

УДК 681.51.015.4

Е.Є. Зайцева, В.І. Бессараб, В.В. Червинський
Донецький національний технічний університет, м. Донецьк
кафедра автоматизації та телекомунікацій
E-mail: zaytseva.elina@gmail.com

АЛГОРИТМ УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНОЮ СИСТЕМОЮ ЯК ДИСКРЕТНО-БЕЗПЕРЕРВНИМ ОБ'ЄКТОМ

Анотація

Зайцева Е.Є., Бессараб В.І., Червинський В.В. Алгоритм управління транспортною системою як дискретно-безперервним об'єктом. Проведено розрахунок власного числа матриці динаміки некерованої системи, проаналізовано часові характеристики її поведінки. Для запобігання конфліктних ситуацій між транспортними засобами запропоновано структуру системи управління зі зворотним зв'язком, визначено точки докладання керуючих впливів на об'єкт, сформульовано критерії вибору управління. Сформовано матриці зворотного зв'язку, розроблено алгоритм управління. Проведено моделювання отриманої системи управління, проаналізовано поведінку керованої системи.

Ключові слова: алгоритм управління, дискретно-безперервний об'єкт, Max-Plus алгебра, комплекс кар'єрного транспорту, матриці динаміки, зворотний зв'язок, власний стан.

На даний час однією з актуальних проблем експлуатації кар'єрного транспорту на гірничих підприємствах відкритого способу розробки корисних копалин є управління транспортними потоками. Метою такого управління є мінімізація часу простою транспортних засобів у випадку, коли їхній рух не може здійснюватися по окремих ділянках кар'єрного комплексу одночасно. Алгоритм управління має задачу оптимізувати розклад руху кар'єрного транспорту з ціллю зменшення експлуатаційних витрат на транспортування вантажів у кар'єрах.

У роботі [2] показано, що комплекс кар'єрного транспорту можна віднести до технологічних об'єктів дискретно-безперервного класу і розглядати як сукупність елементарних процесів, що повинні координуватися (керуватися) проєктованою системою управління. Для опису динаміки таких процесів використовуються математичні апарати мереж Петрі і Max-Plus алгебри. Отримана у [2] динамічна математична модель комплексу кар'єрного транспорту у вигляді мережі Петрі та побудований на її основі граф синхронізації спрямовані на синтез системи управління шляхом використання методів Max-Plus алгебри. Також даний підхід дозволяє проаналізувати часову поведінку процесу управління шляхом імітаційного моделювання.

Таким чином, виникають наступні задачі:

1. оцінити власні числа і власні вектори матриці динаміки некерованої системи, проаналізувати часові характеристики її поведінки;
2. виявити структуру системи управління, точки докладання керуючих впливів на об'єкт, сформулювати критерії вибору управління;
3. сформувати матриці зворотного зв'язку K_0 та K_1 , розробити алгоритм управління;
4. проаналізувати поведінку отриманої системи управління комплексу кар'єрного транспорту шляхом моделювання.

Розглянемо систему кар'єрного комплексу з видобутку корисних копалин, що містить 2 вибої (здійснюється навантаження руди) і прийомний бункер навантажувальних станцій (склад), які об'єднані транспортною мережею кар'єру. Транспортна мережа в свою

чергу складається з односмугових ділянок (зон спільного використання – ЗСВ 1,2) різної довжини, по яких одночасно може рухатися один транспортний засіб (ТЗ) у будь-якому напрямку. Граф синхронізації системи склад – вибій наведено на рис.1.

Запис i/j означає, що позиція P_i маркується після позиції P_j

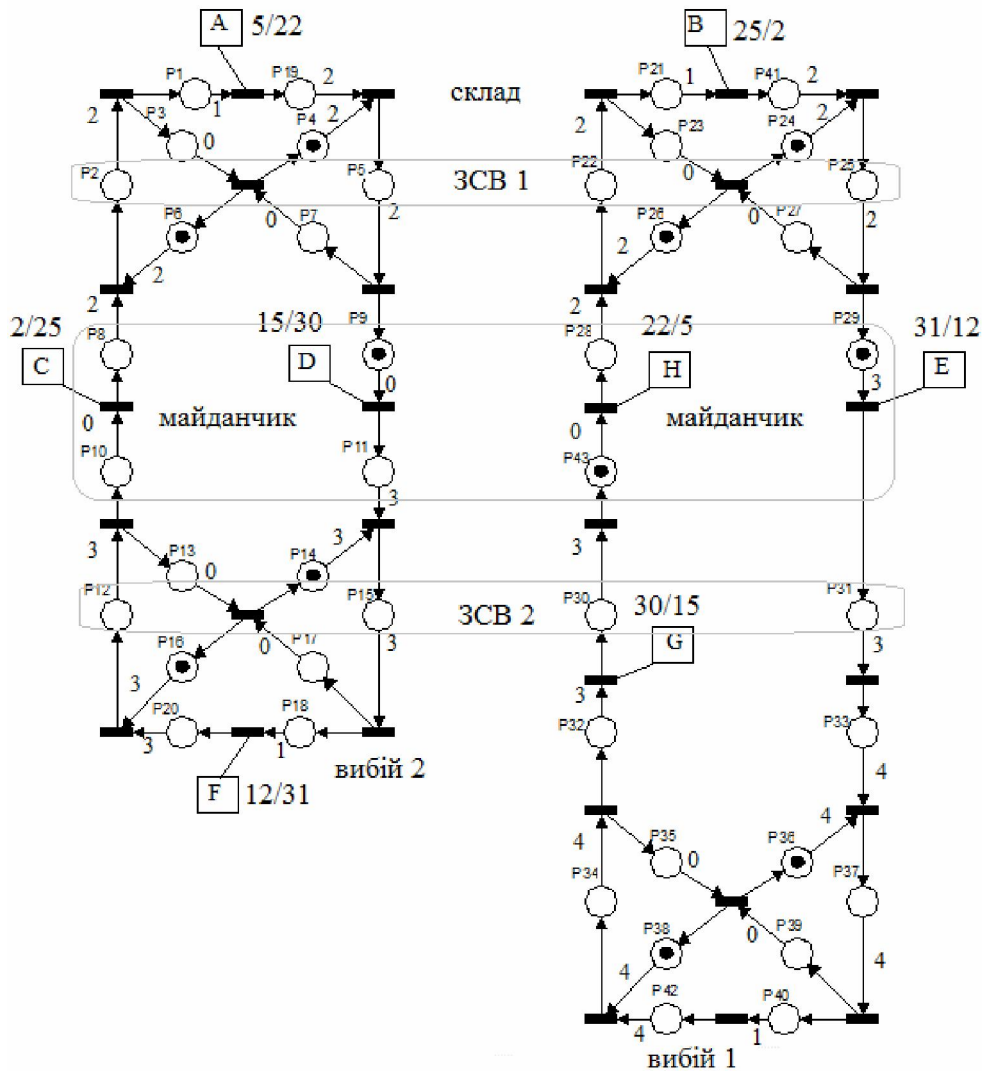


Рисунок 1 – Граф синхронізації системи склад – вибій кар’єрного комплексу

Для підсистем комплексу та некерованої системи в цілому були розраховані власні числа і значення циклічності графу матриці динаміки. Для першої підсистеми отримано власне значення $\lambda_1 = 22$, циклічність графу матриці динаміки $\rho_1 = 1$. Для другої підсистеми – $\lambda_2 = 19$, циклічність $\rho_2 = 2$ (позиції по чергово маркуються через 17 та 21 одиниць часу). Обчислені власні вектори матриць динаміки кожної з підсистем:

$$v_1 = [17 \ 15 \ 17 \ 22 \ 20 \ 22 \ 22 \ 13 \ 22 \ 13 \ 0 \ 10 \ 13 \ 13 \ 3 \ 13 \ 6 \ 6 \ 18 \ 7]^T,$$

$$v_2 = [11 \ 9 \ 11 \ 16 \ 14 \ 16 \ 16 \ 7 \ 16 \ 23 \ 0 \ 20 \ 3 \ 16 \ 20 \ 20 \ 7 \ 20 \ 11 \ 11 \ 12 \ 12 \ 26]^T.$$

Матриця динаміки M некерованої системи має власне число $\lambda = 22$, циклічність $\rho = 1$. Графік перехідного процесу в некерованій системі наведено на рис. 2.

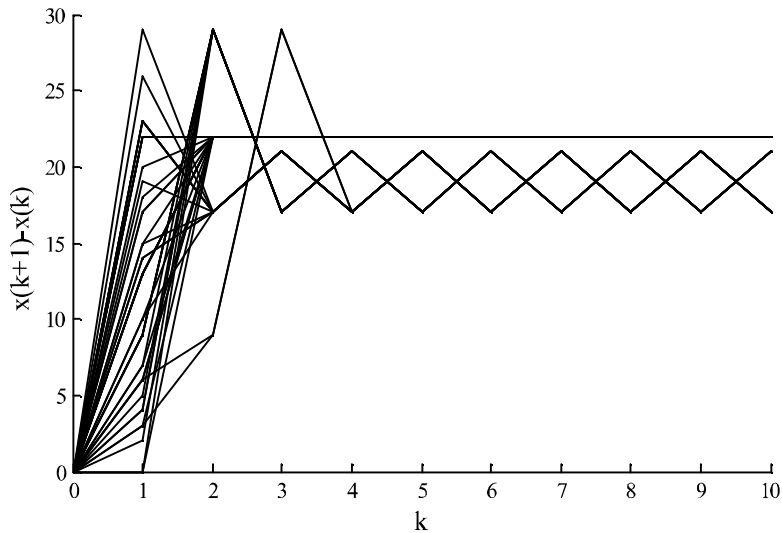


Рисунок 2 – Перехідний процес в некерованій системі

Граф $G(\mathbf{M})$ матриці динаміки некерованої системи має 114 дуг, 9 петель та дві компоненти зв'язності – для першої і другої підсистем. Петлі відповідають 9 (з 11) початково маркованим позиціям графа синхронізації, а саме $P_4, P_6, P_9, P_{14}, P_{16}, P_{24}, P_{26}, P_{36}, P_{38}$. Для ще двох початково маркованих позицій – P_{29} і P_{43} – діагональні елементи матриці \mathbf{M} дорівнюють ε , а отже ці вершини не входять до жорстко зв'язаних компонент графа $G(\mathbf{M})$. Підграф жорстко зв'язаних компонент графу $G(\mathbf{M})$ представлено на рис. 3а. Зауважимо, що всі вершини, які відповідають початково маркованим позиціям першої підсистеми зв'язані між собою, але не жорстко (рис. 3б).

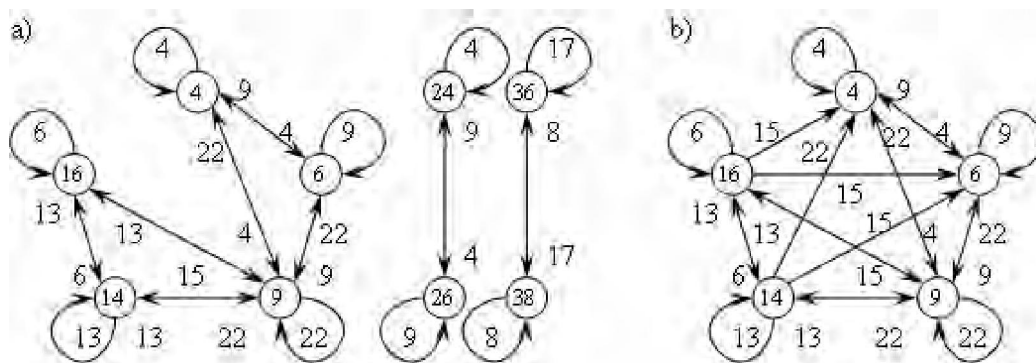


Рисунок 3 – а) Жорстко зв'язані компоненти графу $G(\mathbf{M})$; б) підграф для початково маркованих позицій 1-ї підсистеми.

Як було показано в [2] в некерованій системі виникають колізії між ТЗ на односмугових ділянках. Для запобігання цих аварійних ситуацій, в керованій системі мають виконуватись такі умови: в поточному циклі позиції

- (1) P_2 і P_{25} ; (2) P_5 і P_{22} ; (3) P_{12} і P_{31} ; (4) P_{15} і P_{30}

не повинні маркуватися одночасно.

В загальному випадку система рівнянь зі змінними стану може бути представлена наступним чином [1]:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}_0 \mathbf{x}(k+1) \oplus \mathbf{A}_1 \mathbf{x}(k) \oplus \mathbf{B} \mathbf{u}(k+1).$$

Структура системи зі зворотним зв'язком описується рівнянням:

$$\mathbf{u}(k+1) = \mathbf{K}_0 \mathbf{x}(k+1) \oplus \mathbf{K}_1 \mathbf{x}(k).$$

При цьому матриці \mathbf{K}_0 і \mathbf{K}_1 – дві додатньо визначені $(m \times |P|)$ матриці, які формують характер закону управління процесом. В цьому випадку значення m дорівнює числу логічних умов переключення керованим процесом, $|P|$ – число вершин графа синхронізації. В результаті для керованого процесу маємо наступне рівняння в просторі стану замкнутої системи:

$$\mathbf{x}(k+1) = (\mathbf{A}_0 \oplus \mathbf{BK}_0) \mathbf{x}(k+1) \oplus (\mathbf{A}_1 \oplus \mathbf{BK}_1) \mathbf{x}(k).$$

Для того, щоб отримати розв'язок рівняння, а також розрахувати власне число і власний вектор, граф матриці $\mathbf{A}_0 \oplus \mathbf{BK}_0$ має бути вільним від циклів. При таких умовах можливо визначення матриці \mathbf{M}_s керованої дискретно безперервної системи:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= (\mathbf{A}_0 \oplus \mathbf{BK}_0) \mathbf{x}(k+1) \oplus (\mathbf{A}_1 \oplus \mathbf{BK}_1) \mathbf{x}(k) = \\ &= (\mathbf{A}_0 \oplus \mathbf{BK}_0)^* (\mathbf{A}_1 \oplus \mathbf{BK}_1) \mathbf{x}(k) = \\ &= \mathbf{M}_s \mathbf{x}(k). \end{aligned} \tag{5}$$

Простими вимогами до поведінки керованого графа синхронізації є наступні логічні умови:

1. Часова точка $x_i(k)$ k -го маркування позиції P_i має відбутися не раніше ніж через τ одиниць часу після k -го маркування позиції P_j , що відповідає змінній стану $x_j(k)$.

2. Часова точка $x_i(k+1)$ $(k+1)$ -го маркування позиції P_i має відбутися не раніше ніж через τ одиниць часу після k -го маркування позиції P_j (стану $x_j(k)$ попереднього k -го циклу маркування).

Умови, що відповідають поточному циклу вносяться в матрицю \mathbf{K}_0 , а наступному циклу – в \mathbf{K}_1 .

Логічні умови (1) – (4) можуть бути реалізовані шляхом внесення їх в матрицю \mathbf{K}_0 .

Для системи, зображеної на рис.1, виділено вісім переходів, керування якими відповідає затримці ТЗ на одній зі станцій, а саме: на станції *склад* – переходи $P_1 \rightarrow P_{19}$ (А) та $P_{21} \rightarrow P_{41}$ (В); на станції *майданчик* – переходи $P_{10} \rightarrow P_8$ (С), $P_9 \rightarrow P_{11}$ (D), $P_{43} \rightarrow P_{28}$ (Н) та $P_{29} \rightarrow P_{31}$ (Е); на станції *вибій 2* – переходи $P_{18} \rightarrow P_{20}$ (F) та $P_{32} \rightarrow P_{30}$ (G). Оскільки для підсистеми *склад* – *вибій* на ділянці *вибій 2* – *вибій 1* немає ЗСВ, розглядати перехід $P_{40} \rightarrow P_{42}$ як керований не будемо.

Затримка кожного з перерахованих переходів реалізує одну з логічних умов, а саме:

- переходу $P_1 \rightarrow P_{19}$ – умову (2), причому позиція P_5 маркується після P_{22} ;
- переходу $P_{21} \rightarrow P_{41}$ – умову (1), причому позиція P_{25} маркується після P_2 ;
- переходу $P_{10} \rightarrow P_8$ – умову (1), причому позиція P_2 маркується після P_{25} ;
- переходу $P_9 \rightarrow P_{11}$ – умову (4), причому позиція P_{15} маркується після P_{30} ;
- переходу $P_{29} \rightarrow P_{31}$ – умову (3), причому позиція P_{31} маркується після P_{12} ;
- переходу $P_{18} \rightarrow P_{20}$ – умову (3), причому позиція P_{12} маркується після P_{31} ;
- переходу $P_{32} \rightarrow P_{30}$ – умову (4), причому позиція P_{30} маркується після P_{15} ;
- переходу $P_{43} \rightarrow P_{28}$ – умову (2), причому позиція P_{22} маркується після P_5 .

Скінчені елементи матриць \mathbf{B} і \mathbf{K}_0 , які відповідають перерахованим переходам зведемо у таблицю 1.

Таблиця 1 – Відповідність переходів і коефіцієнтів матриць \mathbf{B} і \mathbf{K}_0

Перехід	$\mathbf{B}_{i,m} = e$	$(\mathbf{K}_0)_{m,j} \neq \varepsilon$	Перехід	$\mathbf{B}_{i,m} = e$	$(\mathbf{K}_0)_{m,j} \neq \varepsilon$
A	$\mathbf{B}_{19,1} = e$	$(\mathbf{K}_0)_{1,21} \neq \varepsilon$	E	$\mathbf{B}_{31,5} = e$	$(\mathbf{K}_0)_{5,10} \neq \varepsilon$
B	$\mathbf{B}_{41,2} = e$	$(\mathbf{K}_0)_{2,1} \neq \varepsilon$	F	$\mathbf{B}_{20,6} = e$	$(\mathbf{K}_0)_{6,33} \neq \varepsilon$
C	$\mathbf{B}_{8,3} = e$	$(\mathbf{K}_0)_{3,29} \neq \varepsilon$	G	$\mathbf{B}_{30,7} = e$	$(\mathbf{K}_0)_{7,18} \neq \varepsilon$
D	$\mathbf{B}_{11,4} = e$	$(\mathbf{K}_0)_{4,43} \neq \varepsilon$	H	$\mathbf{B}_{28,8} = e$	$(\mathbf{K}_0)_{8,9} \neq \varepsilon$

В системі можуть бути одночасно ввімкнуті $q \leq 4$ переходів, оскільки пари переходів A/H, B/C, D/G, F/E є взаємовиключними. Так, наприклад, якщо затримувати пару переходів A/H, в графі матриці $\mathbf{A}_0 \oplus \mathbf{BK}_0$ виникає цикл $k_{19} \rightarrow k_5 \rightarrow k_9 \rightarrow k_{28} \rightarrow k_{22} \rightarrow k_{21} \rightarrow k_{19}$ (тут $k_i, i = \overline{1,43}$ – вершини графа $G(\mathbf{A}_0 \oplus \mathbf{BK}_0)$).

Задачу вибору керування можна сформулювати таким чином: серед всіх комбінацій керованих переходів в системі *склад – вибій* знайти такі, що

1. Матриця $\mathbf{A}_0 \oplus \mathbf{BK}_0$ вільна від циклів;

2. Циклічність графа $G^C(\mathbf{M}_s)$ матриці динаміки керованої системи має бути не більшою за максимальну по підсистемах циклічність в некерованій системі, тобто $\rho_s \leq 2$;

3. Різниця між власними числами матриць керованої і некерованої систем мінімальна.

Пояснимо обрані критерії.

1. Вимога, що $\mathbf{A}_0 \oplus \mathbf{BK}_0$ була вільною від циклів, необхідна для того, щоби була визначена матриця $(\mathbf{A}_0 \oplus \mathbf{BK}_0)^*$, а отже, існував розв’язок рівняння (5).

2. Внаслідок того, що підмережі системи *склад – вибій* є незалежними, кількість жорстко зв’язаних компонент в некерованій системі є сумою кількостей жорстко зв’язаних компонент графів підсистем. Згідно з другою вимогою, введене керування має об’єднати жорстко зв’язані компоненти таким чином, щоби їх кількість в керованій системі не перевищувала значення максимального доданка.

3. Оскільки введення керування може лише сповільнювати час перевезення, третій критерій дозволяє обрати оптимальне керування серед всіх можливих.

Оскільки власне число першої підсистеми $\lambda_1 = 22$ більше за власне число другої підсистеми $\lambda_2 = 19$, раціонально затримувати ТЗ в другій підмережі, щоби не сповільнювати загальний час перевезення. Послідовний аналіз діаграм Ганта показує, що конфлікти виникають в другому циклі при одночасному маркуванні позицій P_{12} та P_{31} , отже потрібно затримувати перехід E. В третьому та четвертому циклах конфлікти виникають при маркуванні позицій P_{15} , P_{30} та P_2 , P_{25} відповідно, що приводить до затримки переходів G та B. Останню логічну умову реалізує затримка переходу A, причому відповідний елемент матриці \mathbf{K}_0 об’єднує жорстко зв’язаний підграф першої підсистеми з одним жорстко зв’язаним підграфом другої підсистеми.

Таким чином, для реалізації логічних умов (1) – (4) обрано переходи A, B, E, G. Значення елементів матриці \mathbf{K}_0 , тобто бажана часова дистанція між зайняттям позицій $P_i, i = 19, 41, 31, 30$ та $P_j, j = 21, 1, 10, 18$ відповідно, дорівнює 0. За рахунок цих внесень в матрицю зворотного зв’язку досягається бажана поведінка керованого об’єкта. Поведінка системи описується власним вектором \mathbf{n}_s матриці динаміки $\mathbf{M}_s = (\mathbf{A}_0 \oplus \mathbf{BK}_0)^* \mathbf{A}_1$. Для цієї

матриці обчислено власне число $\lambda_s = 23,5$. Перехідний процес в керованій системі для нульових початкових умов наведено на рис. 4 а), щоб уникнути перехідного режиму в системі необхідно в якості початкового вектора взяти власний вектор матриці \mathbf{M}_s (рис. 4 б)).

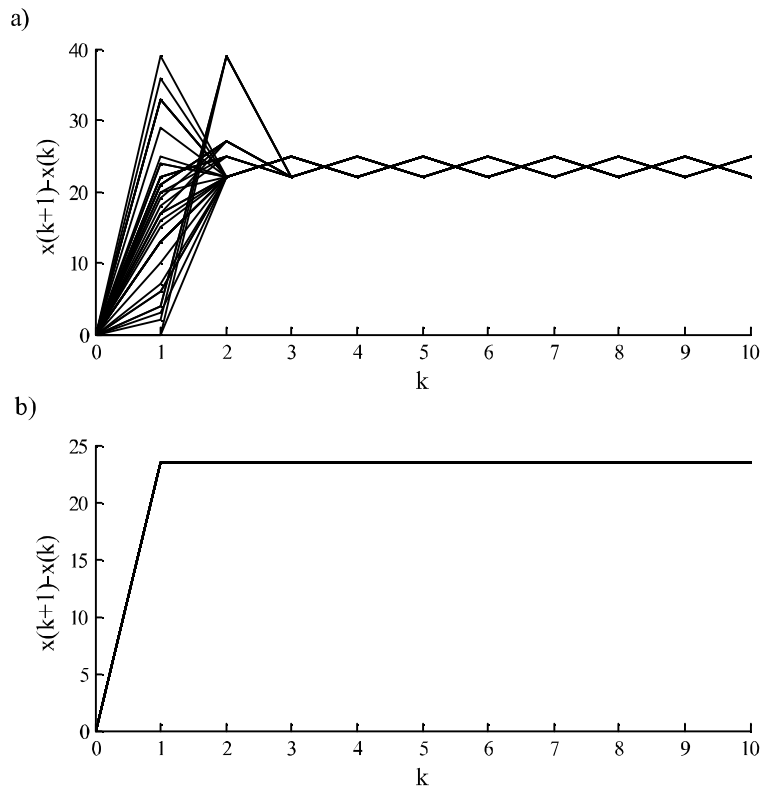


Рисунок 4 – Перехідний процес в системі з затримкою переходів АВБГ а) нульові початкові умови; б) власний вектор у якості початкових умов

Підграф графу $G(\mathbf{M}_s)$, складений з вершин, які є початково маркованими позиціями графу синхронізації, та інцидентних ним ребер, наведено на рис. 5.

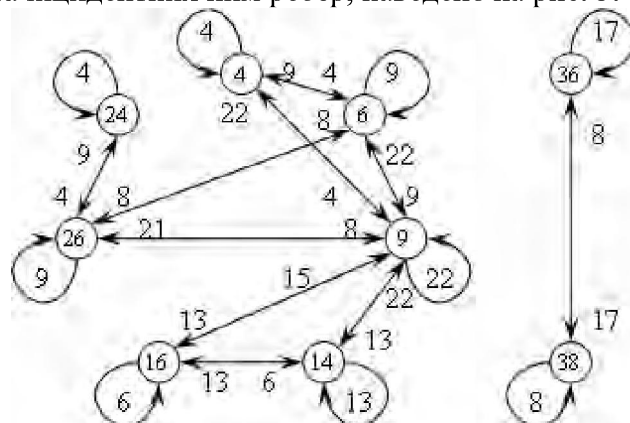


Рисунок 5 – Підграф для початково маркованих позицій системи

Висновки.

1. Для матриці динаміки \mathbf{M} некерованої системи проведено розрахунок власного числа та циклічності, аналіз часових характеристик її поведінки показав, що в некерованій системі виникають конфліктні ситуації між транспортними засобами;

2. Отримано структуру системи управління зі зворотним зв'язком, визначено точки докладання керуючих впливів на об'єкт, сформовані критерії вибору управління;
3. Сформовано матрицю зворотного зв'язку K_0 , розроблено алгоритм управління;
4. Проведено моделювання отриманої системи управління, аналіз поведінки об'єкту показав, що з власним вектором матриці динаміки керованої системи в якості початкової умови система переходить у власний стан.

Література

1. Бессараб В.И. Методика синтеза алгоритма управления для дискретно-непрерывных объектов [Текст] / В.И. Бессараб, Е.Г. Коваленко, В.М. Лозинская // Автоматика 2008: збірник наукових статей XV міжнародної конференції з автоматичного управління, 23-26 вересня 2008 р. – Одеса: ОНМА, 2008. – С. 50 – 53.
2. Зайцева Е.Є. Моделювання транспортних потоків як дискретно-безперервного об'єкта [Текст] / Е.Є. Зайцева, В.В. Червинський, В.В. Турупалов // XVII міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика - 2010», 27-29 вересня 2010 р.: тези доповідей. – Х.: ХНУРЕ, 2010. - Т. 1. – С. 221 – 223.
3. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Дж. Питерсон; пер. с. англ. [Текст]. – М.: Мир, 1984. – 264 с., ил.
4. Mossig, K. Einfuehrung in die “Max-Plus”-algebra zur Beschreibung ereignisdiskreter dynamischer Prozesse [Text] / K. Mossig, A. Rehkopf // Automatisierungstechnik. vol. 44.- Karlsruhe, 1996.- P. 3-9.

Надійшла до редакції:
31.01.2011

Рекомендовано до друку:
д-р техн. наук, проф. Скобцов Ю.О.

Abstract

Zaytseva E.Ye., Bessarab V.I., Chervinsky V.V. Transport system as a discrete-event object control algorithm. Non-controlled system dynamics matrix eigenvalue is calculated, system behavior time characteristics are analyzed. Feedback control system structure is proposed for avoiding vehicle conflicts, control influence supplement points are defined, control selection criteria are stated. Feedback matrices are designed, control algorithm is built. The modeling of obtained control system is conducted, the controlled system behavior is analyzed. Keywords: control algorithm, discrete-event object, Max-Plus algebra, quarry transport complex, dynamics matrices, feedback, eigen state.

Аннотация

Зайцева Э.Е., Бессараб В.И., Червинский В.В. Алгоритм управления транспортной системой как дискретно-непрерывным объектом. Проведен расчет собственного числа матрицы динамики системы без управления, проанализированы временные характеристики ее поведения. Для предотвращения конфликтных ситуаций между транспортными средствами предложена структура системы управления с обратной связью, определены точки приложения управляющих воздействий на объект, сформулированы критерии выбора управления. Сформированы матрицы обратной связи, разработан алгоритм управления. Проведено моделирование полученной системы управления, проанализировано поведение управляемой системы. Ключевые слова: алгоритм управления, дискретно-непрерывный объект, Max-Plus алгебра, комплекс карьерного транспорта, матрицы динамики, обратная связь, собственное состояние.

© Зайцева Е.Є., Бессараб В.І., Червинський В.В., 2011