} + L_{44} (T_c T_{m2})^{-1} + L_{34} K_c (T_{m1} T_e)^{-1}) p + L_{44} K_{f2} (T_{m1} T_c T_{m2})^{-1} + \rightarrow \\
 \rightarrow & + L_{34} (T_{m1} T_c T_e)^{-1} + L_{44} K_{f1} (T_{m1} T_c T_{m2})^{-1} + L_{24} K_{f1} (T_{m1} T_{m2} T_e)^{-1} + L_{14} (T_c T_{m2} T_e)^{-1}]}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Як видно з виразу (1), динаміка такого спостерігача визначається не лише полюсами, але й нулями його передавальної функції. Для того, щоб усунути нулі передавальної функції спостерігача і налаштувати його на будь-яку бажану стандартну форму розподілу коренів характеристичного рівняння, згідно з запропонованою методикою, необхідно, щоб бажаний характеристичний поліном $H_{\text{баж}}(p)$ складався з добутку двох поліномів – полінома чисельника передавальної функції системи (1) і вибраної стандартної форми, порядок якої визначається виразом $v - m$ (тут $v = 4$ – порядок

степеня характеристичного полінома (1); $m = 1$ – порядок полінома чисельника передавальної функції (1):

$$H_{\text{баж}}(p) = (pK_c(T_{m1}T_{m2}T_e)^{-1} + (T_{m1}T_cT_{m2}T_e)^{-1}) \left(p^3 + \alpha_1\omega_{0\text{сп}}p^2 + \alpha_2\omega_{0\text{сп}}^2p + \alpha_3\omega_{0\text{сп}}^3 \right), \quad (2)$$

де α_1, α_2 – коефіцієнти, що визначають вигляд стандартної форми; $\omega_{0\text{сп}}$ – задане значення середньгеометричного кореня спостерігача.

Перемноживши два поліноми виразу (2) та винісши за дужки $K_c(T_{m1}T_{m2}T_e)^{-1}$, отримаємо

$$H_{\text{баж}}(p) = K_c(T_{m1}T_{m2}T_e)^{-1} \left(p^4 + (\alpha_1\omega_0 + (K_cT_c)^{-1})p^3 + (\alpha_2\omega_0^2 + \rightarrow \rightarrow + \alpha_1\omega_0(K_cT_c)^{-1})p^2 + (\alpha_3\omega_0^3 + \alpha_2\omega_0^2(K_cT_c)^{-1})p + \alpha_3\omega_0^3(K_cT_c)^{-1} \right). \quad (3)$$

Прирівнявши коефіцієнти за однакових степенів p характеристичного полінома передавальної функції (1) і бажаного характеристичного полінома (3), отримаємо систему рівнянь, з якої знаходимо вирази коефіцієнтів зворотних зв'язків $L_{14}, L_{24}, L_{34}, L_{44}$, які забезпечують бажану форму розподілу коренів.

$$\left. \begin{aligned} L_{14} &= \frac{T_e}{K_cT_{m1}(K_{f1}K_cT_c - T_{m1})} \left[-K_{f1}K_cK_{f2} - K_{f1}^2K_c - L_{44}K_{f1}K_cT_{m2} - \rightarrow \rightarrow -L_{34}K_{f1}K_cT_cT_{m2}T_e^{-1}(K_{f1} + K_c) - L_{44}K_{f1}K_cK_{f2}T_c(K_{f1} + K_c) + \rightarrow \rightarrow + \alpha_2\omega_{0\text{сп}}K_{f1}T_{m1}T_{m2} + L_{34}K_cT_{m1}T_{m2}T_e^{-1} + L_{44}K_cK_{f2}T_{m1} - \rightarrow \rightarrow -L_{44}K_{f1}^2K_c^2T_c - \alpha_3\omega_{0\text{сп}}^3T_{m1}^2T_{m2} + \alpha_3\omega_{0\text{сп}}^3K_{f1}K_cT_{m1}T_cT_{m2} \right], \\ L_{24} &= \frac{T_e}{K_cT_c(K_{f1}K_cT_c - T_{m1})} \left[K_cK_{f2} + K_{f1}K_c + L_{44}K_c(T_{m1} + T_{m2}) + \rightarrow \rightarrow + L_{34}K_{f1}K_cT_cT_{m2}T_e^{-1} + L_{44}K_{f1}K_cK_{f2}T_c - \alpha_2\omega_{0\text{сп}}^2T_{m1}T_{m2} \right], \\ L_{34} &= \frac{T_e}{K_cT_{m1}T_cT_{m2}} \left[\alpha_1\omega_0T_{m1}T_{m2} + \alpha_2\omega_{0\text{сп}}^2K_cT_{m1}T_cT_{m2} - \rightarrow \rightarrow -L_{44}K_{f1}K_cT_cT_{m2} - L_{44}K_c^2T_c(T_{m1} + T_{m2}) - K_cT_{m2} - K_{f1}K_cK_{f2}T_c - \rightarrow \rightarrow -K_c^2T_c(K_{f1} + K_{f2}) - K_cT_{m1} - L_{44}K_cK_{f2}T_{m1}T_c \right], \\ L_{44} &= \frac{1}{K_cT_{m1}T_cT_{m2}} \left[\alpha_1\omega_{0\text{сп}}K_cT_{m1}T_cT_{m2} + T_{m1}T_{m2} - K_{f1}K_cT_cT_{m2} - \rightarrow \rightarrow -K_cK_{f2}T_{m1}T_c - K_c^2T_cT_{m2} - K_c^2T_{m1}T_c \right]. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Перехідна функція переміщення електрода, відтвореного спостерігачем $\hat{l}_e(t)$, під час синтезу відповідно до стандартної біноміальної форми ($\omega_{0\text{сп}} = 200 \text{ с}^{-1}$) згідно з виразами (4), показано на рис. 2. Значення параметрів спостерігача є такими: $T_{m1} = T_{m2} = 0,121 \text{ с}$; $T_c = 0,041 \text{ с}$; $K_{f1} = K_{f2} = 0,25$; $K_c = 1,5$.

Змоделюємо на цифровій моделі перехідний процес $l_e(t)$ двомасової позиційної СМР переміщенням електрода зі спостерігачем, коли розрахункові параметри K_c, T_c мають максимально можливі невідповідності реальним параметрам об'єкта і вони становлять 18, 30 %. Невідповідність параметрів є звичайним явищем при дослідженні електромеханічних систем, оскільки не завжди є можливість точно їх визначити. На рис. 3, а показано перехідну функцію $l_e(t)$, коли СМР переміщенням електродів і спостерігач синтезувалися традиційним кореневим методом з корекцією спостерігача за координатою l_e , а на рис. 3, б – коли СМР і спостерігач синтезувалися модифікованим кореневим методом. Модальний регулятор і спостерігач налаштовані на стандартну біноміальну форму з $\omega_0 = 50 \text{ с}^{-1}$ і $\omega_{0\text{сп}} = 150 \text{ с}^{-1}$.

Як видно з рис. 3, б, перехідна функція $l_e(t)$ СМР переміщенням електрода зі спостерігачем, синтез яких здійснювався модифікованим кореневим методом, дещо відрізняється від стандартної біноміальної форми і час досягнення усталеного значення $t_y = 0,23 \text{ с}$. У той самий час СМР зі спостерігачем, синтез яких здійснювався традиційними кореневими методами (див. рис. 3, а), взагалі

не забезпечує стандартної біноміальної форми, яка була метою синтезу і $t_y = 0,45$ с замість очікуваних 0,2 с. Коли є невідповідність значень параметрів об'єкта T_{m1} , T_{m2} розрахунковим на 15 %, перехідні функції $l_e(t)$ практично ідентичні тим, які є на рис. 3 і тому тут не наводяться.

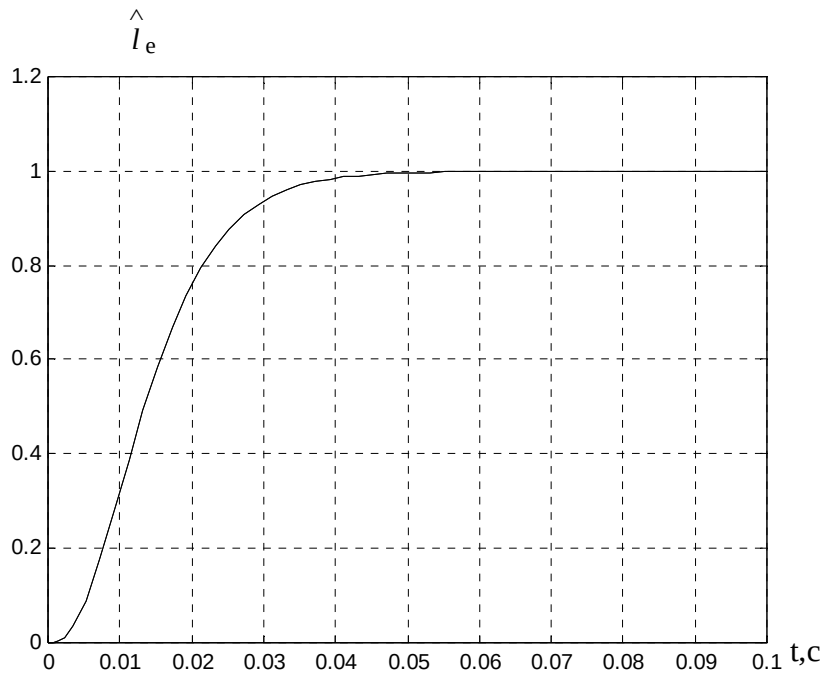


Рис. 2. Перехідна функція координати спостерігача з усуненням нулів передавальної функції під час синтезу ($\omega_{0cn} = 200$ с⁻¹)

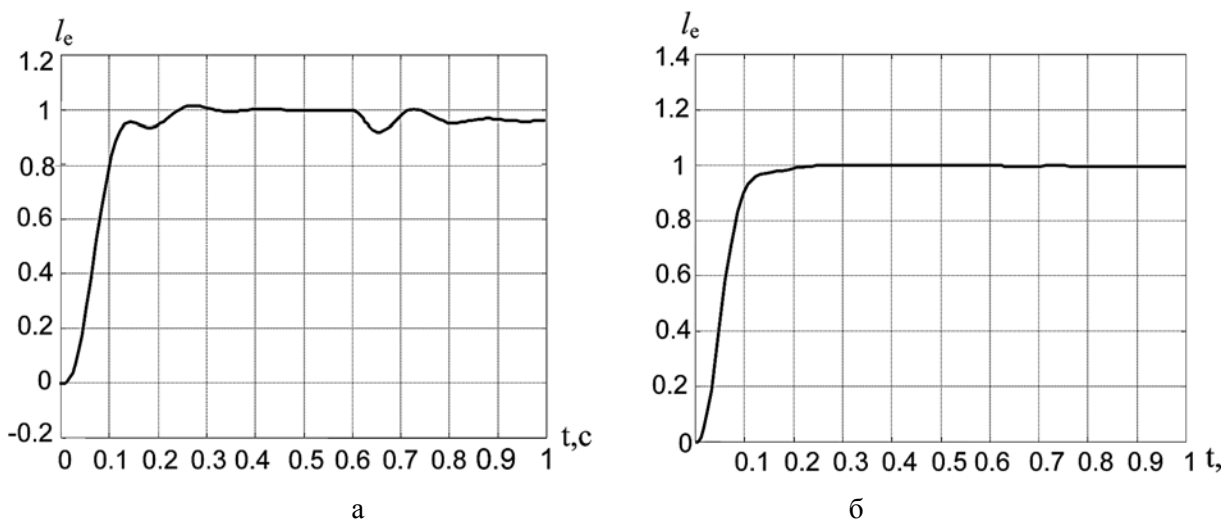


Рис. 3. Перехідна функція в двомасовій позиційній СМР зі спостерігачем, коли їх синтез здійснювали традиційним (а) та модифікованим (б) кореневим методом, при максимально можливій невідповідності значень параметрів об'єкта T_c , K_c розрахунковим ($\omega_0 = 50$ с⁻¹)

На рис. 3 в момент часу $t = 0,6$ с наведено зміну навантаження ΔM_c , яке спричинене обвалом шихти на електрод. Як видно з кривих, показаних на цьому рисунку, при дії параметричних і координатних збурень СМР переміщенням електродів зі спостерігачем, що синтезувався модифікованим кореневим методом, має кращі динамічні та статичні характеристики. Так величина статичної похибки в СМР синтезованій з усуненням нулів передавальної функції спостерігача $\delta_c \omega \approx 1$ %. Також зменшується час існування динамічної похибки (див. рис. 3, б) порівняно з системою, що синтезувалася традиційним кореневим методом (див. рис. 3, а).

Дослідження, які проілюстровані на рис. 3, підтвердили, що СМР переміщенням електрода з спостерігачем, в якому під час синтезу були усунуті нулі передавальної функції, має меншу параметричну чутливість.

Перевіримо як функціонує синтезована СМР переміщенням електродів, коли діють параметричні збурення та збурення в пічному просторі. При цьому в останніх змінюється як тривалість, так і величина та знак збурення. Це значно ускладнює роботу синтезованої системи. Оцінити якість роботи різних САК переміщенням електродів, при дії випадкових збурень, можна за допомогою квадратичного інтегрального оцінювання якості регулювання. Дисперсія довжини дуги при дії збурень в пічному просторі практично пропорційна квадратичному інтегральному оцінюванню якості регулювання. На рис. 4 показано результати цифрового моделювання СМР переміщенням електродів зі спостерігачем, які синтезували без усунення нулів їх передавальних функцій, коли реальні значення K_c , T_c не відповідають розрахунковим. Тут прийнято такі позначення: крива 1 – довжина дуги $I_d(t)$, крива 2 – переміщення електрода $I_e(t)$, крива 3 – випадкові збурення внаслідок переміщення шихти $I_{зб}(t)$. Співвідношення між цими величинами є таким: $I_d = I_e \pm I_{зб}$. Як видно з рис. 4, ця САК переміщенням електродів не повністю відпрацьовує дію випадкових збурень. Квадратична інтегральна оцінка якості регулювання становить $I_{к.і.о} = 1,774$.

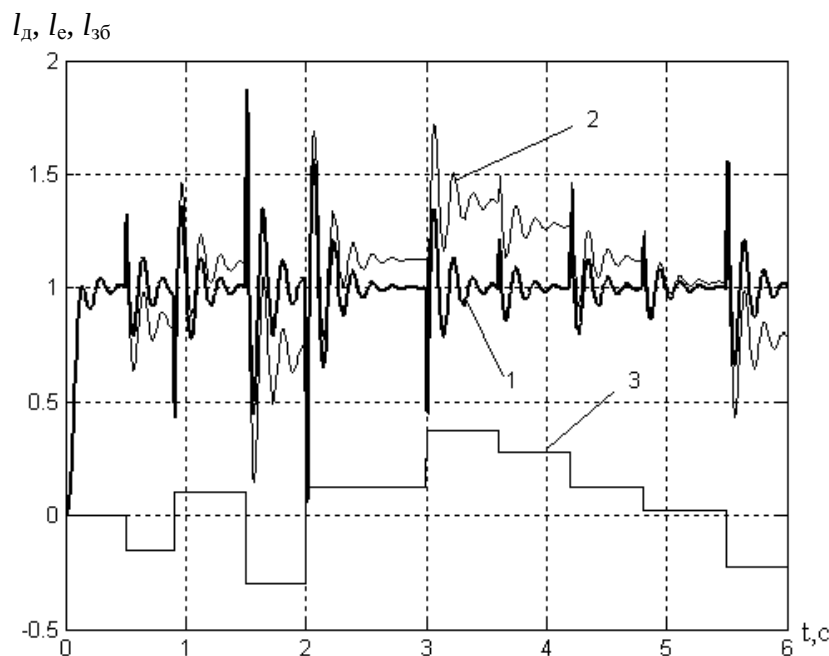


Рис. 4. Результати цифрового моделювання СМР зі спостерігачем, коли їх синтезували без усунення нулів їх передавальних функцій у разі дії параметричних та випадкових збурень

На рис. 5 зображено результати цифрового моделювання СМР переміщенням електродів зі спостерігачем, які синтезували модифікованим кореневим методом, коли реальні значення K_c , T_c не відповідають розрахунковим і в пічному просторі діяли випадкові збурення. Тут прийняті такі самі позначення, що і на рис. 4.

Аналізуючи зображені на рис. 6 криві, видно, що ця СМР переміщенням електродів, при дії випадкових збурень, відпрацьовує переміщення електродів від режиму короткого замикання до номінального без перегулювання з відповідною швидкодією. У цьому випадку, у разі дії випадкових збурень, квадратична інтегральна оцінка якості регулювання становить $I_{к.і.о} = 1,41$. Отже, ця СМР переміщенням електродів при таких параметричних збуреннях, знижує дисперсію довжини дуги, а значить і потужності дуги на 20,5 % порівняно з СМР зі спостерігачем, які синтезувалися без усунення нулів їх передавальних функцій. Вона забезпечує кращі електричні та техніко-економічні показники роботи ДСП. Коли є невідповідність реальних значень $T_{м1}$, $T_{м2}$ розрахунковим перехідні процеси $I_d(t)$ і $I_e(t)$ аналогічні тим, які показані рис. 5.

$I_d, I_e, I_{3\phi}$

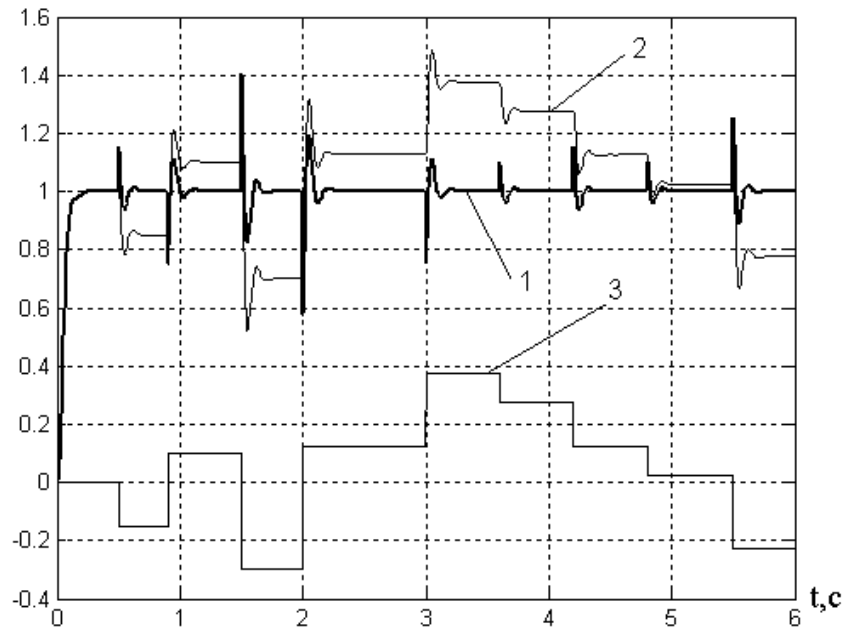


Рис. 5. Результати цифрового моделювання СМР зі спостерігачем, коли їх синтезували модифікованим кореневим методом у разі дії параметричних та випадкових збурень

Реальні збурення мають плавніший характер, але якщо СМР відпрацьовує стрибкоподібні збурення, то поява збурень іншої форми тільки полегшить завдання СМР.

Висновки. Порівнюючи графіки, зображені на рис. 3–5, можна зробити висновок, що СМР переміщення електрода зі спостерігачем, синтез яких здійснювався з усуненням нулів їх передавальних функцій модифікованим кореневим методом, забезпечує кращі показники перехідних характеристик $I_e(t)$ як з погляду величини перерегулювання, так і з погляду її швидкодії, а отже, підвищує ефективність роботи ДСП у разі дії параметричних збурень.

1. Ситуаційне керування в дугових сталеплавильних печах: Монографія / Л.Д. Костинюк, А.О. Лозинський, О.Ю. Лозинський і ін. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2004. – 382 с.
2. Лозинський О.Ю., Марущак Я.Ю., Лозинський А.О. Мазепа С.С. Моделювання САР переміщення електродів дугових сталеплавильних печей з керуванням за повним вектором стану // Вісн. Держ. ун-ту “Львівська політехніка”. – 1997. – № 340. – С. 56–62.
3. Пупков К.А. Егупов Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 1: Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2004. – 654 с.
4. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
5. Осичев А.В., Котляров В.О., Камаль Наджи. Синтез асимптотического наблюдателя с задаваемым распределением полюсов для электро-механической системы с упругой связью и нагрузкой типа вязкого трения // Тр. Междунар. конф. “Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика”. – Харьков: Основа, 1997. – С.92–96.
6. Марущак Я.Ю., Кушнір А.П. Особливості синтезу спостерігачів, передавальні функції яких мають нулі // Вісн. Харк. держ. техн. ун-ту. – Харків: ХДПУ, 2002. – № 12. – С. 457–459.
7. Марущак Я.Ю., Лозинський А.О., Кушнір А.П. Синтез спостерігачів ЕМС з урахуванням нулів передавальної функції // Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвідомчий наук.-техн. зб. – К.: Техніка, 2005. – № 65. – С. 5–10.
8. Лозинський А.О. Кушнір А.П. Синтез електромеханічних систем з врахуванням нулів передавальної функції // Вісн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2003. – № 485. – С. 77–82.