

КУЛАГІН Д.О., АНДРІЄНКО П.Д.
СИНТЕЗ ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧОЇ СИСТЕМИ
ДЛЯ ЗДІЙСНЕННЯ ЕНЕРГООЩАДНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
РУХОМИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

Задача синтезу інформаційно-керуючої системи для виконання термінального алгоритму керування є складовою частиною загальної задачі створення оптимальної системи для виконання керування системою енергопостачання рухомого електротехнічного комплексу із забезпеченням всіх показників та встановлених вимог, графіка руху та певного критерію оптимізації.

В межах визначеної задачі синтезу інформаційно-керуючої системи під термінальним керуванням будемо вважати переведення одиниці рухомого електротехнічного комплексу із початкового стану, що визначається вектором $X(t_1)$, в необхідний кінцевий стан, визначається вектором $X(t_2)$, по визначеній траєкторії $S(t)$ за заданий час $\Delta t = t_2 - t_1$.

Структура вказаних векторів $X(t_1)$ та $X(t_2)$ в загальному вигляді визначається виразом:

$$X(t) = \left[x(t) \quad \frac{d}{dt}x(t) \quad \frac{d^2}{dt^2}x(t) \quad \frac{d^3}{dt^3}x(t) \right], \quad (1)$$

де $x(t)$ – координата рухомого електротехнічного комплексу в певний момент часу;

$\frac{d}{dt}x(t)$ – перша похідна від функції переміщення – швидкість рухомого електротехнічного комплексу в певний момент часу;

$\frac{d^2}{dt^2}x(t)$ – друга похідна від функції переміщення – прискорення рухомого електротехнічного комплексу в певний момент часу;

$\frac{d^3}{dt^3}x(t)$ – третя похідна від функції переміщення – значення ривка (швидкості наростання прискорення) рухомого електротехнічного комплексу в певний момент часу.

На першому етапі рішення задачі розробки інформаційно-керуючої системи виконується синтез необхідної кривої руху $S(t)$. Відповідно до відомих досліджень [1-5] функцію кривої руху $S(t)$ можна представити у вигляді поліноміальної залежності наступного вигляду:

$$S(t) = \sum_{i=0}^{r+q-1} k_i t^i, \quad (2)$$

де r – кількість початкових умов;

q – кількість кінцевих умов;

k_i – коефіцієнти поліноміальної залежності.

В нашому випадку маємо, що кількість початкових умов дорівнює кількості кінцевих умов і складає 4 умови:

- значення координати;
- значення швидкості;
- значення прискорення;
- значення ривка.

Таким чином, маємо наступне розкладення функції кривої руху $S(t)$ у визначений ряд:

$$S(t) = k_0 + k_1 t + k_2 t^2 + k_3 t^3 + k_4 t^4 + k_5 t^5 + k_6 t^6 + k_7 t^7 \quad (3)$$

Тоді для відповідної функції швидкості має місце наступна функція:

$$v(t) = \frac{d}{dt} S(t) = k_1 + 2k_2 t + 3k_3 t^2 + 4k_4 t^3 + 5k_5 t^4 + 6k_6 t^5 + 7k_7 t^6. \quad (4)$$

Для відповідної функції прискорення має місце наступна функція:

$$a(t) = \frac{d^2}{dt^2} S(t) = 2k_2 + 6k_3t + 12k_4t^2 + 20k_5t^3 + 30k_6t^4 + 42k_7t^5. \quad (5)$$

Для відповідної функції ривка має місце наступна функція:

$$r(t) = \frac{d^3}{dt^3} S(t) = 6k_3 + 24k_4t + 60k_5t^2 + 120k_6t^3 + 210k_7t^4 \quad (6)$$

Таким чином для початкових умов задачі повинна виконуватись наступна система рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} S(t_1) = k_0 + k_1t_1 + k_2t_1^2 + k_3t_1^3 + k_4t_1^4 + k_5t_1^5 + k_6t_1^6 + k_7t_1^7; \\ v(t_1) = k_1 + 2k_2t_1 + 3k_3t_1^2 + 4k_4t_1^3 + 5k_5t_1^4 + 6k_6t_1^5 + 7k_7t_1^6; \\ a(t_1) = 2k_2 + 6k_3t_1 + 12k_4t_1^2 + 20k_5t_1^3 + 30k_6t_1^4 + 42k_7t_1^5; \\ r(t_1) = 6k_3 + 24k_4t_1 + 60k_5t_1^2 + 120k_6t_1^3 + 210k_7t_1^4. \end{array} \right. \quad (7)$$

Аналогічна система рівнянь повинна виконуватись і для кінцевих умов розглядуваної ділянки маршруту рухомого електротехнічного комплексу:

$$\left\{ \begin{array}{l} S(t_2) = k_0 + k_1 t_2 + k_2 t_2^2 + k_3 t_2^3 + k_4 t_2^4 + k_5 t_2^5 + k_6 t_2^6 + k_7 t_2^7; \\ v(t_2) = k_2 + 2k_2 t_2 + 3k_3 t_2^2 + 4k_4 t_2^3 + 5k_5 t_2^4 + 6k_6 t_2^5 + 7k_7 t_2^6; \\ a(t_2) = 2k_2 + 6k_3 t_2 + 12k_4 t_2^2 + 20k_5 t_2^3 + 30k_6 t_2^4 + 42k_7 t_2^5; \\ r(t_2) = 6k_3 + 24k_4 t_2 + 60k_5 t_2^2 + 120k_6 t_2^3 + 210k_7 t_2^4. \end{array} \right. \quad (8)$$

На наступному етапі необхідно визначити величини термінальних керувань у відповідності до методу, описаного у роботах [6-8]. Кінцевою метою синтезу керувань є забезпечення переміщення рухомого електротехнічного комплексу відповідно до визначеної форми кривої руху за умови мінімізації відхилення від даної траєкторії:

$$\Delta S(t) = S(t) - S_{\phi}(t), \quad (9)$$

де $\Delta S(t)$ – величина відхилення фактичної кривої руху від визначеної;

$S_{\phi}(t)$ – фактичне значення параметра кривої руху в певний момент часу.

Будемо вважати, що керуючий вплив $u(t)$ формується інформаційно-керуючою системою у вигляді ступінчатого сигналу відповідно до умов:

$$\left\{ \begin{array}{l} u(t) = u(nT); \\ t \in [t_1; t_2]; \\ nT \leq t \leq (n+1)T, \quad k \in \square_0, \end{array} \right. \quad (10)$$

де T – період дискретизації.

Обмеження на динаміку величини відхилення фактичної траєкторії від визначеної представимо у вигляді наступного рівняння, відповідно до розробок в роботах [1, 8-10]:

$$\frac{d^4}{dt^4} \Delta S(t) + h_3 \frac{d^3}{dt^3} \Delta S(t) + h_2 \frac{d^2}{dt^2} \Delta S(t) + h_1 \frac{d}{dt} \Delta S(t) + h_0 \Delta S(t) = 0, \quad (11)$$

де $h_i, (i = \overline{0,3})$ – коефіцієнти розкладення.

Ступінчатий керуючий сигнал визначимо шляхом мінімізації відхилення фактичної кривої руху від визначеної на основі критерію:

$$G[t, u(nT)] = \frac{\left\{ \frac{d^4}{dt^4} S_{\phi}^*(t) - \frac{d^4}{dt^4} S_{\phi}[t, u(nT)] \right\}^2}{2}, \quad (12)$$

де величина $S_{\phi}^*(t)$ відповідає значенню похідної функції $S_{\phi}(t)$ в кожний момент часу, за якої точно виконується рівність

$$\frac{d^{r+q-1}}{dt^{r+q-1}} S_{\phi}(t) = \frac{d^{r+q-1}}{dt^{r+q-1}} S(t), \quad (13)$$

тобто переміщення рухомого електротехнічного комплексу відбувається у повній відповідності до визначеної кривої руху.

Використовуючи градієнтний метод пошуку мінімуму відхилення фактичної кривої руху від визначеної запишемо кінечно-різницеve рівняння наступного виду:

$$u[(n+1)T] = u(nT) - H \frac{\partial}{\partial [u(nT)]} G[t, u(nT)], \quad (14)$$

де H – розмір кроку розрахунку, який визначається відповідно до дослідження [10].

Згідно з [10] величину H можна розглядати як коефіцієнт збіжності, який визначає стійкість та швидкість ітераційного процесу при обчисленні оптимального керування.

З виразу (10) за умови виконання співвідношення (12) маємо наступне:

$$\begin{aligned} \frac{d^4}{dt^4} S_{\phi}^*(t) = & \frac{d^4}{dt^4} \Delta S(t) + h_3 \frac{d^3}{dt^3} \Delta S(t) + h_2 \frac{d^2}{dt^2} \Delta S(t) + \\ & + h_1 \frac{d}{dt} \Delta S(t) + h_0 \Delta S(t). \end{aligned} \quad (15)$$

Тоді на основі виразів (11) та (14) матимемо значення градієнту функціоналу

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial [u(nT)]} G[t, u(nT)] = & \frac{d^4}{dt^4} [S(t) - S_{\phi}(t)] + \\ & + h_3 \frac{d^3}{dt^3} [S(t) - S_{\phi}(t)] + h_2 \frac{d^2}{dt^2} [S(t) - S_{\phi}(t)] + \\ & + h_1 \frac{d}{dt} [S(t) - S_{\phi}(t)] + h_0 [S(t) - S_{\phi}(t)], \end{aligned} \quad (16)$$

що дозволяє отримати рівняння термінального регулятора.

Для спрощення форми запису введемо наступне позначення:

$$\begin{aligned} \varphi(t) = & \frac{d^4}{dt^4} [S(t) - S_{\phi}(t)] + \\ & + h_3 \frac{d^3}{dt^3} [S(t) - S_{\phi}(t)] + h_2 \frac{d^2}{dt^2} [S(t) - S_{\phi}(t)] + \\ & + h_1 \frac{d}{dt} [S(t) - S_{\phi}(t)] + h_0 [S(t) - S_{\phi}(t)], \end{aligned} \quad (17)$$

тоді рівняння термінального регулятора матиме наступну форму:

$$u[(n+1)T] = u(nT) - H \cdot \varphi(t), \quad (18)$$

де функція $\varphi(t)$ визначається поточними значеннями наміченої траєкторії рухомого електротехнічного комплексу та фактичним станом (тобто фактичними значеннями тих же показників кривої руху).

Оскільки значення функції $\varphi(t)$ використовуються цифровим регулятором, то вважатимемо, що

$$\begin{cases} \varphi(t) = \varphi(nT); \\ t \in [t_1; t_2]; \\ nT \leq t \leq (n+1)T, \quad k \in \mathbb{Z}_0. \end{cases} \quad (19)$$

Тоді на основі співвідношень (17), (18) можна записати кінцеву форму отриманого цифрового термінального регулятора:

$$u[(n+1)T] = u(nT) - H \cdot \varphi(nT). \quad (20)$$

Для реалізації визначеного термінального керування запишемо рівняння переміщення рухомого електротехнічного комплексу в наступній формі:

$$\frac{dv}{dS} = \frac{\xi}{v} [u - w_o(v) - w_\partial(S)], \quad (21)$$

де u розглядається як параметр керування.

Значення $u > 0$ відповідає режиму тяги і повинно бути не більшим від питомого значення граничної сили тяги.

Значення $u = 0$ відповідає режиму вибігу значення $w_o(v)$ повинно бути замінено на $w_{ох}(v)$ (величину питомого основного опору руху для режиму вибігу).

Значення $u < 0$ відповідає режиму гальмування і повинно бути не більшим від питомого значення граничної гальмівної сили рухомого електротехнічного комплексу, що може бути реалізована при даній швидкості руху.

Список джерел

1. Носков В. И. Оптимизационная модель для синтеза терминальных управлений движением электропоезда / В. И. Носков, Н. И. Заполовский, Ю. Н. Колыбин, М. В. Липчанский // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2001. – № 4. – С. 198-202.
2. Липчанский М. В. Синтез терминальных управлений электроприводом электропоезда / М. В. Липчанский // Системи обробки інформації. – 2001. – Вип. 6 (16). – С. 79-83.
3. Дмитриенко В. Д. Математическое моделирование и оптимизация системы управления тяговым электроприводом / В. Д. Дмитриенко, В. И. Носков, М. В. Липчанский // Системи обробки інформації. – 2004. – Вип. 11 (39). – С. 55-62.
4. Батенко А. П. Системы терминального управления / Батенко А. П. – М. : Радио и связь, 1984. – 160 с.
5. Летов А. М. Динамика полета и управление / Летов А. М. – М. : Наука, 1969. – 359 с.
6. Красовский А. А. Аналитическое конструирование систем квазитерминального управления / Красовский А. А. // Автоматика и телемеханика. – 1972. – №4. – С. 5-14.
7. Seal C. E. On final value control / Seal C. E., Stabberud A. R. // IEEE Trans. – 1969. – V.7 – №2. – P.P. 133-143.
8. Green W. G. Logarithmic navigation for precise guidance for space vehicles / Green W. G. // IRE Trans. – 1961. – V. 8 – №2 – P.P. 59-71.
9. Батенко А. П. Управление конечным состоянием движущихся объектов / Батенко А. П. – М. : Сов. радио, 1977. – 256 с.
10. Крутько П. Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления: цикл лекций : учеб. пособие для студ. ВУЗов / П. Д. Крутько. – М. : Машиностроение, 2004. – 276 с.