ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНОЮ СИСТЕМОЮ

УДК 004.921

ЗАЙЦЕВА Еліна Євгенівна
к.т.н., доцент кафедри математичних методів та системного аналізу,
Маріупольський державний університет.
Наукові інтереси: методи системного аналізу та їх застосування на практиці,
проектування інформаційних систем, обробка зображень.

МЕРКУЛОВА Катерина Володимирівна
к.т.н., доцент, доцент кафедри математичних методів та системного аналізу,
Маріупольський державний університет.
Наукові інтереси: методи системного аналізу та їх застосування на практиці,
проектування інформаційних систем, обробка зображень.

ВСТУП

Система кар'єрного транспорту є однією з важливих систем гірничорудного виробництва, функціонування якої впливає на ефективність роботи суміжних технологічних систем – перевантажувальних пунктів, збагачувальних фабрик, тощо. Основним видом транспорту для перевезення покривних порід та корисних копалин є автотранспорт, він є сполучною ланкою всіх технологічних процесів розробки гірничих порід у кар'єрі, проте, разом з тим, на нього приходиться біля половини усіх вартісних витрат на видобуток корисної копалини. Сьогодні існує стійка тенденція зростання потужності та глибини кар'єрів, що в свою чергу вимагає рішення низки технологічних задач, зокрема перегляду організації транспортної системи. При збільшенні глибини кар'єрів значно ускладнюються гірничотехнічні умови експлуатації автотранспорту: висота підйому гірничої маси досягає 150-170 м, відстань транспортування – 3,0-3,5 км, середньозважений кут нахилу кар'єрної дороги – 100-115‰, що призводить до істотного зниження швидкості руху автосамоскиду до 15-18 км/год і продуктивності використання рухомого складу. Все це викликає постійні зміни технології перевезення гірничої маси й планування роботи транспортних засобів та вимагає значної кількості попередніх розрахунків.

Нарощення потужності автосамоскидів приводить до необхідності збільшення ширини автомобільних доріг, товщини дорожніх конструкцій та, відповідно, їх вартості. Однак, через специфічні гірничі умови, ширина існуючих доріг може бути недостатньою для одночасного проходження самоскидів у зустрічних напрямках. Таким чином, односмугові ланки можуть виникнути у кар'єрах з двосмуговими дорогами. Гірничі підприємства з відкритим способом розробки родовищ корисних копалин, в яких з тих або інших причин існують односмугові ділянки трас, належать до кар'єрів зі специфічними умовами транспортування. Зазвичай, для роз'їздів на односмугових ділянках, водії використовують стратегію «перший приїхав – перший їде». Проте з метою організації контролю та планування руху транспорту для кар'єрів зі специфічними умовами транспортування диспетчерська служба має оперативно координувати рух задіяних у поточній зміні самоскидів. Питання підвищення ефективності експлуатації кар'єрного автотранспорту досліджуються у роботах Аністратова Ю.І., Васильєва М.В., Клебанова О.Ф., Кулєшова О.О., Монастирського Ю.А. та ін. Основні принципи їх досліджень покладені в основу реалізації автоматизованих систем диспетчерського управління. Існуючі сьогодні автоматизовані системи диспетчерського управління (ГІС K-MINE, «КАРЬЕР»; АСУ ГТК Wenco; DISPATCH тощо) не враховують наявність односмугових ланок на трасах, а отже, не зважають на важливу складову показника ефективності оперативного диспетчерського управління (ОДУ) – час простоїв транспортного обладнання, що виникає на ділянках реверсивного руху.

Таким чином, актуальною є задача оптимізації оперативно-диспетчерського управління рухом кар'єрного автомобільного транспорту, які враховували б наявність односмугових ділянок доріг та забезпечували підвищення ефективності вантажоперевезень.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Аналіз існуючих схем оперативного диспетчерського управління кар'єрним транспортом [1] дозволив визначити основну мету – підвищення ефективності вантажоперевезень на гірничих підприємствах з відкритим способом розробки родовищ корисних копалин зі специфічними умовами транспортування за рахунок застосування методів і моделей оперативного диспетчерського управління рухом кар'єрного автомобільного транспорту.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі дослідження:

– удосконалити метод управління рухом транспорту на односмугових ділянках доріг, який дозволить запобігти виникненню аварійних ситуацій та мінімізуватиме час простою автотранспорту;

– розробити алгоритм перевірки керованості стану та перевірити його на адекватність.

РІШЕННЯ ЗАДАЧІ

Дискретно-подійна динамічна модель транспортної системи, яка представлена у [2] дозволяє застосувати управління у вигляді моментів відправлення транспортних засобів зі станцій системи так, щоби загальний час простою транспорту був найменшим. Але, необхідно обрати метод управління транспортною системою як дискретно-подійним об'єктом, застосовуючи методи системного аналізу, що забезпечить ефективне транспортування вантажів по різних маршрутах руху транспорту в системі. В теорії системного аналізу можна виділити два підходи до розв'язку цієї задачі [3].

В першому ідея синтезу управління в ДПС полягає в формуванні такого вектора управління, який задає дискретно-подійному процесу бажану поведінку [4]. Задана поведінка ДПС може характеризуватись через множину недопустимих маркувань позицій, або – якщо говорити про простір станів – заборонених станів системи. Тобто, деяка позиція не може маркуватись або деякий стан системи не може досягатись в конкретний момент часу. Такий підхід дозволяє розглядати управління як результат дії зворотного зв'язку, за допомогою якого через рішення системи рівнянь Max-Plus алгебри можна формувати умови часових точок маркувань. Оскільки через управління, розвиток у часі дискретно-подійного процесу, який залежить від власного числа матриці динаміки, може тільки сповільнюватись, то очевидною є потреба зменшення різниці між власними числами матриць керованої і некерованої систем. Тому в якості критерію синтезу алгоритму управління використовується оцінка різниці власних чисел некерованого процесу і процесу з керованими переходами. Фактично за допомогою зворотного зв'язку і специфікації математичної моделі процесу можна говорити про класичну структуру системи управління в ДПС. При такій побудові управління в системі цілеспрямовано може змінюватись власне число і власний вектор в залежності від зовнішніх збурень, які безумовно діють на реальну ДПС.

Даний підхід можна умовно назвати управлінням за заданими показниками якості.

Другий підхід – це оптимальне управління дискретно-подійними системами, обумовлене впливом часових характеристик системи на економічні або виробничі показники її функціонування. Критерій якості при цьому задається деякою узагальненою функцією вартості, яка надає перевагу управлінню, що призводить до дотримання графіку виробництва та, за необхідності, зберігає рівень запасів і «штрафує» управління, яке призводить до зменшення ефективності та збільшення простоїв. Цільові функції критерію відрізняються залежно від того, чи в системі передбачені матеріально-виробничі запаси, чи є вони допустимими, які вимоги щодо випередження виробничого графіка, чи є припустимим запізнювання на початку роботи на окремих ділянках виробництва тощо [5,6,7]. Якщо цільова функція визначається як сума відхилень між фактичними та бажаними моментами настання вихідних подій, через наявність операції max вона є недиференційованою, а отже пошук оптимального управління ДПС є задачею нелінійної оптимізації.

В роботі для розробки алгоритму управління транспортною системою кар'єрного комплексу пропонується використання обох підходів до побудови системи управління дискретно-подійними системами на основі Max-Plus алгебри.

Розглядається дискретно-подійна система, яка задана в канонічній формі наступною системою рівнянь в базисі Max-plus алгебри $(\overline{R}, \oplus, \cdot)$:

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

де $\mathbf{x}(k) \in \overline{R}^m$, елемент $x_i(k)$ – це момент часу, в який i-а подія відбудеться в k-му циклі розвитку процесу, $i = \overline{1, m}$, $\mathbf{u}(k) \in \overline{R}^n$ – момент часу, в який k-й вектор управління безпосередньо діє на систему, $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ – матриці відповідних розмірностей, елементи яких належать до $\overline{R}$.

Перше рівняння системи (1) означає, що поява події i в $(k+1)$-му циклі має місце лише тоді, коли відбудуться всі події у всіх попередніх k циклах та буде завершено керуючий вплив, що діє на подію i. Тобто маємо $\bigoplus_{j=1}^{m} a_{ij} \cdot x_i(k)$, $\bigoplus_{l=1}^{n} b_{il} \cdot u_l$ (a_{ij} – тривалість j-ї події, що безпосередньо передує події i, u_l – момент часу запуску керування l та b_{il} – затримка часу до запуску події i, крім того, $b_{il} = -\varepsilon$ в випадку, якщо l безпосередньо не передує i).

У випадках представлення системи графом синхронізації, стан відповідає часу маркування позицій графа, а керування докладається до деяких переходів, затримка відповідна часу запуску переходу.

Перше рівняння в системі (1) можна записати

$$\mathbf{x}(k+1) = [\mathbf{B} \mid \mathbf{A}] \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{u}(k+1) \\ \mathbf{x}(k) \end{pmatrix} \qquad (2)$$

та в розгорнутому виді:

$$\mathbf{x}(k+1) = [\mathbf{\Gamma}_{k-i} \mid \mathbf{A}^{(k+1-i)}] \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{u}_{k-i} \\ \mathbf{x}(i) \end{pmatrix} \qquad (3)$$

де $\mathbf{\Gamma}_{k-i} = [\mathbf{B} \mid \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \mid \ldots \mid \mathbf{A}^{(k-i)} \cdot \mathbf{B}]$ та $\mathbf{u}_{k-i} = \begin{pmatrix} \mathbf{u}(k+1) & \mathbf{u}(k) & \ldots & \mathbf{u}(i+1) \end{pmatrix}^T$ – послідовність керуючих впливів, що переводить систему зі стану $\mathbf{x}(i)$ в стан $\mathbf{x}(k+1)$.

Припустимо, що для заданого $\mathbf{x} = \mathbf{x}(k+1)$, існує допустимий початковий стан $\mathbf{x}(i)$ і послідовність вхідних впливів $\mathbf{u}(i+1), \mathbf{u}(i+2), \ldots, \mathbf{u}(k+1)$, така, що рівняння (3) є тотожністю. Тоді, починаючи зі стану $\mathbf{x}(i+1) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(i) \oplus \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(i+1)$, можна досягти $\mathbf{x}(k+1)$ за $k-i$ кроків розвитку процесу (тобто $\mathbf{x}(i)$, $\mathbf{x}(i+1)$, …, $\mathbf{x}(k)$ – всі є допустимими початковими станами). Оскільки $\mathbf{x}(i) \leq \mathbf{x}(i+1)$, отримаємо, що множини допустимих початкових станів S та вхідних керуючих векторів V є частково впорядкованими.

Можна сформулювати задачу досяжності у вигляді: нехай задано $\mathbf{x} \in \overline{R}^m$. Потрібно, якщо це можливо, знайти таку множину $S(\mathbf{x}) \neq \varnothing$ допустимих початкових станів та множину $V(\mathbf{x}) \neq \varnothing$ вхідних керуючих векторів, такі, що рівняння (3) вірно для деякого $i \ (0 \leq i \leq k)$.

При $i = 0$ з рівняння (3) отримаємо початковий стан $\mathbf{x}(0)$ (момент часу, в який не було запущено жодного переходу) та послідовність вхідних векторів $\mathbf{u}_k$ з першим управлінням $\mathbf{u}(1)$. Оскільки момент $t = 0$ може бути часом першого запуску переходів, раціонально припустити, що $\mathbf{x}(0) = -\boldsymbol{\varepsilon}$. В цьому випадку, оскільки $\mathbf{A}^{(k+1)} \cdot \mathbf{x}(0) = \mathbf{A} \cdot -\boldsymbol{\varepsilon} = -\boldsymbol{\varepsilon}$, рівняння (3) прийме вид:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{\Gamma}_k \cdot \mathbf{u}_k \qquad (4)$$

Стан $\mathbf{x}$ вважається досяжним, якщо $S(\mathbf{x}) \setminus \{\mathbf{x}\} \neq \varnothing$, та керованим, якщо $-\boldsymbol{\varepsilon} \in S(\mathbf{x})$. Для неперервних та дискретних систем поняття досяжності та керованості є тотожними, однак для дискретно-подійних систем це не так. Якщо стан дискретно-подійної системи є керованим, то він також є досяжним, але зворотне невірно. Крім того, в теорії ДПС говориться лише про керованість стану, а не системи в цілому, оскільки керованість – дискретна властивість в лінійних системах Max-plus алгебри.

В [6,8,9,10] було доведено, що для того, щоб стан $\mathbf{x}$ був керованим, необхідно, щоби він був фіксованою точкою матриці

$$\Gamma_k^{\nabla}: \overline{R}^{m(k+1)} \to \overline{R}^{m(k+1)},$$
$$\mathbf{x} \mapsto \Gamma_k^{\nabla} \cdot' \mathbf{x}, \ \Gamma_k^{\nabla} = \Gamma_k \cdot \Gamma_k^{-T}. \tag{5}$$

Таким чином, перевірка необхідної умови керованості стану $\mathbf{x}(k+1)$, є перевіркою, чи є стан $\mathbf{x}(k+1)$ фіксованою точкою матриці Γ_k^{∇}.

Запишемо рівняння (3) в розгорнутому виді:

$$\mathbf{x}(k+1) = [\mathbf{B} \mid \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \mid \ldots \mid \mathbf{A}^{(k)} \cdot \mathbf{B}] \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{u}(k+1) \\ \mathbf{u}(k) \\ \ldots \\ \mathbf{u}(1) \end{pmatrix} \tag{6}$$

При розв'язанні (5) відносно вектору $\mathbf{u}_k$, отримаємо рівняння для відновлення керуючих впливів:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{u}(k+1) \\ \ldots \\ \mathbf{u}(1) \end{pmatrix} = \Gamma_k^{-T} \cdot' \mathbf{x}(k+1) \tag{7}$$

або скорочено

$$\mathbf{u}_k = \Gamma_k^{-T} \cdot' \mathbf{x} \tag{8}$$

Отже, алгоритм перевірки керованості стану $\mathbf{x}$ за необхідною умовою має вид:

Крок 1. $k := 1$, $\mathbf{x}(0) := -\boldsymbol{\varepsilon}$.

Крок 2. Якщо $k > k_{\max}$ перехід на крок 7, інакше – перехід на крок 3.

Крок 3. Перевірити необхідну умову керованості. Обчислити матриці Γ_k, Γ_k^{-T}, та матрицю $\Gamma_k^{\nabla} = \Gamma_k \cdot \Gamma_k^{-T}$. Якщо умова виконана, переходити до кроку 4, інакше – переходити до кроку 6.

Крок 4. Використовуючи матрицю Γ_k^{-T} з рівняння (6) обчислити вектор $\mathbf{u}_k$. За рівнянням (4) обчислити вектор стану $\mathbf{x}(k+1)$.

Крок 5. Якщо виконане $\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}$, то стан $\mathbf{x}$ є досяжним, починаючи зі стану $\mathbf{x}(0) = -\boldsymbol{\varepsilon}$ за k кроків, а отже, є керованим. Перехід до кінця алгоритму. Інакше – перехід до кроку 6.

Крок 6. $k := k + 1$ і переходити на крок 2.

Крок 7. Вважати стан $\mathbf{x}$ некерованим. Кінець.

Даний алгоритм дозволяє не лише перевірити стан системи на керованість, а і відновити управління, що за скінчену кількість циклів приведе систему до заданого стану.

Для перевірки керованості станів системи необхідно визначити матрицю управління $\mathbf{B}$. Матриця управління – матриця розмірності $|S| \times P$, де $|S|$ – кількість вершин графу синхронізації, P – кількість керованих переходів, з елементами $b_{im} \in \{\varepsilon, e\}$ $(i = \overline{1, |S|},\ m = \overline{1, P})$. Для графу синхронізації кар'єру можна виділити 14 керованих переходів, що відповідатимуть за затримку транспортних засобів на станціях (рис. 1). Таким чином, матриця управління $\mathbf{B}$ має розмірність 70×14, а перелік індексів керованих переходів та відповідних скінчених елементів $b_{im} = 0$ наведено у табл.1.

Таблиця 1.

Індекси скінчених елементів матриці $\mathbf{B}$

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
i	2	11	5	8	22	35	25	33	27	30	49	51	58	60

Перевіримо, чи є керованим стан системи $\mathbf{x}(2)$, отриманий раніше. Для $i = \overline{0,6}$ та $j = \overline{1,10}$, $(10 \cdot i + j)$-та координата вектора $\mathbf{x}(2)$ наведена в таблиці 2.

Таблиця 2.

Стан $\mathbf{x}(2)$ ДПС

i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	9	9	10	13	13	14	17	17	19	21
1	21	21	23	9	9	13	21	13	13	17
2	16	16	17	20	23	25	25	26	30	30
3	32	33	35	36	36	37	39	16	16	20
4	33	25	25	30	24	24	25	28	30	32
5	35	39	39	43	43	46	47	49	50	52
6	54	54	56	24	24	28	47	39	39	43

Перевірка стану системи $\mathbf{x} = \mathbf{x}(2)$ на керованість проводиться за приведеним вище алгоритмом. Для цього система рівнянь зводиться до виду

$$\mathbf{x}(k+1) = \widetilde{\mathbf{A}} \cdot \mathbf{x}(k) \oplus \widetilde{\mathbf{B}} \cdot \mathbf{u}(k+1) \qquad (9)$$

де $\widetilde{\mathbf{A}} = \mathbf{A}_0^* \cdot \mathbf{A}_1$, $\widetilde{\mathbf{B}} = \mathbf{A}_0^* \cdot \mathbf{B}$.

Матриці $\widetilde{\mathbf{A}}$ та $\widetilde{\mathbf{B}}$ використовуються для обчислення матриці $\mathbf{\Gamma}_k$ і послідовності векторів управління $\mathbf{u}(k)$.

Оскільки кількість циклів роботи транспорту в системі обумовлена виробничим процесом, будемо вважати достатнім для перевірки умови виходу з циклу значення $k_{\max} = 10$. Отримаємо, що для значення $k = 2$ виконана необхідна умова керованості стану системи, тобто

$$\overline{\mathbf{x}} = \mathbf{\Gamma}_k^{\nabla} \cdot' \overline{\mathbf{x}},$$

а отже, можливе відновлення управління, що за прийнятну кількість виробничих циклів переведе систему в заданий стан. Відповідні вектори управління, знайдені за виразом (6), дорівнюють:

$$\mathbf{u}(1) = [9\ \ 7\ \ 10\ \ 13\ \ 16\ \ 14\ \ 17\ \ 38\ \ 20\ \ 24\ \ 26\ \ 29\ \ 51\ \ 56]^T,$$
$$\mathbf{u}(2) = [3\ \ 1\ \ 0\ \ 3\ \ 10\ \ 8\ \ 0\ \ 12\ \ 3\ \ 7\ \ 0\ \ 3\ \ 17\ \ 20]^T.$$

Таким чином, FIFO-управління «перший приїхав – перший виїхав» дозволяє досягти бажаної поведінки системи.

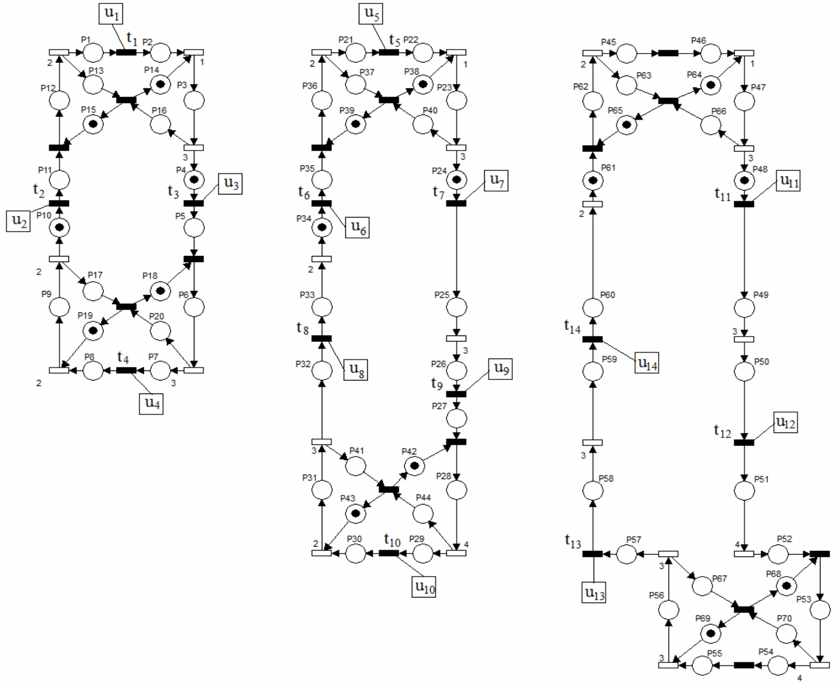

Рис. 1. Граф синхронізації керованої системи

ВИСНОВКИ

Таким чином в роботі на основі методів системного аналізу розроблено алгоритм управління транспортною системою кар'єрного комплексу з використанням двох підходів системного аналізу до побудови системи управління дискретно-подійними системами на основі

Max-Plus алгебри. Проведено перевірку керованості станів системи та визначено, що FIFO-управління «перший приїхав – перший виїхав» дозволяє досягти оптимальної роботи системи. Така робота може бути описана за допомогою рівнянь у просторі станів. Проте в даному випадку неможливе формування стислого графіку роботи транспортної системи, який дозволить диспетчеру спростити контроль за вантажоперевезенням, проходженням маршруту та простоями обладнання. Розробка алгоритму управління транспортною системою кар'єрного комплексу на основі теорії дискретно-подійних систем забезпечить вирішення цієї проблеми.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Zaytceva E. Informatsionnaya tekhnologiya upravleniya dvizheniyem kar'yernogo avtotransporta / E. Zaytseva, V. Voropayeva, I. Dolgikh // Nauchnyy vestnik Chernovitskogo universiteta Seriya «Komp'yuternyye sistemy i komponenty» – 2013. – Том 4, Вип.4. – С. 69-73.
2. Zaytseva E. Podsistema operativnogo upravleniya kar'yernym avtotransportom / E. Zaytseva // Sbornik nauchnykh trudov Donetskogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Donetsk, 2013. – № 34. – С. 19-25.
3. Zaytseva E. Optymal'ne upravlinnya dyskretno-podiynymy systemamy z bahat'ma vkhodamy / E. Zaytseva, V. Voropayeva, I. Dolhikh // Systemnyy analiz ta informatsiyni tekhnolohiyi: materialy 15-yi Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi SAIT 2013 – K.: NNK "IPSA" NTUU "KPI". – 2013. – С. 99-100.
4. Zaytseva E. Metody i modeli operatyvno-dyspetchers'koho upravlinnya rukhom kar'yernoho avtomobil'noho transportu: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk: 05.13.06 / E. Zaytseva; Donets'kyy natsional'nyy tekhnichnyy univrsytet. – Donetsk, 2014. – 21 с.
5. Anderson T. W. Au introduction to multivariate statistical analysis. – N.Y. – 2008. – 131 s.
6. Nait-Sidi-Moh A. Petri net with conflicts and (max, plus) algebra for transportation systems / Nait-Sidi-Moh A., Manier M.-A., El Moudni A., Wack M. // 11th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems – 2006, Delft: Netherlands (2006) – P. 548-553.
7. R.F. Subtil. A practical approach to truck dispatch for open pit mines / R.F. Subtil, D.M. Silva and J.C. Alves // 35th APCOM Symposium 2011, Wollongong, NSW, 24-30 Sept 2011 – 2011. – P 765-777.
8. Ta C. A stochastic optimization approachto mine truck allocation / Ta C.; Kresta J.; Forbes J.; Marquez H. // International Journal of Mining, Reclamation and Environment – Taylor & Francis, 2005. – Vol. 19, n. 3. – P. 162–175.
9. Wetjens D. Discrete event system analysis using the max-plus algebra: Master's thesis / Wetjens Dennis; Eindhoven University of technology – Eindhoven, June 2004 – 151 p.
10. Königsberg Z.R. A mixed lyapunov-max-plus algebra approach to the stability problem for discrete event dynamical systems modeled with timed petri nets / Z.R. Königsberg // Neural Parallel & Scientific Computations. – 2011 – vol. 19, no. 1-2. – P. 35-50.

Рецензент: д.т.н., проф. Крижановський В.Г.,
Донецький національний університет
ім. Василя Стуса