

УДК 681.51.015.4

В.В. Поцепасєв (канд. техн. наук, доц.), Е.Є. Зайцева (канд. техн. наук)

Донецький національний технічний університет, м. Красноармійськ

кафедра автоматики і телекомунікацій

E-mail: potsepaev56@mail.ru, zaytseva.elina@gmail.com

ОПТИМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ В ЛІНІЙНИХ MAX-PLUS СИСТЕМАХ

Для дискретно-подійної системи, заданої у виді системи лінійних рівнянь в просторі станів в базисі Max-Plus алгебри, побудовано критерій якості, що враховує збої в системі, які виникли на деякому циклі її роботи. Показано визначення вихідної змінної через управляючі змінні, поставлено задачу безумовної оптимізації критерію. Обґрунтовано необхідність використання нелінійних методів нульового порядку для розв'язку поставленої задачі. Запропоновано модифікацію методу Хука-Джівса, що виключає з оптимізаційного алгоритму невдалі кроки пошуку за зразком та пов'язані з ними можливі невдалі кроки досліджуваного пошуку. Роботу запропонованого модифікованого методу Хука-Джівса проілюстровано на прикладі розв'язку поставленої оптимізаційної задачі.

Ключові слова: оптимальне управління, дискретно-подійне управління, Max-Plus алгебра, метод Хука-Джівса, мережі Петрі, граф синхронізації.

Вступ. Застосування математичного апарату мереж Петрі та Max-Plus алгебри не лише дозволяє отримати опис роботи дискретно-подійної системи (ДПС) у формі, подібної до рівнянь у просторі станів [3, 7], але й, з використанням зворотного зв'язку, врахувати вимоги до поведінки системи. Ці вимоги є формалізацією логічних умов, що накладаються на плин технологічного процесу, представленого ДПС, і забезпечують заданий перебіг подій у системі та виключення заборонених станів [8, 10]. При цьому, часові умови, тобто такі, що лише включають задані числові значення моментів часу настання певних подій в системі, можуть бути враховані у критерії якості роботи системи і реалізовані за допомогою оптимального управління [4]. Типовим критерієм якості роботи системи є половина суми квадратів відхилень між фактичними та бажаними моментами часу настання вихідних подій, де фактичні значення є Max-Plus лінійними функціями від управляючих змінних. Таким чином, значення моментів часу докладання управляючих впливів на дискретно-подійну систему, що забезпечують їй задану поведінку, є розв'язком задачі мінімізації цільового критерію. Через наявність у ньому операції тах, в загальному випадку визначення похідних цільової функції по управляючих змінних є утрудненим [6, 9], а отже, природним стає використання нелінійних методів оптимізації нульового порядку, що вимагають обчислення лише значень функції.

Постановка задачі дослідження. Розглядається дискретно-подійна система, яка задана в канонічній формі наступною лінійною системою рівнянь в базисі Max-Plus алгебри $(\overline{\mathbf{R}}, \oplus, \cdot)$, $\overline{\mathbf{R}} = \mathbf{R} \cup \{\varepsilon\}$, $\varepsilon = -\infty$:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(k) \oplus \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(k+1); \\ y(k) &= \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(k), \end{aligned} \quad (1)$$

де $\mathbf{x}(k) \in \overline{\mathbf{R}}^n$, кожен елемент $x_i(k)$ – це момент часу, в який i -а подія відбудеться в k -му циклі розвитку процесу, $i = \overline{1, n}$, $\mathbf{x}(0) = -\varepsilon$, щоб гарантувати залежність першого виходу від застосованого управління; $\mathbf{u}(k) \in \overline{\mathbf{R}}^m$ – моменти часу, коли k -й вектор управління безпосе-

редньо діє на систему; $y(k) \in \overline{\mathbf{R}}$ – момент часу настання вихідної події на k -му циклі, тобто маємо систему з одним виходом та m входами; $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ – матриці відповідних розмірностей, елементи яких належать до $\overline{\mathbf{R}}$.

Нехай задана послідовність $\{d(k)\}_{k=l}^N$ бажаних моментів часу настання вихідної події на $(N-l)$ кроках управління, починаючи з l -го циклу розвитку процесу. Задамо цільовий критерій [9]:

$$J(\mathbf{U}_{N-l}) = \frac{1}{2} \sum_{k=l}^N (y(k) - d(k))^2 \quad (2)$$

як невід'ємну скалярну функцію багатьох змінних $J(\mathbf{U}_{N-l}) : \mathbf{R}^{(N-l)} \rightarrow \mathbf{R}$, що враховує відхилення фактичного $y(k)$ та бажаного $d(k)$ моментів часу настання вихідних подій через моменти часу докладання управляючих впливів $\mathbf{U}_{N-l} = (\mathbf{u}(N)^T \mathbf{u}(N-1)^T \dots \mathbf{u}(l)^T)^T$ на поточному та наступних циклах роботи системи. Як бажані моменти часу виходу можна розглядати дані виробничого розкладу (видача станком деталі, прибуття транспортного засобу на станцію маршруту, реєстрація нового абонента на базовій станції тощо), в той час як фактичний момент настання вихідної події $y(k)$, $k = \overline{l, N}$ – це викликаний деяким збуренням збій графіку роботи системи. При цьому значення вихідної змінної визначається через управляючі змінні на наступних $(N-l)$ кроках в такий спосіб:

$$\begin{cases} y(l) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(l) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(l) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^{l-1} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(1) \oplus \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^{l-2} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(2) \oplus \dots \oplus \mathbf{C} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(l); \\ y(l+1) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(l+1) = \mathbf{C} \cdot [\mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(l) \oplus \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(l+1)] = \\ = \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^l \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(1) \oplus \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^{l-1} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(2) \oplus \dots \oplus \mathbf{C} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(l) \oplus \mathbf{C} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(l+1); \\ \dots \\ y(N) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(N) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^{N-1} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(1) \oplus \dots \oplus \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^{N-l} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(l) \oplus \\ \oplus \mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^{N-l-1} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(l+1) \oplus \dots \oplus \mathbf{C} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(N), \end{cases} \quad (3)$$

де $\mathbf{u}(j)$, $j = \overline{1, l-1}$ – управління, що вже було застосовано до системи на попередніх циклах її роботи.

Таким чином, задача відновлення оптимального управління, що компенсує збурення у дискретно-подійній системі, має вид:

$$\begin{aligned} \min J(\mathbf{U}_{N-l}); \\ \mathbf{U}_{N-l} \in \mathbf{R}^{(N-l)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Задача (4) є задачею безумовної оптимізації, розв'язок якої градієнтними методами утруднений через наявність у цільовій функції операції тах, тому оптимізація має проводитись з використанням методів нульового порядку.

Модифікований метод Хука-Дживса. Одним з методів розв'язку задачі оптимізації (4) є модифікований метод Хука-Дживса. Використання цього методу обумовлено простотою його алгоритму та, відповідно, простотою адаптації до особливостей математичного апарату, що використовується у різних оптимізаційних задачах, зокрема, до апарату Max-Plus алгебри.

Зміст модифікації алгоритму наступний. У класичному алгоритмі, що розглянутий у [1], після виконання кроку пошуку за зразком, виконується досліджуваний пошук навколо точки зразка, незалежно від того, зменшилося значення цільової функції або ні. Якщо досліджуваний пошук у точці траєкторії оптимізації, що отримана за зразком, виявився успішним, визначається нова базисна точка. У протилежному випадку здійснюється повернення до базисної точки, в якій було досягнуто зменшення значення цільової функції. У [1] ця процедура має назву «заміна базисної точки». Таким чином, до траєкторії оптимізації включено точку, в якій зменшення значення цільової функції не було досягнуто, і, якщо у результаті досліджуваного пошуку навколо точки невдалого зразка значення цільової функції не зменшиться, будуть виконані зайвий досліджуваний пошук та, відповідно, обчислювальні затрати, пов'язані з ним.

Модифіковану процедуру, яку реалізовано у вигляді функції на m-мові системи MATLAB, наведено нижче. Імена змінних повністю збігаються з тими, що використовуються у [1]. У запропонованій модифікації після виконання кроку пошуку за зразком, виконується перевірка зменшення значення цільової функції в точці зразка p . Якщо значення цільової функції не зменшилося, то виконується повернення до базисної точки, де значення цільової функції зменшувалось, а досліджуваний пошук не виконувався. У протилежному випадку виконується досліджуваний пошук навколо точки вдалого зразка. Таким чином, з траєкторії оптимізації виключаються точки, які отримано в результаті невдалого кроку пошуку за зразком та пов'язані з ними можливі невдалі виконання досліджуваного пошуку.

```
function [fb,x] = hjp(z,x,h)
% Модифікований метод Хука-Дживса
% Мінімізація функції f(x1,x2,...,xn) без обмежень
z = fcchk(z);
n = length(x);
y = x;
b = x;
kz = 0;
kz = kz + 1;
f = z(x);
fb = f;
kit = 0;
tic
while h >= 1e-8
    % пошук, що досліджує
    for j = 1:n
        x(j) = y(j) + h;
        fr = z(x);
        kz = kz + 1;
        if fr < f
            y(j) = x(j);
            f = fr;
        else
            x(j) = y(j) - h;
            fr = z(x);
            kz = kz + 1;
            if fr < f
                y(j) = x(j);
                f = fr;
            else
```

```

        x(j) = y(j);
    end
end
end
kit = kit+1;
if f < fb - 1e-10
    % пошук за зразком
    p = 2*y - b;
    b = y;
    x = p;
    y = x;
    fb = f;
    f = z(x);
    kz = kz + 1;
    if f > fb
        % якщо крок за зразком виявляється невдалим,
        % повернутися в базисну точку, в якій
        % зменшення цільової функції було досягнуто
        x = b;
        y = b;
        f = fb;
    end
else
    %disp(' зменшення кроку ')
    h = 0.02 * h;
end
end
toc
disp('hjp: мінімізація завершена ')
disp(['розрахунок функції ' num2str(kz) ', ітерацій ' num2str(kit)])
end

```

Розглянутий алгоритм багаторазово протестований на різних тестових функціях. Зокрема, при оптимізації функції Розенброка $f(x_1, x_2) = 100 \cdot (x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2$, що має екстремум у точці $\mathbf{x}^* = (1, 1)$ з початкової точки $\mathbf{x}^0 = (10, 7)$, кількість обчислень значень цільової функції у традиційному алгоритмі – 3129, а в модифікованому – 1884, що підтверджує ефективність запропонованої модифікації.

Результат розв'язку поставленої задачі модифікованим методом Хука-Дживса. В якості прикладу розглянемо просту виробничу систему, граф синхронізації якої наведено на рисунку 1 [6].

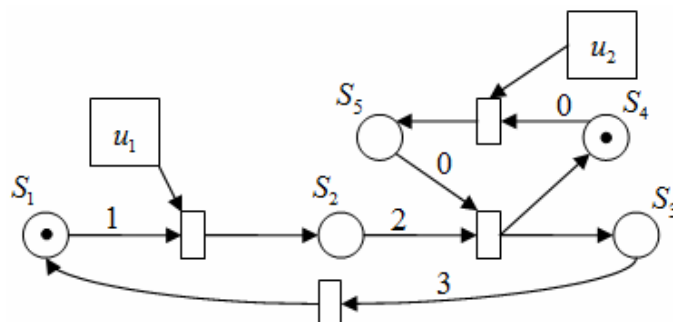


Рисунок 1 – Граф синхронізації простої виробничої системи

Граф має п'ять операційних позицій $S_1 - S_5$, з двома управляючими впливами u_1 та u_2 . Для того, щоб математично описати систему у виді (1), побудуємо матриці динаміки $\mathbf{A}$ та управління $\mathbf{B}$ [2, 5]. За структурою графу синхронізації отримаємо:

$$\mathbf{A}_s = \begin{pmatrix} \varepsilon & \varepsilon & 3 & \varepsilon & \varepsilon \\ 1 & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & 2 & \varepsilon & \varepsilon & 0 \\ \varepsilon & 2 & \varepsilon & \varepsilon & 0 \\ \varepsilon & \varepsilon & \varepsilon & 0 & \varepsilon \end{pmatrix} \text{ та } \mathbf{B}_s = \begin{pmatrix} \varepsilon & \varepsilon \\ e & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & e \end{pmatrix}.$$

На основі маркованих та немаркованих позицій графу визначаються матриці $\mathbf{A}_0$ та $\mathbf{A}_1$, $\mathbf{A}_0 \oplus \mathbf{A}_1 = \mathbf{A}_s$. Тоді $\mathbf{A} = \mathbf{A}_0^* \cdot \mathbf{A}_1$, $\mathbf{B} = \mathbf{A}_0^* \cdot \mathbf{B}_s$, де $\mathbf{A}_0^* = \mathbf{A}_0^0 \oplus \mathbf{A}_0^1 \oplus \dots \oplus \mathbf{A}_0^4$. Відповідні рівняння динаміки системи у просторі станів згідно з (1) мають вид:

$$\mathbf{x}(k+1) = \begin{pmatrix} \varepsilon & \varepsilon & 3 & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & \varepsilon & 4 & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & 2 & 6 & \varepsilon & 0 \\ \varepsilon & 2 & \varepsilon & \varepsilon & 0 \\ \varepsilon & 2 & \varepsilon & \varepsilon & 0 \end{pmatrix} \cdot \mathbf{x}(k) \oplus \begin{pmatrix} \varepsilon & \varepsilon \\ 0 & \varepsilon \\ 2 & 0 \\ \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & 0 \end{pmatrix} \cdot \mathbf{u}(k+1),$$

$$y(k) = (\varepsilon \quad \varepsilon \quad e \quad \varepsilon \quad \varepsilon) \cdot \mathbf{x}(k),$$

тобто $y(k) = x_3(k)$.

Нехай збій у роботі системи відбувся на 3-му циклі роботи та відомі бажані значення вихідної змінної на наступних п'яти циклах: $d(3) = 19$, $d(4) = 27$, $d(5) = 34$, $d(6) = 42$, $d(7) = 51$. Необхідно визначити вектори управління $\mathbf{u}(k)$, $k = \overline{3,7}$, що мінімізують цільову функцію (2), де $y(k)$ визначені за (3), та повертають систему до усталеного режиму роботи.

Розв'язок задачі модифікованим методом Хука-Дживса дає такий результат: $J^*(\mathbf{U}_4) = 0$, $\mathbf{u}(3) = (17, 19)^T$, $\mathbf{u}(4) = (25, 25)^T$, $\mathbf{u}(5) = (32, 31)^T$, $\mathbf{u}(6) = (40, 37)^T$, $\mathbf{u}(7) = (49, 43)^T$; обчислень функції проведено 1840, ітерацій 88. Моменти часу початку та тривалість операцій в системі ілюструють діаграми Ганта (див. рис. 2).

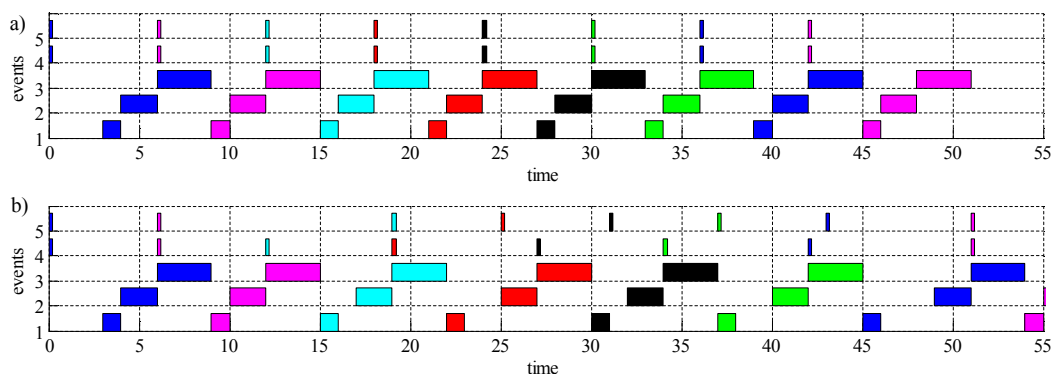


Рисунок 2 – Діаграма Ганта роботи системи: а) без управління; б) з управлінням

З діаграм роботи системи видно, що за рахунок докладання управляючих впливів, розвиток в часі дискретно-подійного процесу сповільнюється, при цьому досягається бажана поведінка системи.

Висновки

1. Показано використання оптимального управління для компенсації збоїв в роботі дискретно-подійних систем, заданих лінійними рівняннями в базисі Max-Plus алгебри. Обґрунтовано необхідність використання нелінійних методів оптимізації нульового порядку для розв'язку задачі мінімізації суми квадратів відхилень між фактичними та бажаними моментами часу настання вихідної події у збудженій ДПС.

2. Запропоновано модифікацію методу Хука-Дживса, яка полягає у виключенні з траєкторії оптимізації точок невдалого кроку пошуку за зразком та пов'язаних з ними можливих невдалих кроків досліджуваного пошуку та дозволяє зменшити кількість обчислень значень функції.

3. Для простої виробничої системи, збій в роботі якої відбувся на 3-му циклі, за допомогою запропонованої модифікації методу Хука-Дживса за відомими значеннями вихідної змінної визначені управляючі впливи для п'яти циклів роботи як розв'язок задачі нелінійної оптимізації. Докладання знайдених управляючих впливів дозволило досягти бажаної поведінки системи.

Перелік використаної літератури

1. Банди Б. Методы оптимизации: вводный курс / Б. Банди; пер. с англ. О.В. Шихеевой; под ред. В.А. Волынского. – М.: Радио и связь, 1988. – 127 с.
2. Бессараб В.І. Компенсація збурень в дискретно-безперервних системах автоматичного управління / В.І. Бессараб, В.В. Червинський, Е.Є. Зайцева // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація». – Донецьк: ДонНТУ, 2010. – Випуск 18 (169). – С. 12 – 19.
3. Бессараб В.І. Математичні основи теорії дискретно-безперервних систем: [монографія] / В.І. Бессараб – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2011. – 175 с.
4. Зайцева Е.Є. Аналіз методів управління транспортною дискретно-подійною системою / Е.Є. Зайцева // Науковий вісник Чернівецького університету Серія: «Комп'ютерні системи та компоненти», 2012 – Том 3, Вип.1 – С. 80-84.
5. Зайцева Е.Є. Оптимальне управління в дискретно-безперервній транспортній системі / Е.Є. Зайцева, В.Я. Воропаєва, В.В. Червинський // Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту. – Донецьк, ДонІЗТ, 2012. – № 30. – С. 13 – 18.
6. Зайцева Е.Є. Оптимальне управління дискретно-подійними системами з багатьма входами / Е.Є. Зайцева, В.Я. Воропаєва, І.П. Долгіх // Системний аналіз та інформаційні технології: матеріали 15-ї Міжнародної науково-технічної конференції SAIT 2013. – К.: ННК "ІПСА" НТУУ "КПІ", 2013 – С. 99 – 100.
7. Cohen G. A linear-system theoretic view of discrete-event processes and its use for performance evaluation in manufacturing / G. Cohen, D. Dubois, J.P. Quadrat, M. Viot // IEEE Transactions on Automatic Control, Mar. 1985. – Vol. AC-30, no. 3. – P. 210-220.
8. Gaubert S. Max-plus algebraic tools for discrete event systems, static analysis, and zero sum games / S. Gaubert. In J. Ouaknine and F. Vaandrager, editors // Formal Modeling and Analysis of Timed Systems: 7th International Conference, Springer, 2009. – Vol. 5813. – P. 7 – 11.
9. Gazarik M.J. Monitoring and Control of Manufacturing Systems Based on the Max-plus Formulation: PhD thesis / Michael J. Gazarik. – School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology – Atlanta, USA, Sept. 1997. – 320 p.
10. Mossig K. Control design for timed petri nets with the max-plus algebra / K. Mossig, V. Krebs // Proc. of First Asian Control Conference. – Tokyo, 1994. – Vol. 2. – P. 889-892.

References

1. Bandi, B. (1988), *Metody optimizacii: vvodnyj kurs* [Optimization Methods: An Introduction], Translated by Shiheeva, O.V., in Volynsky, V.A. (ed.), Radio i svjaz', Moscow, Russia.
2. Bessarab, V.I., Chervinsky, V.V. and Zaytseva, E.Ye. (2010), "Disturbances compensation in automatic control discrete event systems", *Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo tehnicnogo universytetu. Serija: «Obchysljuval'na tehnika ta avtomatyzacija»*, vol. 1, no. 18 (169), pp. 12-19.
3. Bessarab, V.I. (2011), *Matematychni osnovy teorii' dyskretno-bezperervnyh system: monografija* [Mathematical grounds on discrete-event systems theory: monography], DonNTU, Donetsk, Ukraine.
4. Zaytseva, E.Ye. (2012), "Transport discrete event system control methods analysis", *Naukovyy visnyk Chernivets'kogo universytetu Serija: «Komp'juterni systemy ta komponenty»*, vol. 3, no. 1, pp. 80-84.
5. Zaytseva, E.Ye., Voropaeva, V.Ya. and Chervinsky, V.V. (2012), "Optimal control in discrete-event transport system", *Zbirnyk naukovykh prac' DonIZT*, no. 30, pp. 13-18.
6. Zaytseva, E.Ye., Voropaeva, V.Ya. and Dolgikh, I.P. (2013), "Optimal control in discrete-event systems with multiple inputs", *Proc. of the 15th International conference "System analysis and information technologies SAIT 2013"*, Kyiv, Ukraine, 27-31 May 2013, pp. 99-100.
7. Cohen, G., Dubois, D., Quadrat, J.P. and Viot, M. (1985), "A linear-system theoretic view of discrete-event processes and its use for performance evaluation in manufacturing", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-30, no. 3, pp. 210-220.
8. Gaubert, S., (2009), "Max-plus algebraic tools for discrete event systems, static analysis, and zero sum games", in Ouaknine, J. and Vaandrager, F. (ed.), *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5813, pp. 7-11.
9. Gazarik, M.J. (1997), *Monitoring and Control of Manufacturing Systems Based on the Max-plus Formulation*, Ph.D. Thesis, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA.
10. Mossig, K. and Krebs, V. (1994), "Control design for timed Petri nets with the max-plus algebra", *Proceedings of First Asian Control Conference*, Tokyo, Japan, 1994, pp. 889-892.

Поступила в редакцию:
03.04.2015

Рецензент:
д-р.техн. наук, проф. С.В. Подкопаев

В.В. Поцпаев, Э.Е. Зайцева.

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

Оптимальное управление в линейных Max-Plus системах. Для дискретно-событийной системы, заданной в виде системы линейных уравнений в пространстве состояний в базисе Max-Plus алгебры, построен критерий качества, учитывающий сбои в системе, которые возникли на некотором цикле ее работы. Показано определение выходной переменной через управляющие переменные, поставлена задача безусловной оптимизации критерия. Обоснована необходимость использования нелинейных методов нулевого порядка для решения поставленной задачи. Предложена модификация метода Хука-Дживса, которая исключает из оптимизационного алгоритма неудачные шаги поиска по образцу и связанные с ними возможные неудачные шаги исследующего поиска. Работа предложенного модифицированного метода Хука-Дживса проиллюстрирована на примере решения поставленной оптимизационной задачи.

Ключевые слова: оптимальное управление, дискретно-событийное управление, Max-Plus алгебра, метод Хука-Дживса, сети Петри, граф синхронизации.

V.V. Potsepaev, E.Ye. Zaytseva

Donetsk National Technical University

Optimal control in Max-Plus linear systems. The use of Petri nets and Max-Plus algebra mathematical apparatus allows both to describe the discrete-event system (DES) in state space form equations and due to feedback to consider demands on system behavior. These demands are the formalization of technological process logical terms that provide given run of events and exclusion of forbidden states. However time conditions with defined numerical values of certain events occurring time moments could be considered in system work quality criterion and implemented by using optimal control. The typical criterion is a half-sum of squared difference between actual and desired output time, where actual values of output variable are Max-Plus linear functions of control variables. Hence, values of DES control time moments (input times), that provide system desired behavior are the solution of objective criterion minimization problem. Because of max operation in the objective criterion it is inexpedient to use gradient methods of optimization, so nonlinear programming algorithms that evaluate only objective function values are needed. That's why to solve the described problem Hooke-Jeeves method is used with modification that allows reducing number of function value calculations. In suggested modification after pattern search step there is a check of new function value in pattern point. If no function reduction has been achieved, then algorithm goes back to base point, where function value was decreased and no exploratory search was made. Otherwise exploratory search is made in the neighborhood of successful pattern point. The modification means that points from unsuccessful pattern search step and connected to them possible unsuccessful exploratory moves are excluded from optimization trajectory. The work of suggested Hooke-Jeeves algorithm modification is illustrated on simple production system with disturbance on the 3d cycle. For given output times the input time values are calculated as solution to optimization problem and desired system behavior on five cycles of its work is achieved.

Keywords: optimal control, discrete-event control, Max-Plus algebra, оптимальное управление, дискретно-событийное управление, Max-Plus алгебра, Hooke-Jeeves method, Petri nets, timed-event graph.



Поцєпаєв Валєрїй Валєрїйович, Україна, закінчив Донецький національний технічний університет, канд. техн. наук, доцент, в.о. завідувача кафедри автоматики і телекомунікацій. ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Красноармійськ, 85300, Україна). Основний напрям наукової діяльності – методи дослідження, моделювання та оптимізації динамічних систем, системи автоматичного управління.



Зайцева Єліна Євгенівна, Україна, закінчила Донецький національний університет, канд. техн. наук., ст. викладач кафедри автоматики і телекомунікацій. ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (пл. Шибанкова, 2, м. Красноармійськ, 85300, Україна). Основний напрям наукової діяльності – дослідження математичних методів аналізу та синтезу систем управління дискретно-подійними об'єктами.