
УДК 681.51.015.4

Е.С. ЗАЙЦЕВА, В.В. ЧЕРВИНСЬКИЙ, В.В. ТУРУПАЛОВ

МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ ЯК ДИСКРЕТНО-БЕЗПЕРЕРВНОГО ОБ'ЄКТА

Для транспортної системи кар'єрного комплексу з односмуговими дорогами запропоновано модель у вигляді мережі Петрі. Побудовано граф синхронізації розробленої мережі Петрі і його Max-Plus-алгебраїчне представлення, та промодельовано поведінку вихідної транспортної системи. Наведено діаграми Ганта і графіки перехідних процесів у некерованій системі, отримані на основі результатів моделювання.

Вступ

Одним із сучасних напрямків розвитку гірничої промисловості України є відкритий спосіб розробки корисних копалин. При цьому переміщення кар'єрних вантажів є одним з головних виробничих процесів у технології відкритого видобутку. Основний кар'єрний вантаж – гірнична маса (корисна копалина чи порожні породи), початковий пункт – вибій, кінцевий – місце розвантаження (відвали для порід, збагачувальні фабрики, склади для корисної копалини).

Кар'єрний транспорт є сполучною ланкою всіх технологічних процесів розробки гірничих порід у кар'єрі; на нього приходиться біля половини усіх вартісних витрат на видобуток корисної копалини.

В міру збільшення глибини (оцінки досягають значень у кілька сотень метрів) і просторових розмірів кар'єрів збільшуються відстані транспортування вантажів. У більшості випадків для доставки гірничої маси з нижніх горизонтів на поверхню кар'єру і руху кар'єрного транспорту в зворотному напрямку будуються двосмугові технологічні дороги, що пропус-

кають транспорт одночасно в обох напрямках. Такий підхід є більш капітально-витратним, ніж використання односмугових доріг, однак для умов транспортування, з метою зменшення часових витрат (часу очікування при реверсивному русі), він є більш прийнятним.

Однак, використання алгоритму управління транспортним потоком, що дозволяє розробити розклад руху кар'єрного транспорту і має метою мінімізацію часу простою кар'єрного транспорту при очікуванні на односмугових ділянках реверсивного руху, дозволить істотно знизити капітальні й експлуатаційні витрати при будівництві зон транспортування вантажів у кар'єрах.

Постановка задачі досліджень

Даний технологічний об'єкт можна віднести до дискретно-безпервного класу і розглядати як сукупність елементарних процесів, що мають координуватися (керуватися) проектованою системою управління. Для опису динаміки таких процесів і одержання моделі об'єкта у формі, прийнятної до техніки управління, зручно використовувати математичні апарати мереж Петрі і Max-Plus алгебри [2]. Таким чином, виникає задача одержання моделі даного об'єкта в термінах мереж Петрі і Max-Plus алгебри.

Як приклад розглянемо кар'єрний комплекс з видобутку корисних копалин (рис.1), що містить 2 вибої (здійснюється навантаження руди) і 1 вибій з розкривними роботами (здійснюється навантаження порожньої породи). Є прийомний бункер навантажувальних станцій і відвал для порожньої породи. Ці виробничі ділянки об'єднані транспортною мережею кар'єру. Транспортна мережа включає, в свою чергу, односмугові ділянки (зони) різної довжини, по яких одночасно може рухатися один транспортний засіб у будь-якому напрямку.

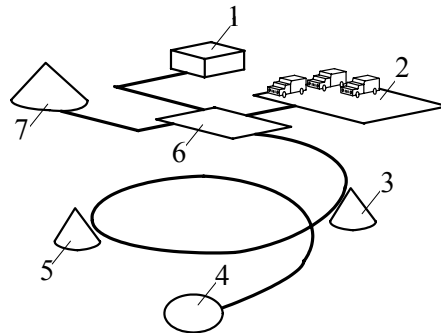


Рис. 1. Приклад кар'єрного комплексу з видобутку корисних копалин: 1 – склад; 2 – парк; 3 – вибій 2; 4 – вибій з розкривними роботами; 5 – вибій 1; 6 – майданчик; 7 – відвал

Отже, транспортні засоби перетинають ділянки шляху (зони), що спільно використовуються іншими транспортними засобами. Алгоритм управління, що розробляється, має координувати відправлення транспортних засобів, так щоб у кожній зоні постійно знаходилося не більш одного транспортного засобу (ТЗ) і усувалися колізії між ними.

Отже, для розглянутого об'єкта необхідно розробити модель з використанням математичного апарату мереж Петрі і провести її дослідження шляхом моделювання. Для часової оцінки поведінки об'єкта необхідно розробити граф синхронізації у вигляді, прийнятному для подальшої розробки алгоритму управління.

Побудова моделі транспортної системи

На рис. 2 наведено модель транспортної системи кар'єрного комплексу у вигляді мережі Петрі.

Початкове маркування позицій S_i ($i = \overline{8,13}$) означає, що ділянки спільного використання (зони) є вільними.

Початкове маркування і кількість фішок у позиції S_1 відповідає кількості транспортних засобів (ТЗ) у парку на початку роботи комплексу. Зайняття позицій S_i ($i = \overline{2,6}$) свідчить про те, що ТЗ прибув на станцію майданчик, зону розкривних робіт, забої, склад або відвал відповідно. Наявність фішки в позиціях S_i ($i = \overline{14,25}$) означає, що ТЗ перетинає зону спільного використання.

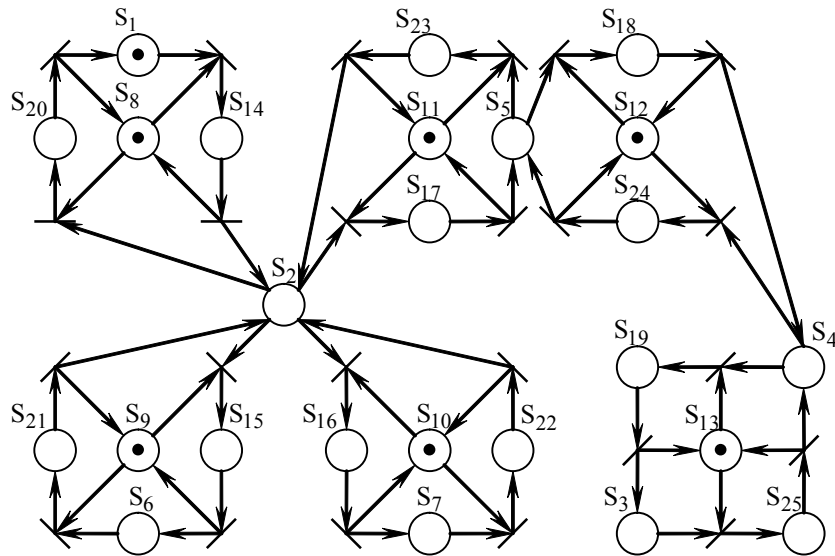


Рис. 2. Модель транспортної системи кар'єрного комплексу

Для того щоб задачу синтезу системи управління можна було розв'язати за допомогою Max-Plus алгебри, насамперед модель має бути доповнена часовими оцінками [3]. З цією метою для розробленої мережі Петрі побудований граф синхронізації (рис. 3), що дозволяє проаналізувати часову поведінку процесу шляхом моделювання.

Граф синхронізації системи задається $|P| = n$ положеннями і $|K| = m$ логічними зовнішніми умовами переключення переходів. Для графа синхронізації можна отримати систему з n рівнянь у векторно-матричній формі запису:

$$x = Ax \oplus Bu.$$

При цьому $x = [x_1 \dots x_n]^T$ – вектор стану, кожний елемент x_i ($i = \overline{1, n}$) якого фіксує момент часу маркування (включення) переходу S_i .

Вплив зовнішніх логічних умов маркування (переключення) задається за допомогою вектора керування $u = [u_1 \dots u_m]^T$.

У графах синхронізації переходи з одного положення в інше створюють замкнені цикли. Тобто через певне число переходів умовний маркер проходить всі позиції графа і виходить на повторне маркування тих самих позицій. Для того, щоб відрізнити окремі цикли поведінки ДБС, всі змінні вектора стану x і вектора управління u мають індекс k , який показує з якою частотою маркуватиметься відповідне положення в графі синхронізації. Тобто $x_i(k)$ – це часова точка, в якій положення S_i займається (маркується) k -й раз. З урахуванням цього отримаємо:

$$x(k+1) = A_0 x(k+1) \oplus A_1 x(k) \oplus Bu(k+1). \quad (1)$$

У залежності від початкового маркування позиції S_i з матриці A формуються дві матриці A_0 і A_1 , причому

$$A = A_0 \oplus A_1.$$

Матриці A_0 і A_1 визначаються із матриці A на основі маркованих і немаркованих позицій відповідно.

За допомогою матриці $A_0^* = I \oplus A_0 \oplus A_0^2 \oplus \dots \oplus A_0^{n-1}$ і позначення $M = A_0^* A_1$ рівняння (1) спрощується:

$$x(k+1) = Mx(k) \oplus A_0^* Bu(k+1). \quad (2)$$

Матриця M може розглядатися як матриця динаміки системи без зовнішнього керування – динамічна характеристика вільної поведінки системи:

$$x(k+1) = Mx(k).$$

ДБС розглянутого об'єкта має 68 операційних позицій $P_1 \dots P_{68}$, 17 з яких є початково маркованими. Матриця динаміки A має розмірність 68×68 . За допомогою трансформуючих матриць розраховані матриці A_0 і A_1 . З урахуванням відсутності додаткових логічних умов переключення немає необхідності в матриці B . Знайдені A_0^* і M :

У таблиці 1 наведено опис вершин і переходів для двох підмереж розробленого графа синхронізації.

Таблиця 1. Інтерпретація елементів графа синхронізації

Позиція	Підграф	Інтерпретація позиції
P_1, P_{19}	підмережа склад – вибій 2	ТЗ знаходиться на складі
P_2, P_5		ТЗ перетинає ЗСВ на ділянці склад – майданчик
$P_3, P_4,$ P_6, P_7		ЗСВ на ділянці склад – майданчик вільна
$P_8 - P_{11}$		ТЗ знаходиться на майданчику
P_{12}, P_{15}		ТЗ перетинає ЗСВ на ділянці майданчик – вибій 2
$P_{13}, P_{14},$ P_{16}, P_{17}		ЗСВ на ділянці майданчик – вибій 2 вільна
P_{18}, P_{20}		ТЗ знаходиться на станції вибій 2
P_{21}, P_{41}	підмережа склад – вибій 1	ТЗ знаходиться на складі
P_{22}, P_{25}		ТЗ перетинає ЗСВ на ділянці склад – майданчик
$P_{23}, P_{24},$ P_{26}, P_{27}		ЗСВ на ділянці склад – майданчик вільна
P_{28}, P_{29}		ТЗ знаходиться на майданчику
P_{30}, P_{31}		ТЗ перетинає ЗСВ на ділянці майданчик – вибій 2
P_{32}, P_{33}		ТЗ знаходиться на станції вибій 2
P_{34}, P_{37}		ТЗ перетинає ЗСВ на ділянці вибій 2 – вибій 1
$P_{35}, P_{36},$ P_{38}, P_{39}		ЗСВ на ділянці вибій 2 – вибій 1 вільна
P_{40}, P_{42}		ТЗ знаходиться на станції вибій 1

Результати моделювання

Для отриманого графа синхронізації некерованої системи було проведено моделювання, у результаті якого отримано власні вектори некерованої системи і діаграми її роботи.

Аналіз кожної з підмереж дає такі результати: Для першої системи: $\lambda_1 = 22$, циклічність $\rho = 1$. Для другої системи: $\lambda_2 = 19$, циклічність $\rho = 2$. Для третьої системи $\lambda_3 = 27$, циклічність $\rho = 2$.

Графіки перехідного процесу в системах склад – вибій 2, склад – вибій 1 та відвал-розкривний вибій наведені на рис. 4а), 4б) та 4в) відповідно.

Графіки перехідного процесу в системах склад – вибій 2, склад – вибій 1 та відвал-розкривний вибій наведені на рис. 4а), 4б) та 4в) відповідно.

Для загальної некерованої системи маємо: $\lambda = 27$, циклічність $\rho = 2$.

Причому позиції першої підмережі ($P_1 - P_{20}$) після встановлення режиму маркуються через 22 одиниць часу, позиції другої підмережі ($P_{21} - P_{42}$) – через 17 та 21 одиниць часу, третьої ($P_{43} - P_{68}$) – через 17 та 37 одиниць часу.

На основі результатів моделювання побудовано діаграми Ганта, що характеризують стани системи у часовій області. Діаграми наведено на рис. 5 – 7.

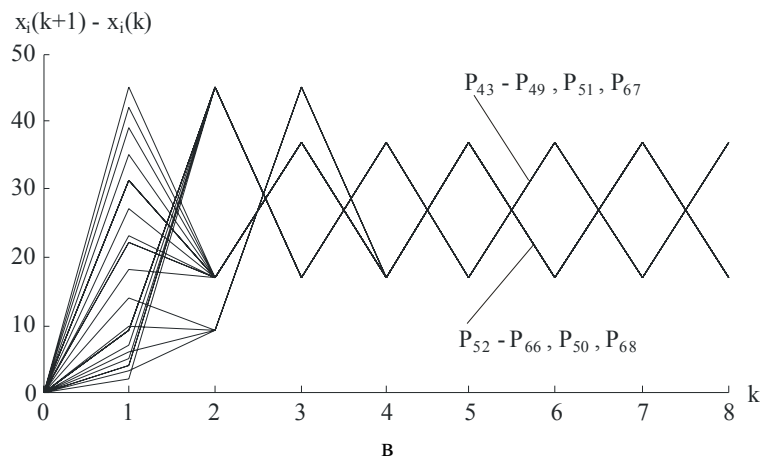
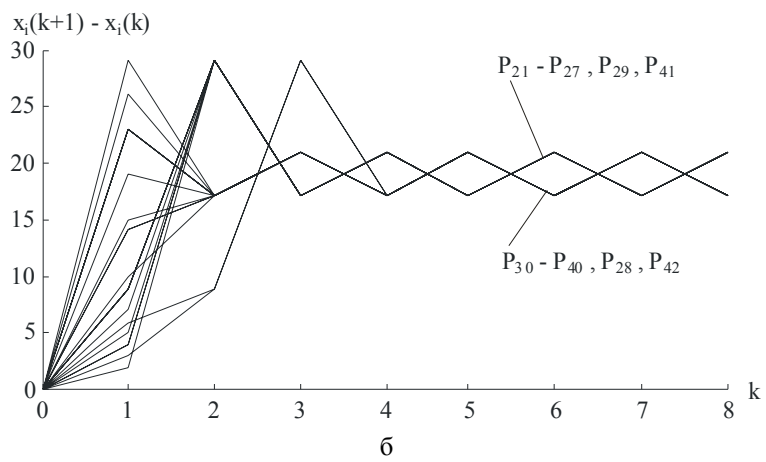
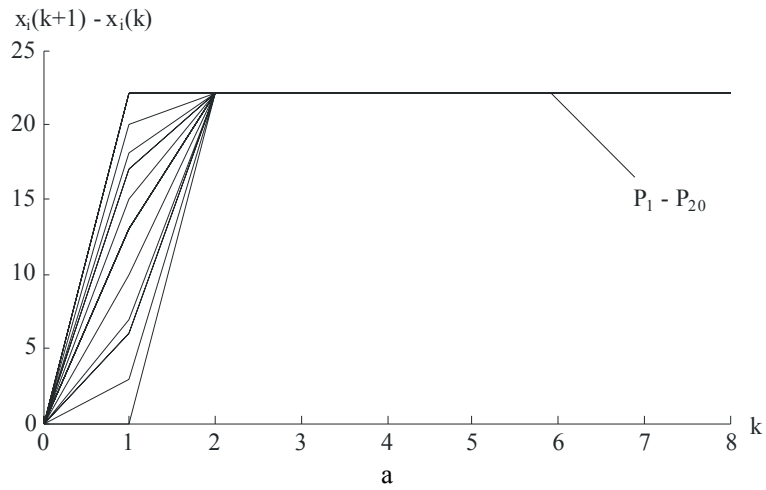


Рис. 4. Перехідні процеси у системі: а – для графа першої підмережі (склад – вибій 2); б – для графа другої підмережі (склад – вибій 1); в – для графа третьої підмережі (відвал – розкривний вибій)

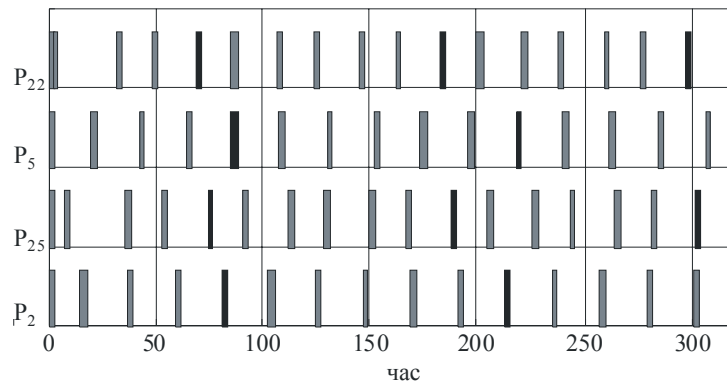


Рис. 5. Діаграма руху транспортних засобів на ділянці склад – майданчик з напрямками $P_2 \uparrow, P_{25} \downarrow, P_5 \downarrow, P_{22} \uparrow$

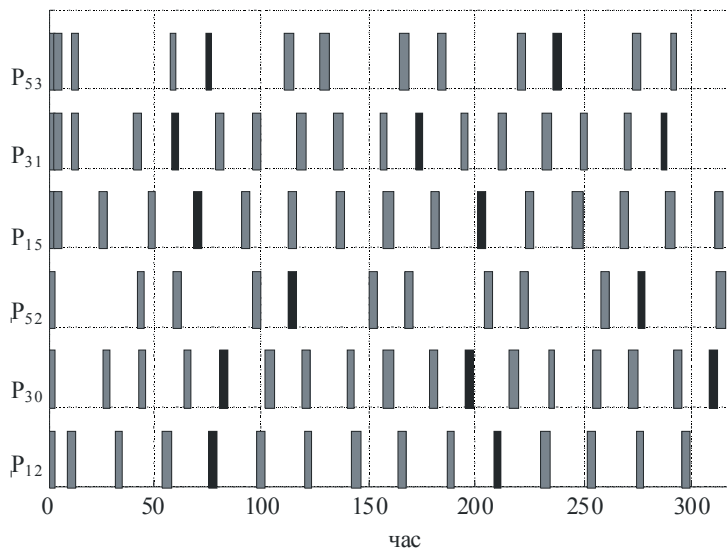


Рис. 6. Діаграма руху транспортних засобів на ділянці майданчик – вибій 2 (ближній вибій) з напрямками $P_{12} \uparrow, P_{30} \uparrow, P_{52} \uparrow, P_{15} \downarrow, P_{31} \downarrow, P_{53} \downarrow$

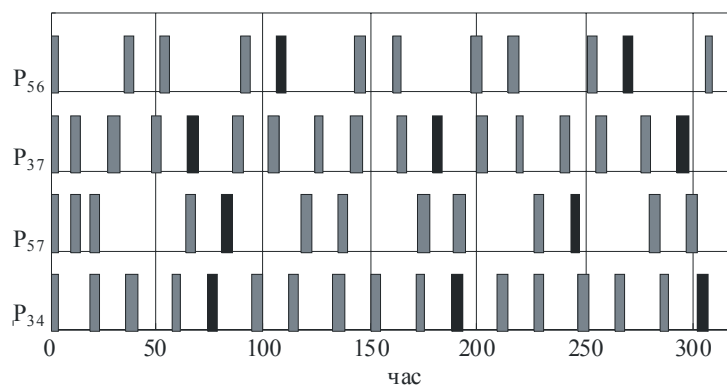


Рис. 7. Діаграма руху транспортних засобів на ділянці вибій 2 – вибій 1 з напрямками $P_{34} \uparrow, P_{57} \downarrow, P_{37} \downarrow, P_{56} \uparrow$

З діаграм роботи системи видно, що за прийнятих умов функціонування системи час перетинання різними транспортними засобами спільних ділянок накладається один на одного, тобто при використанні односмугових ділянок між транспортними засобами виникають колізії. Аналіз результатів моделювання говорить про недосяжність заданих станів через

відсутність управління і показує, що для організації процесу без колізій має проводитися координування ТЗ за допомогою твердих вимог. Тобто синтез управління передбачає формування такого вектора управління, який задає дискретно-подійному процесу бажану поведінку. Для її досягнення використовуються додаткові логічні умови переключення окремих переходів графа синхронізації.

Висновки

1. Розроблено модель транспортної системи кар'єрного комплексу як дискретно-безперервного об'єкта у вигляді мережі Петрі.

2. Для часової оцінки динаміки об'єкта розроблено граф синхронізації, за допомогою якого шляхом моделювання показано неможливість досягнення заданих станів і виникнення колізій між транспортними засобами.

3. Для синтезу алгоритму управління транспортним потоком, що має метою мінімізацію часу простою кар'єрного транспорту запропоновано координувати ТЗ за допомогою додаткових логічних умов переключення окремих переходів.

Список літератури: 1. *Питерсон Дж.* Теория сетей Петри и моделирование систем. М.: Мир, 1984. 264с. 2. *Бессараб В.И., Коваленко Е.Г., Лозинская В.М.* Методика синтеза алгоритма управления для дискретно-непрерывных объектов // Автоматика 2008: збірник наукових статей XV міжнародної конференції з автоматичного управління, 23-26 вересня 2008 р. Одеса: ОНМА. 2008. С. 50-53. 3. *Mossig K., Rehkopf A.* Einfuehrung in die "Max-Plus"-algebra zur Beschreibung ereignisdiskreter dynamischer Prozesse // Automatisierungstechnik. Karlsruhe. 1996. vol. 44. P. 3-9.

Поступила до редколегії 15.09.2010

Зайцева Еліна Євгенівна, асистент кафедри АТ ДонНТУ. Наукові інтереси: математичні методи аналізу та синтезу систем управління дискретно-безперервними об'єктами. Хобі: книги з систем захисту інформації, Він Чун Кунг Фу. Адреса: Україна, 83000, Донецьк, вул. Артема, 58, тел. 062-301-03-69.

Червинський Володимир Володимирович, канд. техн. наук, доц. кафедри АТ ДонНТУ. Наукові інтереси: системи управління складними багатовимірними технологічними процесами та дискретно-безперервними об'єктами. Хобі: книги по ТАУ. Адреса: Україна, 83000, Донецьк, вул. Артема, 58, тел. 062-305-13-95.

Турупалов Віктор Володимирович, канд. техн. наук, доц., декан ФКІТА ДонНТУ. Наукові інтереси: надійність систем. Хобі: система «Розумний дім» Адреса: Україна, 83000, Донецьк, вул. Артема, 58, тел. 062-304-90-17.