УДК 629.114:622.684

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КАР'ЄРНОГО САМОСКИДА БЕЛАЗ

Монастирський Ю.А., Потапенко В.В.

MATHEMATICAL MODEL OF OPERATION OF OPEN PIT TRUCK BELAZ

Monastyrskiy Yu., Potapenko V.

На основі системного підходу створена математична модель експлуатації кар'єрного самоскида БЕЛАЗ. Виконано моделювання підсистем технологічних станів машини і переходів між ними за схемою марківського процесу з дискретними станами й безперервним часом. Згідно до моделі складена система диференціальних рівнянь, рішення якої дасть можливість обчислити ймовірності станів самоскида залежно від часу та у стаціонарних режимах для різних рівнів організації технічного обслуговування, діагностування й ремонту.
***Ключові слова**: системний підхід, кар'єрний самоскид, математична модель.*

Вступ. Системний аналіз автотранспортної системи кар'єру (АСК) підтвердив її складність як об'єкта управління. Це призвело до необхідності математичного опису АСК, який дасть можливість управляти нею за допомогою формальних методів. Без моделі процес управління АСК можна реалізувати лише методом проб і помилок, що неприйнятно, оскільки вимагає великих витрат часу й приводить до економічних втрат. Математична модель АСК являє собою її опис формальною мовою, що дозволяє зробити виводи про необхідні риси поведінки системи за допомогою певних процедур над її описом. Точність і обґрунтованість прогнозування й управління залежать від об'єктивності й точності відбиття в моделі АСК реальних процесів, що протікають при функціонуванні системи, вірогідності використовуваної інформації. Математичне моделювання дає можливість побудувати математичну модель автотранспортної системи кар'єру, яка, реалізуючись за допомогою комп'ютерів, імітує поведінку системи при різних умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [1, 2, 3] узагальнені досягнення у галузі проектування, виробництва та обслуговування кар'єрних автосамоскидів особливо великої вантажопід'ємності. Питанням структурних концепцій моделювання надійності складних транспортних систем, методам якісного та кількісного аналізу присвячені праці [4, 5].

Діюче «Положення про технічне обслуговування, діагностування й ремонт кар'єрних самоскидів «БЕЛАЗ» (далі – «Положення»), розроблене ВАТ «БЕЛАЗ» – керуючою компанією холдингу «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» у 2013 році [6], носить не обов'язковий, а рекомендаційний характер і тільки частково вирішує питання ефективного функціонування машин, розширює поле для творчості фахівців, що експлуатують цю техніку. Адаптація «Положення» до конкретних рівнів організації технічного обслуговування, діагностування й ремонту експлуатуючого підприємства залишається актуальним науковим завданням, розв'язок якого базується на ймовірнісних математичних моделях.

Мета роботи. Системний підхід дозволяє розглядати автотранспортну систему кар'єру як безліч елементів – кар'єрних самоскидів, що перебувають у взаємодії. Метою роботи є створення математичної моделі експлуатації кар'єрного самоскида БЕЛАЗ як окремої транспортної одиниці для різних рівнів організації технічного обслуговування, діагностування й ремонту.

Результати досліджень. Технологічні стани кар'єрних самоскидів із часом змінюються випадковим заздалегідь непередбаченим чином. Важливим моментом є те, що у першому наближенні можна припустити про залежність технологічного стану кар'єрного самоскида БЕЛАЗ у майбутньому від його справжнього стану і його незалежності від того, як і коли був досягнутий цей стан у даний момент часу. Для математичного опису таких технологічних станів кар'єрних самоскидів передбачається доцільним застосування математичного апарата, відомого як «марківські випадкові процеси». Більше того, враховуючи, що розглядаються три технологічні підсистеми станів кар'єрного самоскида, можна застосувати математичне моделювання за схемою «марківського процесу з дискретними станами й безперервним часом».

Створена раніше модель описує процеси, що відбуваються у тих гірничотранспортних цехах, де за недосконалої діагностики не відбувається перехід від планових технічних обслуговувань та ремонтів (ТОР) до непланових поточних ремонтів (ПоР), тобто має місце планово-попереджувальна система з поточними ремонтами внаслідок раптових відмов самоскида.

За розвиненої діагностики транспортної системи кар'єрних самоскидів існує перехід від планових техобслуговувань й ремонтів до поточних ремонтів, оскільки в результаті діагностичних дій у зоні ТОР відбуваються виявлення прихованих дефектів, виправлення яких потребує непланового поточного ремонту, що знайшло відображення в уточненій моделі підсистем технологічних станів кар'єрних самоскидів (рис. 1),

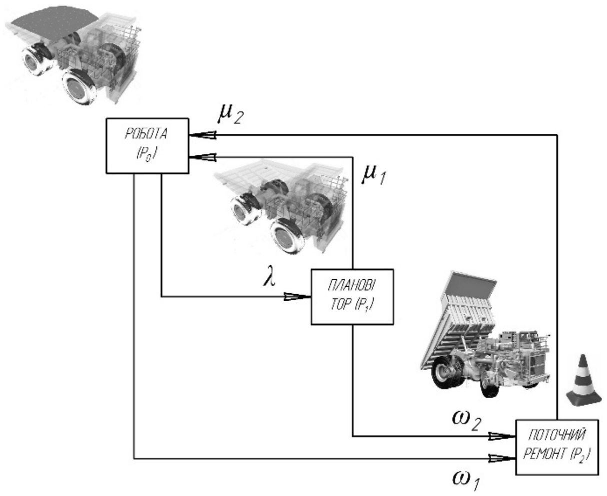


Рис. 1. Розмічений граф технологічних підсистем станів кар'єрного самоскида БЕЛАЗ:
λ – інтенсивність переходів кар'єрного самоскида зі стану роботи у стан планових технічних обслуговувань і ремонтів; ω_1 – інтенсивність переходів кар'єрного самоскида зі стану роботи у стан непланових поточних ремонтів; ω_2 – інтенсивність переходів самоскида зі стану ТОР у стан ПоР; μ_1, μ_2 – інтенсивність повернень самоскида у стан роботи зі станів планових ТОР і непланових ПоР відповідно

де представлений розмічений граф технологічних підсистем станів кар'єрного самоскида БЕЛАЗ при функціонуванні у кар'єрі, згідно до якого імовірності знаходження у кожному з них описуються за допомогою системи диференціальних рівнянь Колмогорова:

$$\begin{cases} \dfrac{dP_0}{dt} = -(\lambda+\omega_1)P_0 + \mu_1 P_1 + \mu_2 P_2, \\ \dfrac{dP_1}{dt} = \lambda P_0 - \left(\mu_1 + \omega_2\right) P_1, \\ \dfrac{dP_2}{dt} = \omega_1 P_0 + \omega_2 P_1 - \mu_2 P_2 \end{cases} \quad (1)$$

де $P_0 = P_0(t)$ – імовірність знаходження машини у стані роботи; $P_1 = P_1(t)$ – імовірність знаходження машини у стані планових технічних обслуговувань і ремонтів; $P_2 = P_2(t)$ – імовірність знаходження машини у стані поточного ремонту.

У початковий момент часу, передбачається, що самоскид перебував у стані роботи

$$P_0(t=0) = 1, \; P_1(t=0) = 0, \; P_2(t=0) = 0. \quad (2)$$

При цьому повинна також виконуватися умова повноти системи технологічних станів кар'єрного самоскида:

$$P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) = 1. \quad (3)$$

Як відомо, рівняння (1) і початкові умови (2) визначають задачу Коші. Для рішення цієї задачі необхідно знайти загальний розв'язок системи диференціальних рівнянь (1), а потім, згідно з початковими умовами (2), визначити частковий розв'язок.

Рішення системи (1) будемо шукати у вигляді

$$P_i(t) = X_i \cdot e^{\theta_i \cdot t}, \quad (i = 0, 1, 2). \quad (4)$$

Поставляючи (4) у систему диференціальних рівнянь (1), отримуємо однорідну систему лінійних алгебраїчних рівнянь

$$\begin{cases} -(\lambda+\omega_1+\theta)X_0 + \mu_1 X_1 + \mu_2 X_2 = 0; \\ \lambda X_0 - (\mu_1+\omega_2+\theta)X_1 = 0; \\ \omega_1 X_0 + \omega_2 X_1 - (\mu_2+\theta)X_2 = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Для того щоб однорідна система лінійних алгебраїчних рівнянь (5) мала ненульовий розв'язок, необхідно, щоб її визначник дорівнював нулю

$$\begin{vmatrix} -(\lambda+\omega_1+\theta) & \mu_1 & \mu_2 \\ \lambda & -(\mu_1+\omega_2+\theta) & 0 \\ \omega_1 & \omega_2 & -(\mu_2+\theta) \end{vmatrix} = 0. \quad (6)$$

Розкриваючи визначник (6), одержуємо алгебраїчне рівняння для знаходження власних чисел

$$\begin{aligned} &\theta^3 + \theta^2(\lambda+\omega_1+\omega_2+\mu_1+\mu_2) + \\ &+\theta(\lambda\mu_2+\omega_2\mu_2+\mu_1\mu_2+\lambda\omega_2+\omega_1\mu_1+\omega_1\omega_2) = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Розв'язок цього рівняння має вигляд

$$\theta_1 = 0; \quad \theta_2 = \frac{-(\lambda+\omega_1+\omega_2+\mu_1+\mu_2) - \sqrt{D}}{2}; \quad (8)$$

$$\theta_3 = \frac{-(\lambda+\omega_1+\omega_2+\mu_1+\mu_2) + \sqrt{D}}{2},$$

де

$$\begin{aligned} D &= (\lambda+\omega_1+\omega_2+\mu_1+\mu_2)^2 - \\ &- 4(\lambda\mu_1+\omega_2\mu_2+\mu_1\mu_2+\lambda\omega_2+\omega_1\mu_1+\omega_1\omega_2). \end{aligned}$$

У свою чергу, власні вектори, які відповідають знайденим власним числам (8), знаходимо шляхом підстановки цих чисел у систему лінійних алгебраїчних рівнянь (5).

Для значень $\theta = \theta_i$ отримуємо систему двох рівнянь

$$\begin{cases} -(\lambda + \omega_1 + \theta_i)X_0 + \mu_1 X_1 + \mu_2 X_2 = 0 \\ \lambda X_0 - (\mu_1 + \omega_1 + \theta_i)X_1 = 0 \end{cases} (i = 1; 2; 3) \qquad (9)$$

Уважаючи $X_0 = 1$, шляхом розв'язку (9) знаходимо координати власного вектора, відповідного до власного числа θ_i :

$$x_1^{(i)} = 1,$$

$$x_1^{(i)} = 1; \quad x_2^{(i)} = \frac{\lambda}{\mu_1 + \omega_1 + \theta_i}; \qquad (i = 1;2;3) \qquad (10)$$

$$x_3^{(i)} = \frac{\theta_i^2 + \theta_i(\lambda + \mu_1 + 2\omega_1) + \omega_1(\lambda + \mu_1 + \omega_1)}{\mu_2(\mu_1 + \omega_1 + \theta_i)}.$$

Враховуючи (10), загальний розв'язок системи диференціальних рівнянь (1) запишеться у вигляді

$$P_0(t) = C_1 + C_2 e^{\theta_2 t} + C_3 e^{\theta_3 t},$$

$$P_1(t) = \frac{\lambda}{\mu_1 + \omega_1} C_1 + \frac{\lambda}{\mu_1 + \omega_1 + \theta_2} C_2 e^{\theta_2 t} + \frac{\lambda}{\mu_1 + \omega_1 + \theta_3} C_3 e^{\theta_3 t}$$

$$P_2(t) = \frac{\omega_1(\lambda + \mu_1 + \omega_1)}{\mu_2(\mu_1 + \omega_1)} C_1 + \qquad (11)$$

$$+ \frac{\theta_2^2 + \theta_2(\lambda + \mu_1 + 2\omega_1) + \omega_1(\lambda + \mu_1 + \omega_1)}{\mu_2(\mu_1 + \omega_1 + \theta_2)} C_2 e^{\theta_2 t} +$$

$$+ \frac{\theta_3^2 + \theta_3(\lambda + \mu_1 + 2\omega_1) + \omega_1(\lambda + \mu_1 + \omega_1)}{\mu_2(\mu_1 + \omega_1 + \theta_3)} C_3 e^{\theta_3 t},$$

де C_1, C_2, C_3 – довільні постійні.

Для знаходження довільних постійних скористаємося початковою умовою (2), що дасть систему лінійних алгебраїчних рівнянь

$$\begin{cases} C_1 + C_2 + C_3 = 1 \\ \frac{1}{\mu_1 + \omega_1} C_1 + \frac{1}{\mu_1 + \omega_1 + \theta_2} C_2 + \frac{1}{\mu_1 + \omega_1 + \theta_3} C_3 = 0 \\ \frac{\omega_1(\lambda + \mu_1 + \omega_1)}{\mu_2(\mu_1 + \omega_1)} C_1 + \\ + \frac{\theta_2^2 + \theta_2(\lambda + \mu_1 + 2\omega_1) + \omega_1(\lambda + \mu_1 + \omega_1)}{\mu_2(\mu_1 + \omega_1 + \theta_2)} C_2 + \\ + \frac{\theta_3^2 + \theta_3(\lambda + \mu_1 + 2\omega_1) + \omega_1(\lambda + \mu_1 + \omega_1)}{\mu_2(\mu_1 + \omega_1 + \theta_3)} C_3 = 0 \end{cases} \qquad (12)$$

Вирішуючи систему (12), знаходимо

$$C_1 = \frac{(\omega_2 + \mu_1)\mu_2}{\lambda\mu_2 + \omega_2\mu_2 + \mu_1\mu_2 + \lambda\omega_2 + \omega_1\mu_1 + \omega_1\omega_2},$$

$$C_2 = \frac{(\omega_1 + \mu_1 + \theta_2)(\lambda + 2\omega_1 + \mu_1 + \theta_3)}{\theta_2(\theta_2 - \theta_3)}, \qquad (13)$$

$$C_3 = \frac{(\omega_1 + \mu_1 + \theta_3)(\lambda + 2\omega_1 + \mu_1 + \theta_2)}{\theta_3(\theta_3 - \theta_2)}.$$

Підставляючи (13) у загальний розв'язок (11), знаходимо рішення задачі Коші

$$P_0(t) = \frac{(\omega_2 + \mu_1)\mu_2}{\lambda\mu_2 + \omega_2\mu_2 + \mu_1\mu_2 + \lambda\omega_2 + \omega_1\mu_1 + \omega_1\omega_2} +$$

$$+ \frac{(\omega_1 + \mu_1 + \theta_2)(\lambda + 2\omega_1 + \mu_1 + \theta_3)}{\theta_2(\theta_2 - \theta_3)} e^{\theta_2 t} +$$

$$+ \frac{(\omega_1 + \mu_1 + \theta_3)(\lambda + 2\omega_1 + \mu_1 + \theta_2)}{\theta_3(\theta_3 - \theta_2)} e^{\theta_3 t},$$

$$P_1(t) = \frac{\lambda\mu_2}{\lambda\mu_2 + \omega_2\mu_2 + \mu_1\mu_2 + \lambda\omega_2 + \omega_1\mu_1 + \omega_1\omega_2} +$$

$$+ \frac{\lambda(\omega_1 + \mu_1 + \theta_2)(\lambda + 2\omega_1 + \mu_1 + \theta_3)}{(\omega_1 + \mu_1 + \theta_2)\theta_2(\theta_2 - \theta_3)} e^{\theta_2 t} +$$

$$+ \frac{\lambda(\omega_1 + \mu_1 + \theta_3)(\lambda + 2\omega_1 + \mu_1 + \theta_2)}{(\omega_1 + \mu_1 + \theta_3)\theta_3(\theta_3 - \theta_2)} e^{\theta_3 t}, \qquad (14)$$

$$P_2(t) = \frac{\lambda\omega_2 + \omega_1\omega_2 + \omega_1\mu_1}{\lambda\mu_2 + \omega_2\mu_2 + \mu_1\mu_2 + \lambda\omega_2 + \omega_1\mu_1 + \omega_1\omega_2} +$$

$$+ \frac{\theta_2^2 + \theta_2(\lambda + 2\omega_1 + \mu_1) + \omega_1(\lambda + \omega_1 + \mu_1)(\lambda + 2\omega_1 + \mu_1 + \theta_3)}{\mu_2\theta_2(\theta_2 - \theta_3)} e^{\theta_2 t} +$$

$$+ \frac{\theta_3^2 + \theta_3(\lambda + 2\omega_1 + \mu_1) + \omega_1(\lambda + \omega_1 + \mu_1)(\lambda + 2\omega_1 + \mu_1 + \theta_2)}{\mu_2\theta_3(\theta_3 - \theta_2)} e^{\theta_3 t}$$

Математична модель, описувана функціями (14), дозволяє визначити ймовірності знаходження кар'єрного самоскида БЕЛАЗ у кожному зі станів технологічних підсистем.

Разом з тим, дослідження функціонування кар'єрного самоскида на основі отриманої математичної моделі представляє певні труднощі, пов'язані, насамперед, із залежністю ймовірностей від часу. Тому представляється доцільним розглянути граничний стаціонарний режим, при якому система, що описує функціонування кар'єрних самоскидів, випадковим образом міняє свої стани, але ймовірність кожного з них уже не залежить від часу. У цьому випадку ймовірність характеризує середній відносний час перебування кар'єрного самоскида в даному стані. Для обчислення цих імовірностей достатньо у формулах (1) прирівняти похідні нулю, що дасть систему трьох алгебраїчних рівнянь із трьома невідомими:

$$\begin{cases} -(\lambda+\omega_1)P_0 & +\mu_1 P_1 & +\mu_2 P_2 = 0 \\ \lambda P_0 & -(\mu_1+\omega_2)P_1 & = 0 \\ \omega_1 P_0 & +\omega_2 P_1 & -\mu_2 P_2 = 0 \end{cases} \quad (15)$$

Отримана система рівнянь (15) є лінійно залежною, тому що її визначник дорівнює нулю згідно (6). Тому для знаходження рішення відкидаємо одне рівняння й додаємо умову (2)

$$\begin{cases} -(\lambda+\omega_1)P_0 & +\mu_1 P_1 & +\mu_2 P_2 = 0 \\ \lambda P_0 & -(\mu_1+\omega_2)P_1 & = 0 \\ P_0 & +P_1 & +P_2 = 1 \end{cases} \quad (16)$$

Розв'язок системи рівнянь (16) має вигляд

$$P_0 = \frac{(\omega_2+\mu_1)\mu_2}{(\lambda+\omega_2+\mu_1)\mu_2+(\lambda+\omega_1)\omega_2+\omega_1\mu_1}, \quad (17)$$

$$P_1 = \frac{\lambda\mu_2}{(\lambda+\omega_2+\mu_1)\mu_2+(\lambda+\omega_1)\omega_2+\omega_1\mu_1}, \quad (18)$$

$$P_2 = \frac{(\lambda+\omega_1)\omega_2+\omega_1\mu_1}{(\lambda+\omega_2+\mu_1)\mu_2+(\lambda+\omega_1)\omega_2+\omega_1\mu_1}. \quad (19)$$

Формули (17), (18) і (19) визначають імовірності знаходження кар'єрного самоскида у стаціонарних технологічних підсистемах станів: роботі, планових технічних обслуговуваннях і ремонтах, непланових поточних ремонтах відповідно.

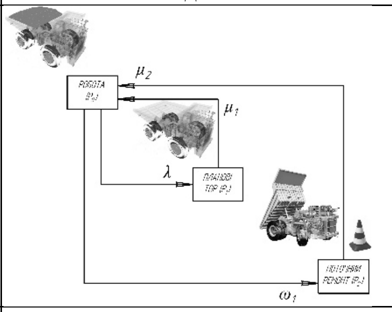
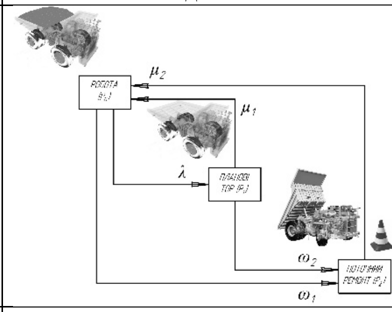
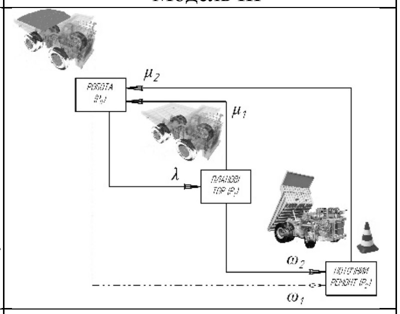
У роботі створена математична модель елемента автотранспортної системи кар'єру – самоскида БЕЛАЗ, за системи обслуговування машини із розвиненою діагностикою, що дозволило, використовуючи результати попередніх досліджень об'єднати отримані моделі у таблицю 1, де наведені результати моделювання для трьох випадків експлуатації кар'єрного самоскида: модель I ілюструє випадок, коли самоскид обслуговується за системи ТОР із недосконалою діагностикою, поточні ремонти відбуваються тільки внаслідок раптових відмов самоскида у роботі ($\omega_1 \neq 0;\ \omega_2 = 0$); модель II – випадок, коли самоскид обслуговується за системи ТОР із розвиненою діагностикою, поточні ремонти відбуваються не тільки внаслідок раптових відмов самоскида у роботі, а і в результаті діагностичних обстежень під час проведення планових ТОР ($\omega_1 \neq 0;\ \omega_2 \neq 0$); модель III – випадок, коли самоскид обслуговується за системи ТОР із оптимальною організацією робіт, поточні ремонти по причині раптових відмов самоскида практично не трапляються, а відбуваються внаслідок досконалої діагностики ($\omega_1 \to 0;\ \omega_2 \neq 0$).

Висновки. На основі системного підходу розроблена математична модель експлуатації кар'єрного самоскида БЕЛАЗ для різних рівнів організації технічного обслуговування, діагностування й ремонту, яка дозволить обчислити ймовірності станів машини залежно від часу та у стаціонарних режимах.

Опираючись на отримані результати, планується виконання структурного синтезу моделі автотранспортної системи кар'єру, ідентифікації параметрів моделі АСК та синтезу її управління.

Таблиця

Моделі елемента автотранспортної системи кар'єру – самоскида БЕЛАЗ

	Модель I	Модель II	Модель III
Графи підсистем			
Системи рівнянь	$\begin{cases} \frac{dP_0}{dt} = -(\lambda+\omega_1)P_0+\mu_1 P_1+\mu_2 P_2; \\ \frac{dP_1}{dt} = \lambda P_0 - \mu_1 P_1; \\ \frac{dP_2}{dt} = \omega_1 P_0 - \mu_2 P_2. \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{dP_0}{dt} = -(\lambda+\omega_1)P_0+\mu_1 P_1+\mu_2 P_2; \\ \frac{dP_1}{dt} = \lambda P_0 - (\mu_1+\omega_2)P_1; \\ \frac{dP_2}{dt} = \omega_1 P_0 + \omega_2 P_1 - \mu_2 P_2. \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{dP_0}{dt} = -\lambda P_0+\mu_1 P_1+\mu_2 P_2; \\ \frac{dP_1}{dt} = \lambda P_0 - (\mu_1+\omega_2)P_1; \\ \frac{dP_2}{dt} = \omega_2 P_1 - \mu_2 P_2. \end{cases}$
мовірності станів	$P_0 = \frac{\mu_1\mu_2}{\lambda\mu_2+\mu_1\mu_2+\omega_1\mu_1}$; $P_1 = \frac{\lambda\mu_2}{\lambda\mu_2+\mu_1\mu_2+\omega_1\mu_1}$; $P_2 = \frac{\omega_1\mu_1}{\lambda\mu_2+\mu_1\mu_2+\omega_1\mu_1}$.	$P_0 = \frac{(\omega_2+\mu_1)\mu_2}{(\lambda+\omega_2+\mu_1)\mu_2+(\lambda+\omega_1)\omega_2+\omega_1\mu_1}$; $P_1 = \frac{\lambda\mu_2}{(\lambda+\omega_2+\mu_1)\mu_2+(\lambda+\omega_1)\omega_2+\omega_1\mu_1}$; $P_2 = \frac{(\lambda+\omega_1)\omega_2+\omega_1\mu_1}{(\lambda+\omega_2+\mu_1)\mu_2+(\lambda+\omega_1)\omega_2+\omega_1\mu_1}$.	$P_0 = \frac{(\omega_2+\mu_1)\mu_2}{(\lambda+\omega_2+\mu_1)\mu_2+\lambda\omega_2}$; $P_1 = \frac{\lambda\mu_2}{(\lambda+\omega_2+\mu_1)\mu_2+\lambda\omega_2}$; $P_2 = \frac{\lambda\omega_2}{(\lambda+\omega_2+\mu_1)\mu_2+\lambda\omega_2}$.

Л і т е р а т у р а

1. Карьерный автотранспорт: состояние и перспективы / П.Л. Мариев, А.А. Кулешов, А.Н. Егоров, И.В. Зырянов. – СПб.: Наука, 2004. – 429 с.
2. Карьерный автотранспорт стран СНГ в XXI веке / П.Л. Мариев, А.А. Кулешов, А.Н. Егоров, И.В. Зырянов. – СПб.: Наука, 2006. – 387 с.
3. Карьерные самосвалы особо большой грузоподъёмности. Проектирование, технологии, маркетинг / П.Л. Мариев [и др.]. – Минск: Интегралполиграф, 2008. – 320 с.
4. Диллон Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем / Б. Диллон, Ч. Сингх: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984.– 318 с., ил.
5. Хенли Э. Дж. Надежность технических систем и оценка риска / Э. Дж. Хенли, Х. Кумамото : Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1984. – 528 с., ил.
6. Положение о техническом обслуживании, диагностировании и ремонте карьерных самосвалов «БЕЛАЗ» / ОАО “БЕЛАЗ” – управляющая компания холдинга “БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ”. – Жодино: ОАО “БЕЛАЗ”, 2013. – 20 с.

R e f e r e n c e s

1. P.L. Mariev, A.A. Kuleshov, A.N. Egorov, I.V. Zyrjanov. Kar'ernyj avtotransport: sostojanie i perspektivy. SPb. : Nauka, 2004. – 429 s.
2. P.L.Mariev, A.A.Kuleshov, A.N.Egorov, I.V.Zyrjanov. Kar'ernyj avtotransport stran SNG v XXI veke. SPb.: Nauka, 2006. – 387 s.
3. P.L.Mariev, et al. Kar'ernye samosvaly osobo bol'shoj gruzopodjomnosti. Proektirovanie, tehnologii, marketing. Minsk : Integralpoligraf, 2008. – 320 s.
4. B. Dillon, Ch. Singh : Per. s angl. Dillon B. Inzhenernye metody obespechenija nadezhnosti sistem. M.: Mir, 1984. – 318s.
5. Je. Dzh. Henli, X. Kumamoto : Per. s angl. Henli Je. Dzh. Nadezhnost' tehnicheskih sistem i ocenka riska. M.: Mashinostroenie, 1984. – 528 s.
6. OAO “BELAZ” – upravljajushhaja kompanija holdinga “BELAZ-HOLDING”. Polozhenie o tehnicheskom obsluzhivanii, diagnostirovanii i remonte kar'ernyh samosvalov «BELAZ». Zhodino : OAO “BELAZ”, 2013. – 20 s.

Монастырский Ю.А., Потапенко В.В. Математическая модель эксплуатации карьерного самосвала БЕЛАЗ.

На основе системного подхода создана математическая модель эксплуатации карьерного самосвала БЕЛАЗ. Выполнено моделирование подсистем технологических состояний машины и переходов между ними по схеме марковского процесса с дискретными состояниями и непрерывным временем. Согласно модели составлена система дифференциальных уравнений, решение которой даст возможность вычислить вероятности состояний самосвала в зависимости от времени и в стационарных режимах для разных уровней организации технического обслуживания, диагностирования и ремонта.

***Ключевые слова**: системный подход, карьерный самосвал, математическая модель.*

Monastyrskiy Yu., Potapenko V. Mathematical model of operation of open pit truck BELAZ.

There was made modeling of transport system elements of open pit truck BELAZ on the basis of system approach. Modeling of subsystems of technological conditions of cars and transitions between them was made with using of the scheme of Markov process with discrete states and continuous time. According to model there was also made the system of the differential equations, which decision gave the chance to calculate probabilities of conditions of open pit trucks depending on time and in the stationary modes for different levels of the organization of maintenance operation, diagnosing and repair. Results of researches allow continuing the analysis of transport system operation, in order to assess actual and forecasting future condition of cars, a correcting of maintenance operation system, diagnosing and car repairs, increase of their reliability.

***Keywords**: system approach, open pit truck, mathematical model.*

Монастирський Ю.А., д.т.н., проф., зав. кафедри автомобільного транспорту ДВНЗ «Криворізький національний університет», e-mail: monastirskiy08@rambler.ru

Потапенко В.В., старший викладач кафедри автомобільного транспорту ДВНЗ «Криворізький національний університет», e-mail: romantihk@mail.ru

Рецензент: ***Осенін Ю.І.,*** д.т.н., професор

Стаття подана 12.02.2015