

УДК 629.114:622.684

*В. В. ПОТАПЕНКО*, ст. викл. ДВНЗ «Криворізький національний університет»**АНАЛІЗ МОДЕЛІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СТАНІВ  
КАР'ЄРНИХ САМОСКІДІВ БЕЛАЗ**

Виконаний аналіз створеної математичної моделі функціонування кар'єрних самоскидів БелАЗ, наведені класифікація та властивості потоків подій, технологічних станів і переходів між ними. Визначений напрямок підвищення ефективності експлуатації кар'єрних самоскидів із можливістю адаптації для конкретного підприємства за критерієм мінімуму витрат на володіння.

**Ключові слова:** кар'єрний самоскид, потоки подій, технологічні стани, математична модель.

**Вступ.** На промислових підприємствах України експлуатуються понад дві тисячі кар'єрних самоскидів, у Криворізькому залізничному басейні працює третина національного парку таких машин. Позиції відкритого способу розробки корисних копалин зміцнюються, питома вага самоскидів збільшується. Поглиблення виробітків погіршує гірничотехнічні умови, підвищує експлуатаційні навантаження, знижує надійність техніки й ефективність транспортування. Одним з резервів зниження витрат на володіння є вдосконалення технічного обслуговування й ремонту.

**Аналіз основних досягнень і літератури.** Тривала й надійна робота кар'єрних самоскидів можлива за умови систематичного і якісного проведення заходів технічного обслуговування, діагностування й ремонту.

Основним видом обслуговування є планово-попереджувальна система. Планові впливи проводяться у встановлений нормативами термін і мають диференційований обсяг у відповідності до структури ремонтного циклу, розробленої для певного виду машин. Перелік ремонтних робіт для кожного виду планового ремонту встановлюється за результатами оглядів машин під час технічного обслуговування. Однак, процеси розбирання, які здійснюються за регламентом, скорочують ресурс і міжремонтний період на третину. У зв'язку із цим виникає необхідність переходу на більш прогресивну систему обслуговування, яка вже впроваджується на підприємствах ряду галузей промисловості – обслуговування по фактичному стану, ідея якої полягає в мінімізації відмов шляхом застосування методів відстеження та розпізнавання технічного стану машини методами контролю її експлуатаційних характеристик.

Серед досліджень по вдосконаленню технічного обслуговування й ремонту кар'єрних самоскидів помітні моделювання процесів експлуатації. У публікації [1] математична модель функціонування самоскида побудована на наступних основних допущеннях: марківський процес функціонування, при якому стан машини у майбутньому залежить тільки від її стану в цей час і не залежить від того, як прийшла машина до цього стану; стаціонарність процесу, внаслідок якого він залежить від даного інтервалу часу та не залежить, з якого моменту часу визначається цей інтервал; ординарність потоку переходів подій з одного стану в інший, яка означає, що при досить невеликому інтервалі часу ймовірність настання двох або більше подій дуже мала, у порівнянні з ймовірністю влучення однієї події в даний інтервал.

Кар'єрні самоскиди вважаються такими, що перебувають в одному зі станів. Переходи машин з одних станів в інші утворюють потоки подій без післядії. Прийняті допущення істотно спрощують розрахунки, оскільки процеси, які відбуваються в гірничотранспортному цеху, можна розглядати як пуасонівські. Для простого потоку подій інтенсивності переходів є постійними, тоді як для нестационарного – функціями

© В. В. Потапенко, 2013

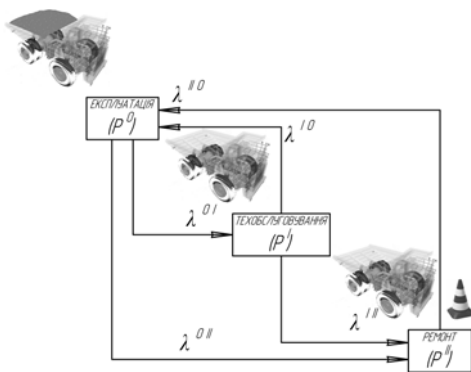
часу.

При створенні технічних систем виникає проблема розробки такої стратегії технічного обслуговування, яка дозволила б отримати від експлуатації системи максимально можливий ефект. Тому завдання профілактики ставляться, як завдання екстремальні і їх можна назвати оптимальними завданнями надійності [2].

Зниження рівня надійності машин у зв'язку з виробітком ресурсу, приводить до скорочення ремонтного циклу й подорожчання ремонтів. У зв'язку із цим оцінка фактичного технічного стану й підвищення ефективності експлуатації є актуальними науковими проблемами.

**Мета дослідження, постановка задачі.** Метою роботи є підвищення ефективності експлуатації кар'єрних самоскидів за рахунок використання результатів моделювання технологічних станів машин у системі технічного обслуговування й ремонту, що підвищить надійність їх роботи й зменшить витрати на володіння. Створення математичної моделі функціонування машини, її аналіз, визначення ймовірності знаходження в різних технологічних станах, інтенсивності переходів між ними дозволить розв'язати це завдання.

**Матеріали досліджень.** Моделювання технологічних процесів кар'єрних самоскидів є основою для оцінки ефективності використання техніки й прогнозування її стану. У роботі використовується математичний апарат, так званих марківських процесів з дискретними станами та безперервним часом [3]. При допущенні про миттєве виявлення відмови системи, негайному початку її обслуговування, відновлення можна спростити модель функціонування кар'єрних самоскидів і привести множину технологічних станів до трьох підмножин: експлуатації, техобслуговування й ремонту (рис. 1).



Відповідно до цього графа система диференціальних рівнянь для ймовірностей технологічних станів кар'єрних самоскидів має вигляд:

$$\frac{dP^0(t)}{dt} = -(\lambda^{0I} + \lambda^{0II}) \cdot P^0(t) + \lambda^{I0} \cdot P^I(t) + \lambda^{II0} \cdot P^{II}(t), \quad (1)$$

$$\frac{dP^I(t)}{dt} = -(\lambda^{I0} + \lambda^{II1}) \cdot P^I(t) + \lambda^{0I} \cdot P^0(t), \quad (2)$$

$$\frac{dP^{II}(t)}{dt} = -\lambda^{II0} \cdot P^{II}(t) + \lambda^{0II} \cdot P^0(t) + \lambda^{II1} \cdot P^I(t) \quad (3)$$

Рисунок 1 – Граф станів кар'єрного самоскида в експлуатації, техобслуговуванні й ремонті

де стан 1 – самоскид експлуатується з ймовірністю знаходження в стані  $P^0(t)$ ; стан 2 – самоскид обслуговується з ймовірністю  $P^I(t)$ ; стан 3 – самоскид ремонтується з ймовірністю  $P^{II}(t)$ ;  $\lambda^{0I}$ ,  $\lambda^{0II}$  – інтенсивності переходів кар'єрного самоскида від експлуатації до обслуговування та ремонту відповідно;  $\lambda^{II1}$  – інтенсивність переходу від технічного обслуговування до ремонту;  $\lambda^{I0}$ ,  $\lambda^{II0}$  – інтенсивності потоків відновлення після техобслуговування й ремонту відповідно.

Нормувальна та початкові умови загальної математичної моделі мають вигляд

$$P^0(t) + P^I(t) + P^{II}(t) = 1, \quad P^0(0) = 1, \quad P^I(0) = P^{II}(0) = 0 \quad (4)$$

Використовуючи таку модель можна визначити ймовірності станів кар'єрного самоскида, якщо в початковий момент часу він був справний.

Дискретні стани кар'єрного самоскида БелАЗ визначає «Положення про технічне обслуговування, діагностування й ремонт кар'єрних самоскидів БелАЗ» [4]. Вони утворюють структуру графа й відповідають його вершинам – робочим зонам (території кар'єру і т.п.), пунктам (місцям, зонам) технічного обслуговування, діагностування й ремонту. Дугами (ребрами) графа є дороги (шляхи) між технологічними станами. Множина технологічних станів кар'єрних самоскидів розділяється на три підмножини: експлуатація, технічне обслуговування й ремонт.

Для кар'єрних самоскидів по періодичності, переліку й трудомісткості виконуваних робіт установлені наступні види технічного обслуговування й ремонту: щоденне технічне обслуговування – ЩО; перше технічне обслуговування – ТО-1; друге технічне обслуговування – ТО-2; третє технічне обслуговування – ТО-3; сезонне технічне обслуговування – СО; регламентований плановий ремонт – ПР-1; регламентований плановий ремонт – ПР-2; позаплановий поточний ремонт – ПоР.

На рис. 2 представлена уточнена модель функціонування кар'єрних самоскидів, представлена у вигляді графа станів і переходів.

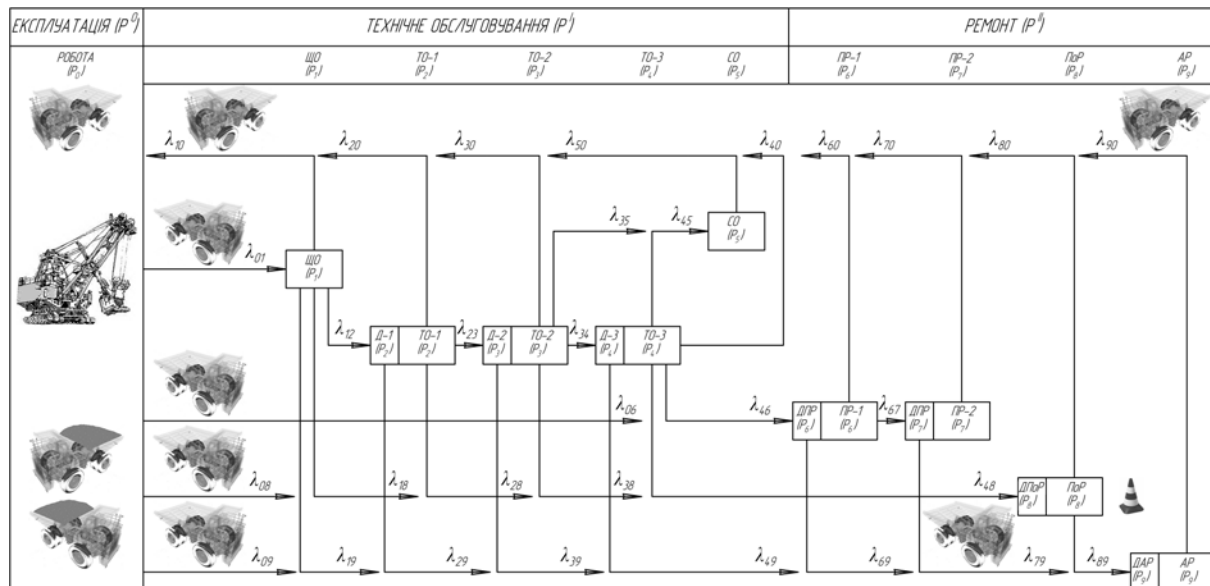


Рисунок 2 – Уточнений граф технологічних станів кар'єрних самоскидів БелАЗ

Запропонований уточнений граф передбачає десять технологічних станів. У порівнянні з роботою [1], структура доповнена відповідними до кожного виду техобслуговування й ремонту діагностиками, що не вплинуло на кількість вершин (однойменні діагностики й обслуговування сполучені). Доповнення вершин у порівнянні з базовою моделлю пов'язане із сезонним обслуговуванням, аварійним ремонтом та відповідною діагностикою. Уведення в модель процесу функціонування таких станів, як діагностика й сезонне обслуговування не вимагає аргументації й носить уточнюючий характер, тому що вони визначені діючим «Положенням». Включення ж аварійного ремонту й відповідної до нього діагностики в структуру графа станів і переходів вимагає обґрунтування.

Планово-попереджувальна система «Положення» визначає техобслуговування за планом, а ремонт – за планом або по необхідності, але не виключає виникнення раптових відмов, частково знижуючи ймовірність їх виникнення за рахунок поки недосконалої діагностики, тому технологічним станом «аварійна відмова» не можна зневажати, враховуючи його непередбачений по багатьом параметрам характер. Термін «аварійна відмова» давно застосовується в термінології експлуатації, техобслуговування й ремонту техніки, але у стандарти так і не увійшов. Очевидно, через його крайню небажаність і тяжкі наслідки. Замість слів «попереджувальні» і «відбудовні» роботи часто говорять про профілактичні і аварійні відновлення [5].

Діючий на Україні стандарт надійності містить схожі за змістом категорії – «критичний стан» та «критична відмова», визначаючи, що їх настання «може привести до травмування людей, значних матеріальних збитків або іншим неприйнятним наслідкам» [6].

Пропонується визначити аварійну відмову, як подію, що виявлена діагностикою чи раптово відбулася та може привести до травмування людей, значним матеріальним збиткам або іншим неприйнятним наслідкам. Критерієм аварійності є випадковий характер події та важкість її наслідків і ліквідації. Аварійним станом може вважатися також і такий, коли система ще не відмовила, але її елементи вже не підлягають відновленню. Опираючись на наведені доводи можна уводити у математичну модель технологічних станів термін «аварійний ремонт», як комплекс заходів для ліквідації наслідків аварійної відмови.

**Результати досліджень.** Дослідження показали, що кар'єрні самоскиди до третини календарного часу перебувають у технічному обслуговуванні й ремонті, а працезатрати на цю роботу досягають більше половини загальних трудових витрат на транспортування.

За математичною моделлю (рис. 2) складені диференціальні рівняння ймовірностей знаходження у кожному із десяти технологічних станів функціонування кар'єрних самоскидів, які поєднані в систему (5-14):

$$\begin{aligned} \text{робота} \quad \frac{dP_0(t)}{dt} = & -(\lambda_{01} + \lambda_{06} + \lambda_{08} + \lambda_{09}) \cdot P_0(t) + \lambda_{10} \cdot P_1(t) + \lambda_{20} \cdot P_2(t) + \lambda_{30} \cdot P_3(t) + \\ & + \lambda_{40} \cdot P_4(t) + \lambda_{50} \cdot P_5(t) + \lambda_{60} \cdot P_6(t) + \lambda_{70} \cdot P_7(t) + \lambda_{80} \cdot P_8(t) + \lambda_{90} \cdot P_9(t), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{щоденне обслуговування} \quad \frac{dP_1(t)}{dt} = -(\lambda_{10} + \lambda_{12} + \lambda_{18} + \lambda_{19}) \cdot P_1(t) + \lambda_{01} \cdot P_0(t), \quad (6)$$

$$\text{технічне обслуговування - 1} \quad \frac{dP_2(t)}{dt} = -(\lambda_{20} + \lambda_{23} + \lambda_{28} + \lambda_{29}) \cdot P_2(t) + \lambda_{12} \cdot P_1(t), \quad (7)$$

$$\text{технічне обслуговування - 2} \quad \frac{dP_3(t)}{dt} = -(\lambda_{30} + \lambda_{34} + \lambda_{35} + \lambda_{38} + \lambda_{39}) \cdot P_3(t) + \lambda_{23} \cdot P_2(t), \quad (8)$$

$$\text{технічне обслуговування - 3} \quad \frac{dP_4(t)}{dt} = -(\lambda_{40} + \lambda_{45} + \lambda_{46} + \lambda_{48} + \lambda_{49}) \cdot P_4(t) + \lambda_{34} \cdot P_3(t), \quad (9)$$

$$\text{сезонне обслуговування} \quad \frac{dP_5(t)}{dt} = -\lambda_{50} \cdot P_5(t) + \lambda_{35} \cdot P_3(t) + \lambda_{45} \cdot P_4(t), \quad (10)$$

$$\text{плановий ремонт - 1} \quad \frac{dP_6(t)}{dt} = -(\lambda_{60} + \lambda_{67} + \lambda_{69}) \cdot P_6(t) + \lambda_{06} \cdot P_0(t) + \lambda_{46} \cdot P_4(t), \quad (11)$$

$$\text{плановий ремонт - 2} \quad \frac{dP_7(t)}{dt} = -(\lambda_{70} + \lambda_{79}) \cdot P_7(t) + \lambda_{67} \cdot P_6(t), \quad (12)$$

$$\text{поточний ремонт} \quad \frac{dP_8(t)}{dt} = -(\lambda_{80} + \lambda_{89}) \cdot P_8(t) + \lambda_{08} \cdot P_0(t) + \lambda_{48} \cdot P_1(t) + \lambda_{28} \cdot P_2(t) + \lambda_{38} \cdot P_3(t) + \lambda_{48} \cdot P_4(t), \quad (13)$$

$$\text{аварійний ремонт} \quad \frac{dP_9(t)}{dt} = -\lambda_{90} \cdot P_9(t) + \lambda_{09} \cdot P_0(t) + \lambda_{49} \cdot P_1(t) + \lambda_{29} \cdot P_2(t) + \lambda_{39} \cdot P_3(t) + \lambda_{49} \cdot P_4(t) + \lambda_{69} \cdot P_6(t) + \lambda_{79} \cdot P_7(t) + \lambda_{89} \cdot P_8(t) \quad (14)$$

Нормувальна та початкові умови для системи рівнянь (5-14) мають вигляд

$$P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) + P_6(t) + P_7(t) + P_8(t) + P_9(t) = 1, \quad (15)$$

$$P_0(0) = 1, \quad P_1(0) = P_2(0) = P_3(0) = P_4(0) = P_5(0) = P_6(0) = P_7(0) = P_8(0) = P_9(0) = 0 \quad (16)$$

Імовірність знаходження кар'єрних самоскидів у підмножині техобслуговування (рис. 1) визначається через суму ймовірностей усіх видів обслуговування (рис. 2)

$$P^I(t) = P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) \quad (17)$$

Імовірність знаходження кар'єрних самоскидів у підмножині ремонту (рис. 1) визначається через суму ймовірностей усіх видів ремонту (рис. 2)

$$P^{II}(t) = P_6(t) + P_7(t) + P_8(t) + P_9(t) \quad (18)$$

Виконуючи сумісний аналіз загальної та уточненої математичної моделі визначимо класифікацію та властивості потоків подій, технологічних станів і переходів між ними. Функціонування кар'єрних самоскидів відбувається по трьох потоках: двох потоках виводу із експлуатації та одному потоку повернення. Виведення кар'єрного самоскида із експлуатації виконується сталим потоком планових перетворень та нестационарним випадковим потоком відмов. Повернення кар'єрного самоскида у експлуатацію відбувається в об'єднаному змішаному потоці відновлень, що утворюється після завершення усіх видів підтримання та відновлення працездатності у підмножинах технічного обслуговування та ремонту.

Загальна модель (рис. 1) також ілюструє два напрями виходу із експлуатації – у технічне обслуговування та ремонт. Потік перетворень планово переводить кар'єрний самоскид із підмножини експлуатації у підмножину технічного обслуговування з інтенсивністю зовнішнього переходу  $\lambda^{OI}$ . Ця подія відбувається найчастіше під час щоденного та щозмінного обслуговування (рис. 2) із інтенсивністю  $\lambda_{01}$ , тобто

$$\lambda^{OI} = \lambda_{01} \quad (19)$$

Потік перетворень доповнюється переводом кар'єрного самоскида із підмножини експлуатації у підмножину ремонту з інтенсивністю зовнішнього переходу  $\lambda_{06}$ , яка у поєднанні із інтенсивністю зовнішнього переходу від обслуговування  $\lambda_{46}$  утворює вхідний потік у підмножину ремонту до планових ремонтів із сумарною інтенсивністю  $\lambda_{06} + \lambda_{46}$ . Тобто потік планових перетворень спрямований від експлуатації до планових технічних обслуговувань та ремонтів

Інтенсивності планових переходів самоскидів між технологічними станами практично не залежать від часу  $\lambda_{ij}(t) = \lambda_{ij} \approx const$ , де  $i$  – індекс початку дуги графа,  $j$  – індекс кінця дуги графа. У відповідності до «Положення» [4] припустимі відхилення від нормативів періодичності технічного обслуговування ТО-1 і ТО-2 становлять  $\pm 10\%$ , для інших видів обслуговування й ремонтів –  $\pm 5\%$ .

Іншою причиною виводу кар'єрного самоскида із підмножини експлуатації у підмножину ремонту є раптові відмови, які утворюють потік відмов. Він складається із

зовнішніх та внутрішніх переходів із інтенсивністю, яка є функцією часу. Кінцевими вершинами таких переходів є два технологічні стани: поточний та аварійний ремонт. Безпосередніми є зовнішні переходи  $\lambda_{08}$  та  $\lambda_{09}$  від експлуатації до поточного та аварійного ремонтів відповідно.

Перехід від експлуатації до ремонту є комбінованим, оскільки він утворюється як із непланових переходів  $\lambda_{08}$ ,  $\lambda_{09}$  так і планового переходу перетворень  $\lambda_{06}$ . Випадкові переходи  $\lambda_{08}$  та  $\lambda_{09}$  мають інтенсивності, що залежать від часу  $\lambda_{ij}(t)$  і утворюють потік відмов, який є однорідним та нестационарним, оскільки складається із подій раптових відмов, які призводять до поточних або аварійних ремонтів.

Таким чином

$$\lambda^{0II} = \lambda_{06} + \lambda_{08} + \lambda_{09} \quad (20)$$

Окрему групу утворюють, так звані, внутрішні у межах підмножин переходи. Такі переходи є у підмножині технічного обслуговування:  $\lambda_{12}$ ,  $\lambda_{23}$ ,  $\lambda_{34}$ ,  $\lambda_{35}$ ,  $\lambda_{45}$ , для яких  $0 \leq i \leq 5$ ,  $0 \leq j \leq 5$  і всі вони планові та у підмножині ремонту:  $\lambda_{67}$ ,  $\lambda_{69}$ ,  $\lambda_{79}$ ,  $\lambda_{89}$ , з яких тільки  $\lambda_{67}$  є плановим.

Перехід від техобслуговування до ремонту також є комбінованим, оскільки він утворюється із планового переходу перетворень  $\lambda_{46}$  та великої групи непланових раптових випадкових переходів до поточного ремонту із  $j=8$  та до аварійного ремонту із  $j=9$ . Таким чином

$$\lambda^{III} = \lambda_{46} + \lambda_{18} + \lambda_{28} + \lambda_{38} + \lambda_{48} + \lambda_{19} + \lambda_{29} + \lambda_{39} + \lambda_{49} + \lambda_{69} + \lambda_{79} + \lambda_{89} \quad (21)$$

Після завершення усіх видів підтримання працездатності у підмножині технічного обслуговування формується однорідний плановий потік повернення у експлуатацію після техобслуговування з інтенсивністю

$$\lambda^{IO} = \lambda_{10} + \lambda_{20} + \lambda_{30} + \lambda_{40} + \lambda_{50} \quad (22)$$

Після завершення усіх видів відновлення працездатності у підмножині ремонту формується неоднорідний змішаний потік повернення у експлуатацію після ремонтів з інтенсивністю

$$\lambda^{IIO} = \lambda_{60} + \lambda_{70} + \lambda_{80} + \lambda_{90} \quad (23)$$

Ці потоки об'єднуються у змішаний повний потік відновлень із інтенсивністю

$$\lambda^{IO} + \lambda^{IIO} = \lambda_{10} + \lambda_{20} + \lambda_{30} + \lambda_{40} + \lambda_{50} + \lambda_{60} + \lambda_{70} + \lambda_{80} + \lambda_{90} \quad (24)$$

для яких  $j=0$ .

Таким чином математична модель функціонування кар'єрного самоскида містить 10 станів, об'єднаних у 3 підмножини, 31 перехід між ними, з яких 22 – переходи перетворень та відмов та 9 – переходи відновлень, 22 – зовнішніх та 9 – внутрішніх.

Розв'язок системи диференціальних рівнянь дозволить визначити ймовірності технологічних станів кар'єрних самоскидів, інтенсивності переходів між ними й раціонально коректувати діючу систему технічного обслуговування.

**Висновки.** Розроблена та проаналізована модель технічного обслуговування й ремонту кар'єрних самоскидів в умовах Криворізького залізничного басейну з можливістю адаптації для конкретного підприємства за критерієм мінімуму витрат на володіння. На основі створеної моделі планується виконати оцінку ймовірності станів, інтенсивності переходів, потоків перетворень, відмов, відновлень, визначити закони розподілу й параметри системи техобслуговування.

**Список літератури:** 1. *Монастирський Ю. А.* Моделювання функціонування кар'єрних автосамоскидів / Ю. А. Монастирський // *Качество минерального сырья: сб. научн. трудов.* – Кривой Рог, 2011. – С. 420-424. 2. *Барзилович Е. Ю., Каптанов В. А.* Организация обслуживания при ограниченной информации о надежности системы. М., «Сов. радио», 1975. – 136 с. с ил. 3. *Вентцель Е. С., Овчаров Л. А.* Теория случайных процессов и её инженерные приложения. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.– 1991. – 384 с. 4. «Положение о техническом обслуживании, диагностировании и ремонте карьерных самосвалов БелАЗ» г. Жодино, 2004. 5. *Байхельт Ф., Франкен П.* Надежность и техническое обслуживание. Математический подход: Пер. с нем. – М.: Радио и связь, 1988. – 392 с.: ил. 6. ДСТУ 2860–94 «Надежность техники. Термины и определения».

*Надійшла до редколегії 12.05.2013*

УДК 629.114:622.684

**Аналіз моделі технологічних станів кар'єрних самоскидів БелАЗ / В. В. Потапенко // Вісник НТУ «ХП».** Серія: Автомобіле- та тракторобудування, 2013. – № 29 (1002). – С. 126–132. – Бібліогр.: 6 назв.

Выполнен анализ математической модели функционирования карьерных самосвалов БелАЗ, технологических состояний и переходов между ними. Определено направление повышения эффективности эксплуатации карьерных самосвалов на основе анализа данной модели с возможностью адаптации для конкретного предприятия по критерию минимума затрат на владение.

**Ключевые слова:** карьерный самосвал, технологические состояния, математическая модель.

The analysis of the created mathematical model of BelAZ open pit trucks functioning is executed, classification and properties of streams of events, technological conditions and transitions between them are provided. The direction of increase of open pit trucks operation efficiency with possibility of adaptation for the concrete enterprise for criterion of a minimum of expenses for possession is defined.

**Keywords:** open pit trucks, streams of events, technological conditions, mathematical model.