

УДК 629.114:622.684

Ю. А. МОНАСТИРСЬКИЙ, доктор техн. наук, професор, завідувач кафедри, Кривий Ріг;

В. М. СЕРЕБРЕНИКОВ, кандидат техн. наук, доцент, Кривий Ріг;

В. В. ПОТАПЕНКО, старший викладач ДВНЗ «Криворізький національний університет»

СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ЯК МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ КАР'ЄРНИХ САМОСКИДІВ

Застосовано системний підхід при дослідженні функціонування кар'єрних автосамоскидів БЕЛАЗ. Виконано моделювання підсистем технологічних станів машин і переходів між ними за схемою марківського процесу з дискретними станами й безперервним часом. Згідно до моделі ймовірності знаходження автомобілів у різних технологічних станах описані системою диференціальних рівнянь, рішення якої дало можливість сформулювати мету і функціонал ефективної експлуатації техніки, досягнути раціональної вартості роботи транспортної системи кар'єрних самоскидів.

Ключові слова: кар'єрний самоскид, системний підхід, математична модель.

Вступ. Інтенсифікація експлуатації систем великовантажних автосамоскидів як основного засобу транспортування добутої гірничої маси є основною ознакою удосконалення відкритого способу розробки корисних копалин. У зв'язку зі значною глибиною (більше 300 метрів) і перспективою подальшого поглиблення кар'єрів, як в Україні, так і у світі, гірничотехнічні умови роботи автомобілів погіршуються.

Істотно підвищити продуктивність гірничотранспортного обладнання можна за рахунок удосконалення системи технічного обслуговування і ремонтів, що забезпечить скорочення часу перебування машин у ремонтній зоні. Тому з усією гостротою постають питання підвищення якості обслуговування кар'єрних самоскидів, що є резервом зниження вартості життєвого циклу, підвищення їх надійності й ефективності.

Аналіз основних досягнень і літератури. 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].

Останні «Положення про технічне обслуговування, діагностування й ремонт кар'єрних самоскидів «БЕЛАЗ» (далі – «Положення»), розроблені ВАТ «БЕЛАЗ» – керуючою компанією холдингу «БЕЛАЗ-ХОЛДІНГ» з 2003 по 2013 роки [6, 7, 8], керівництва по експлуатації [9] та ремонту [10] носять не обов'язковий, а рекомендаційний характер і тільки частково вирішують питання ефективного функціонування машин, розширюють поле для творчості фахівців, що експлуатують цю техніку. Проблема адаптації положення до конкретних гірничотехнічних умов експлуатуючого підприємства залишається актуальним завданням, розв'язок якої повністю лягає на плечі вчених і практиків.

Мета дослідження, постановка задачі. Метою роботи є підвищення ефективності експлуатації кар'єрних самоскидів БЕЛАЗ за рахунок використання моделювання процесів функціонування. Одним з доцільних шляхів найбільш повного розв'язку цих питань є застосування системного підходу, що показав свою універсальність як інструмент для вирішення практичних проблем. Системний підхід

при моделюванні станів і переходів самоскидів дозволяє оцінювати й прогнозувати фактичний стан машин, коригувати структуру системи техобслуговування й підвищувати надійність роботи.

Матеріали досліджень. Моделювання процесів функціонування кар'єрних самоскидів є основою для організації ефективного використання техніки, раціонального обслуговування й прогнозування її стану. Системний підхід дасть можливість розглядати процес функціонування кар'єрних самоскидів як систему, що включає послідовність взаємозалежних операцій. До таких операцій природно віднести три узагальнені технологічні стани кар'єрних самоскидів: роботу, планові технічні обслуговування й ремонти, поточний ремонт.

Аналіз технологічних станів кар'єрних самоскидів дозволяє зробити висновок про можливість аналізу їх протікання як випадкових процесів, оскільки вони залежать від випадкових факторів, що впливають на ці стани. У розглянутому випадку технологічні стани кар'єрних самоскидів із часом змінюються, причому вони міняються у часі випадковим заздалегідь непередбаченим образом. Важливим моментом є те, що у першому наближенні можна припустити про залежність технологічного стану кар'єрного самоскида 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 технологічного стани кар'єрного самоскида, можна застосувати математичне моделювання за схемою марківського процесу з дискретними станами й безперервним часом.

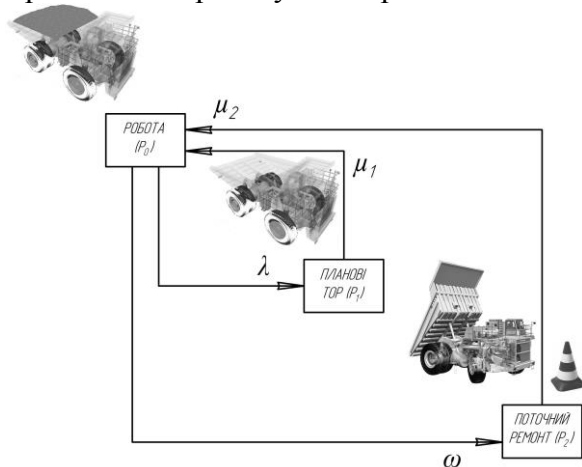


Рис.1. Розмічений граф підсистем технологічних станів кар'єрних самоскидів:

λ, ω – умовні щільності ймовірностей переходів кар'єрного самоскида зі стану роботи у стани планових техобслуговувань й ремонтів та непланових поточних ремонтів; μ_1, μ_2 – умовні щільності ймовірностей повернення кар'єрного самоскида у стан роботи зі станів планових ТОР і непланових ПоР відповідно

На рисунку 1 представлений розмічений граф підсистем технологічних станів при функціонуванні кар'єрних самоскидів, згідно з яким імовірності технологічних станів кар'єрних самоскидів описуються за допомогою системи диференціальних рівнянь Колмогорова

$$\begin{cases} \frac{dP_0}{dt} = -(\lambda + \omega)P_0 + \mu_1P_1 + \mu_2P_2, \\ \frac{dP_1}{dt} = \lambda P_0 - \mu_1P_1, \\ \frac{dP_2}{dt} = \omega P_0 - \mu_2P_2 \end{cases} \quad (1)$$

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

Вважається, що у початковий момент часу машина перебувала в стані роботи

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

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 вирішення цього завдання необхідно знайти загальний розв'язок системи диференціальних рівнянь (1) а потім, згідно з початковими умовами (2), визначити частковий розв'язок.

Розв'язок системи (1) будемо шукати у вигляді

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

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

$$\begin{cases} -(\lambda + \omega + k)X_0 + \mu_1 X_1 + \mu_2 X_2 = 0 \\ \lambda X_0 - (\mu_1 + k)X_1 = 0 \\ \omega X_0 - (\mu_2 + k)X_2 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

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

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

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

$$k^3 + k^2(\lambda + \omega + \mu_1 + \mu_2) + k(\lambda\mu_2 + \omega\mu_1 + \mu_1\mu_2) = 0. \quad (7)$$

Розв'язок цього рівняння має вигляд

$$\begin{aligned} k_1 &= 0, \\ k_2 &= \frac{-(\lambda + \omega + \mu_1 + \mu_2) - \sqrt{D}}{2}, \\ k_3 &= \frac{-(\lambda + \omega + \mu_1 + \mu_2) + \sqrt{D}}{2}, \end{aligned} \quad (8)$$

де $D = (\lambda + \omega + \mu_1 + \mu_2)^2 - 4(\lambda\mu_2 + \omega\mu_1 + \mu_1\mu_2)$.

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

Для значень $k = k_i$ отримуємо систему двох рівнянь

$$\begin{cases} -(\lambda + \omega + k_i)X_0 + \mu_1 X_1 + \mu_2 X_2 = 0 \\ \lambda X_0 - (\mu_1 + k_i)X_1 = 0 \end{cases} \quad (i=1, 2, 3) \quad (9)$$

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

$$\begin{aligned} x_1^{(i)} &= 1, \\ x_2^{(i)} &= \frac{\lambda}{\mu_1 + k_i}, \\ x_3^{(i)} &= \frac{\omega}{\mu_2 + k_i}. \quad (i=1, 2, 3). \end{aligned} \quad (10)$$

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

$$\begin{aligned} P_0 &= C_1 + C_2 e^{k_2 t} + C_3 e^{k_3 t}, \\ P_1 &= \frac{\lambda}{\mu_1} C_1 + \frac{\lambda}{\mu_1 + k_2} C_2 e^{k_2 t} + \frac{\lambda}{\mu_1 + k_3} C_3 e^{k_3 t}, \\ P_2 &= \frac{\omega}{\mu_2} C_1 + \frac{\omega}{\mu_2 + k_2} C_2 e^{k_2 t} + \frac{\omega}{\mu_2 + k_3} C_3 e^{k_3 t}. \end{aligned} \quad (11)$$

де C_1, C_2, C_3 – довільні постійні.

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

$$\begin{cases} C_1 + C_2 + C_3 = 1 \\ \frac{1}{\mu_1} C_1 + \frac{1}{\mu_1 + k_2} C_2 + \frac{1}{\mu_1 + k_3} C_3 = 0 \\ \frac{1}{\mu_2} C_1 + \frac{1}{\mu_2 + k_2} C_2 + \frac{1}{\mu_2 + k_3} C_3 = 0 \end{cases} \quad (12)$$

Вирішуючи систему (12), знаходимо

$$C_1 = \frac{\mu_1 \mu_2}{k_2 k_3},$$

$$C_2 = \frac{(\mu_1 + k_2)(\mu_2 + k_2)}{k_2(k_2 - k_3)}, \quad (13)$$

$$C_3 = \frac{(\mu_1 + k_3)(\mu_2 + k_3)}{k_3(k_3 - k_2)}.$$

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

$$P_0 = \frac{\mu_1 \mu_2}{k_2 k_3} + \frac{(\mu_1 + k_2)(\mu_2 + k_2)}{k_2(k_2 - k_3)} e^{k_2 t} + \frac{(\mu_1 + k_3)(\mu_2 + k_3)}{k_3(k_3 - k_2)} e^{k_3 t} \quad (14)$$

$$P_1 = \frac{\lambda \mu_2}{k_2 k_3} + \frac{\lambda(\mu_2 + k_2)}{k_2(k_2 - k_3)} e^{k_2 t} + \frac{\lambda(\mu_2 + k_3)}{k_3(k_3 - k_2)} e^{k_3 t} \quad (15)$$

$$P_2 = \frac{\omega \mu_2}{k_2 k_3} + \frac{\omega(\mu_2 + k_2)}{k_2(k_2 - k_3)} e^{k_2 t} + \frac{\omega(\mu_2 + k_3)}{k_3(k_3 - k_2)} e^{k_3 t} \quad (16)$$

Математична модель, описувана функціями (14), (15) і (16), дозволяє обчислити ймовірності станів системи, що описує три основні технологічні стани функціонування кар'єрних самоскидів залежно від часу.

Результати досліджень. Дослідження функціонування кар'єрних самоскидів на основі отриманої математичної моделі представляє певні труднощі, пов'язані, насамперед, із залежністю ймовірностей від часу. Тому доцільно розглянути граничний стаціонарний режим, за якого 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 системи в даному стані. Для обчислення цих ймовірностей достатньо у формулах (14), (15) і (16) спрямувати час до нескінченності, що дасть

$$P_0 = \frac{\mu_1 \mu_2}{\lambda \mu_2 + \omega \mu_1 + \mu_1 \mu_2},$$

$$P_1 = \frac{\lambda \mu_2}{\lambda \mu_2 + \omega \mu_1 + \mu_1 \mu_2}, \quad (17)$$

$$P_2 = \frac{\omega \mu_1}{\lambda \mu_2 + \omega \mu_1 + \mu_1 \mu_2}.$$

Аналогічний результат може бути отриманий, якщо в системі диференціальних рівнянь (1) дорівняти похідні нулю

$$\begin{cases} -(\lambda + \omega + k)P_0 & + \mu_1 P_1 & + \mu_2 P_2 = 0 \\ \lambda P_0 & -(\mu_1 + k)P_1 & = 0 \\ \omega P_0 & & -(\mu_2 + k)P_2 = 0 \end{cases}$$

і потім розв'язати отриману систему алгебраїчних рівнянь із урахуванням умови (3).

Математична модель стаціонарного стану системи функціонування кар'єрних самоскидів (17) дає можливість порівняно просто сформулювати мету. Беручи до уваги розуміння імовірностей стаціонарного стану системи, що описує функціонування кар'єрних самоскидів, як середній відносний час перебування системи в цих станах, мета може бути сформульована у вигляді функціонала

$$F = c_0 \cdot P_0 - c_1 \cdot P_1 - c_2 \cdot P_2, \quad (18)$$

c_0 – середня вартість прибутку, отриманого від роботи кар'єрного самоскида, c_1 , c_2 – середня вартість втрат, пов'язаних із плановими технічним обслуговуванням і ремонтом і поточним ремонтом кар'єрних самоскидів відповідно.

Функціонал (18) визначає середній прибуток від функціонування системи, описуваної трьома основними станами кар'єрних самоскидів.

Підставляючи (17) у функціонал (18), отримуємо

$$F = c_0 \frac{\mu_1 \mu_2}{\lambda \mu_2 + \omega \mu_1 + \mu_1 \mu_2} - c_1 \frac{\lambda \mu_2}{\lambda \mu_2 + \omega \mu_1 + \mu_1 \mu_2} - c_2 \frac{\omega \mu_1}{\lambda \mu_2 + \omega \mu_1 + \mu_1 \mu_2}. \quad (19)$$

Варіюючи параметрами, що визначають умовні щільності ймовірностей переходів λ , ω , μ_1 , μ_2 , можна досягнути необхідної середньої вартості функціонування системи, що описує три основні стани кар'єрних самоскидів.

Висновки. На основі системного підходу досліджене функціонування кар'єрних самоскидів. Моделювання станів і переходів машин дозволило обчислити ймовірності станів системи залежно від часу, дало можливість сформулювати мету і функціонал прибутку від експлуатації системи, описуваної трьома основними станами кар'єрних самоскидів. Варіюючи параметрами функціонала можна досягнути раціональної вартості роботи транспортної системи.

Планується виконати аналіз уточненої моделі підсистем технологічних станів кар'єрних самоскидів, у якій існує перехід від планових техобслуговувань й ремонтів до поточних ремонтів, що має місце на практиці, тому що в результаті діагностичних дій у зоні ТОР можливе виявлення прихованих дефектів, виправлення яких потребує непланового поточного ремонту, що дозволить оцінювати й прогнозувати фактичний стан машин, коригувати структуру системи техобслуговування й підвищувати надійність роботи.

Список літератури: 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, 200. – 387 с. 3. Карьерные самосвалы особо большой грузоподъемности. 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 : временное / РУПП «Белорусский автомобильный завод». –

Жодино: РУПП «БелАЗ», 2003. – 38 с. **7.** Положение о техническом обслуживании, диагностировании и ремонте карьерных самосвалов БелАЗ / РУПП «Белорусский автомобильный завод». – Жодино : РУПП «БелАЗ», 2004. – 38 с. **8.** Положение о техническом обслуживании, диагностировании и ремонте карьерных самосвалов «БЕЛАЗ» / ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ». – Жодино : ОАО «БЕЛАЗ», 2013. – 20 с. **9.** Карьерные самосвалы серии БЕЛАЗ-7513 : руководство по эксплуатации : 75131-3902015 РЭ / ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ». – Жодино : ОАО «БЕЛАЗ», 2012. – 192 с. **10.** Карьерные самосвалы серии БЕЛАЗ-7513 : руководство по ремонту : 7513-3902080 РС / ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ». – Жодино : ОАО «БЕЛАЗ», 2013. – 217 с.

Bibliography (transliterated): **1.** P.L. Mariev, A.A. Kuleshov, A.N. Egorov, I.V. Zyrjanov. Kar'ernyj avtotransport: sostojanie i perspektivy. SPb. : Nauka, 2004. **2.** P.L.Mariiev, A.A.Kuleshov, A.N.Egorov, I.V.Zyrjanov. Kar'ernyj avtotransport stran SNG v XXI veke. SPb.: Nauka, 200. **3.** P.L.Mariiev, et al. Kar'ernye samosvaly osobo bol'shoj gruzopodjornosti. Proektirovanie, tehnologii, marketing. Minsk : Integralpoligraf, 2008. **4.** B. Dillon, Ch. Singh : Per. s angl. Dillon B. Inzhenernye metody obespechenija nadezhnosti sistem. Moscow: Mir, 1984. **5.** Je. Dzh. Henli, X. Kumamoto : Per. s angl. Henli Je. Dzh. Nadezhnost' tehniceskikh sistem i ocenka riska. Moscow: Mashinostroenie, 1984. **6.** RUPP «Belorusskij avtomobil'nyj zavod». Polozhenie o tehnicеском obsluzhivanii, diagnostirovanii i remonte kar'ernyh samosvalov BelAZ : vremennoe. Zhodino : RUPP «BelAZ», 2003. **7.** RUPP «Belorusskij avtomobil'nyj zavod». Polozhenie o tehnicеском obsluzhivanii, diagnostirovanii i remonte kar'ernyh samosvalov BelAZ. Zhodino : RUPP «BelAZ», 2004. **8.** ОАО «BELAZ» – upravljajushhaja kompanija holdinga «BELAZ-HOLDING». Polozhenie o tehnicеском obsluzhivanii, diagnostirovanii i remonte kar'ernyh samosvalov «BELAZ». Zhodino : ОАО «BELAZ», 2013. **9.** ОАО «BELAZ» – upravljajushhaja kompanija holdinga «BELAZ-HOLDING». Kar'ernye samosvaly serii BELAZ-7513 : rukovodstvo po jekspluatácii : 75131-3902015 RJe. Zhodino : ОАО «BELAZ», 2012. **10.** ОАО «BELAZ» – upravljajushhaja kompanija holdinga «BELAZ-HOLDING». Kar'ernye samosvaly serii BELAZ-7513 : rukovodstvo po remontu : 7513-3902080 RS. Zhodino : ОАО «BELAZ», 2013.

Надійшла (received) 26.01.2015