

УДК 629.113

Ю.А. Монастирський¹, І.В. Бондар², Т.А. Климов¹¹ДВНЗ «Криворізький національний університет»,²Сервісний торгово-логістичний центр «БЕЛАЗ-УКРАЇНА»**РЕЗУЛЬТАТИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ ТРАНСМІСІЇ КАР'ЄРНИХ САМОСКІДІВ БЕЛАЗ-75131**

Представлені результати математичного моделювання функціонування електромеханічної трансмісії кар'єрних самоскидів на основі диференціальних рівнянь А.М. Колмогорова, які дозволили визначити ймовірність знаходження трансмісії у робоздатному стані при різних варіантах системи технічного обслуговування і ремонту.

Ключові слова: кар'єрний автосамоскид, електромеханічна трансмісія, математична модель, функціонування, обслуговування та ремонт.

Ю.А. Монастырский, И.В. Бондарь, Т.А. Климов**РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ БЕЛАЗ-75131**

Представлены результаты математического моделирования функционирования электромеханической трансмиссии карьерных самосвалов на основе дифференциальных уравнений А.М. Колмогорова, которые позволили определить вероятность нахождения трансмиссии в работоспособном состоянии при различных вариантах системы технического обслуживания и ремонта.

Ключевые слова: карьерный самосвал, электромеханическая трансмиссия, математическая модель, функционирования, обслуживание и ремонт.

Yu. Monastyrskiy, I. Bondar, T. Klimov**RESULTS OF MATHEMATICAL MODELING OF THE FUNCTIONING OF THE ELECTROMECHANICAL TRANSMISSION OF OPEN-PIT DUMP-TRUCKS BELAZ-75131**

The results of mathematical modeling of the functioning of electromechanical transmission of open-pit dump trucks are presented on the basis of differential equations A. N. Kolmogorov, which made it possible to determine the probability of finding the transmission in a working condition under various versions of the maintenance and repair system.

Keywords: open-pit dump truck, electromechanical transmission, mathematical model, operation, maintenance and repair.

Постановка проблеми. Кар'єрні автосамоскиди БЕЛАЗ-75131 вантажопідйомністю 130 т біль ніж на 90 % забезпечують транспортування гірничої маси в кар'єрах одного з найбільших в світі залізрудному родовищі, яке розташовано у місті Кривий Ріг, при цьому ними виконується транспортна робота на рівні 1,1 млрд. т·км. Кар'єрний автомобільний транспорт є основною складовою ланкою комбінованих транспортних схем кар'єрів в частині безпосередньо від вибою до магістрального залізничного або конвеєрного транспорту. Щозмінно, 365 днів в році, в кожен з 8 основних залізрудних кар'єрів виїжджає по 20-40 машин, середня відстань перевезень 2,5-3,0 км при ухилах до 10%. Кожний кар'єрний автосамоскид БЕЛАЗ-75131 забезпечує середньорічний обсяг перевезення до 1,2-1,5 млн.т. Від показників роботи автомобільного транспорту, особливо надійності роботи, залежить стабільність та техніко-економічні показники практично всього гірничо-видобувного комплексу гірничо-збагачувальних комбінатів, тому наукові дослідження направлені на підвищення надійності кар'єрних автосамоскидів є актуальними в галузі автомобільного транспорту гірничо-видобувних підприємств.

Результати досліджень. Однією з основних складових систем кар'єрних самоскидів вантажопідйомністю більше 100 т є електромеханічна трансмісія яка складається з тягового електроприводу та редуктора електро-мотор-колеса.

Питання експлуатації кар'єрних самоскидів в Україні на сьогодні практично не розглядаються [1, 2, 3]. Раніше вже була розроблена математична модель функціонування кар'єрних самоскидів з електромеханічною трансмісією, але зміна у 2013 році системи технічного обслуговування та ремонту (ТОіР) кар'єрних автосамоскидів БЕЛАЗ обумовили необхідність створення нової математичної моделі [2]. Досвід експлуатації кар'єрних самоскидів в умовах кар'єрів ПрАТ «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат», які є одними з найскладніших на залізрудних кар'єрах, з максимальними продовжними ухилами, мінімальними шириною проїжджої частини та радіусами поворотів, показує необхідність введення в рекомендовану

заводом-виготовлювачем системи ТОіР додаткового стану – планового ремонту, який проводиться через 10000 мото-год. Даний стан був присутній в раніш використовуваній системі ТОіР (до 2013 року), як плановий ремонт 1 (проводився через 5000 мото-год.) та плановий ремонт 2 (10000 мото-год.), але вони були виключені заводом виготовлювачем (рис.1). Математична модель функціонування електромеханічної трансмісії кар'єрного автосамоскида БЕЛАЗ-75131 для системи ТОіР без планового ремонту була розроблена авторам раніше [3].

Працездатний стан (P1)

Кар'єрний автосамоскид у відповідності з прийнятою заводом-виготовлювачем системою ТОіР може знаходитися в працездатному стані, в станах проведення технічних обслуговувань ЩО, ТО-1, ТО-2, ТО-3 та поточному ремонті. Окремо виділений стан очкування запасних частин для ремонту (ОЗЧ). Стан кар'єрного автосамоскиду в довільний проміжок часу характеризується однією функцією – інтенсивністю потоку подій, яка може бути виражена будь-якою ненегативною функцією часу. Якщо електромеханічна трансмісія кар'єрного самоскиду має N станів, то повною характеристикою його функціонування буде квадратна матриця інтенсивностей порядку $N \times N$, в цій матриці $\lambda_{i,j} \neq 0$. Матриця інтенсивностей дозволяє описати процес функціонування електромеханічної трансмісії кар'єрного самоскиду за допомогою диференціальних рівнянь А. М. Колмогорова у тому випадку, коли швидкість переходу з одного стану в інший достатньо велика. Для використовуваної системи ТОіР матриця 7×7 .

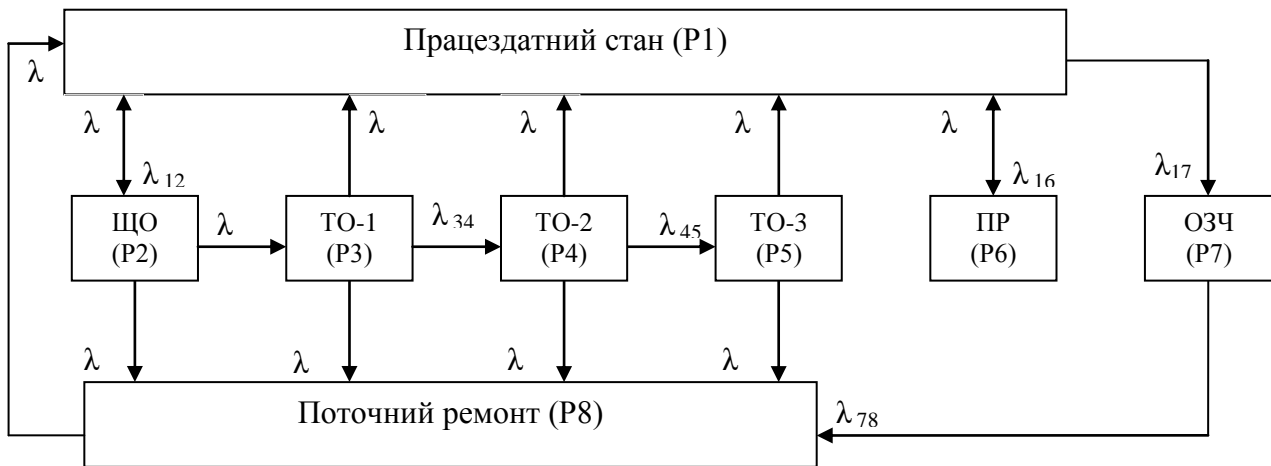


Рис. 1. Граф станів кар'єрного автосамоскиду при запропонованій системі ТОіР

Модель функціонування електромеханічної трансмісії кар'єрного самоскиду побудована на наступних основних припущеннях: марківський процес функціонування, за якого стан самоскиду в майбутньому залежить лише від його стану на сьогоднішній день і не залежить від того, як прийшла система в цей стан; стаціонарність процесу, внаслідок якого він залежить від даного інтервалу часу і не залежить, від якого моменту часу цей інтервал починає свій відлік; ординарність потоку переходів подій з i -го стану в j -й, яка означає, що за досить малого інтервалу часу, ймовірність настання двох або більше подій дуже мала в порівнянні з ймовірністю попадання однієї події в даний інтервал. В даному випадку кар'єрний самоскид має вісім станів, і повною характеристикою його функціонування буде квадратна матриця інтенсивностей порядку 8×8 , в цій матриці $\lambda_{i,j} \neq 0$, а система рівнянь має вид.

$$\begin{cases}
 \frac{dP_1(t)}{dt} = -(\lambda_{12} + \lambda_{16} + \lambda_{17}) \cdot P_1(t) + \lambda_{21} \cdot P_2(t) + \lambda_{31} \cdot P_3(t) + \lambda_{41} \cdot P_4(t) + \lambda_{51} \cdot P_5(t) + \lambda_{61} \cdot P_6(t) + \lambda_{81} \cdot P_8(t) \\
 \frac{dP_2(t)}{dt} = -(\lambda_{28} + \lambda_{23} + \lambda_{21}) \cdot P_2(t) + \lambda_{12} \cdot P_1(t) \\
 \frac{dP_3(t)}{dt} = -(\lambda_{31} + \lambda_{34} + \lambda_{38}) \cdot P_3(t) + \lambda_{23} \cdot P_2(t) \\
 \frac{dP_4(t)}{dt} = -(\lambda_{41} + \lambda_{45} + \lambda_{48}) \cdot P_4(t) + \lambda_{34} \cdot P_3(t) \\
 \frac{dP_5(t)}{dt} = -(\lambda_{51} + \lambda_{58}) \cdot P_5(t) + \lambda_{45} \cdot P_4(t) \\
 \frac{dP_6(t)}{dt} = -\lambda_{61} \cdot P_6(t) + \lambda_{16} \cdot P_1(t) \\
 \frac{dP_7(t)}{dt} = -\lambda_{78} \cdot P_7(t) + \lambda_{17} \cdot P_1(t) \\
 \frac{dP_8(t)}{dt} = -\lambda_{81} \cdot P_8(t) + \lambda_{28} \cdot P_2(t) + \lambda_{38} \cdot P_3(t) + \lambda_{48} \cdot P_4(t) + \lambda_{58} \cdot P_5(t) + \lambda_{78} \cdot P_7(t)
 \end{cases} \tag{1}$$

Використання системного аналізу [4] дозволяє розглядати трансмісію кар’єрного самоскиду як систему, що складається з п’яти елементів: тяговий генератор, шафи управління, електромотор, планетарний редуктор електро-мотор-колеса та система охолодження та вентиляції тягового електроприводу. Для кожного з них можна представити схожі графи станів та відповідні системи диференціальних рівнянь окремих елементів в яких є в наявності однакові переходи з однаковими величинами значень, що залежать від загального функціонування кар’єрного самоскиду. В той же час графи можуть відрізнятися за кількістю структурних елементів, що обумовлено нормативними вимогами щодо системи технічного обслуговування та ремонту (табл.).

Відповідно таблиці розроблені графи станів окремих елементів електромеханічної трансмісії кар’єрного самоскиду з урахуванням наявності чи відсутності окремих видів технічних обслуговувань і ремонту. Графи майже всіх елементів збігаються з графом станів кар’єрного автосамоскиду при запропонованій системі ТОіР (рис. 1), за винятком тягового генератора (рис. 2).

Таблиця

Виконання технічних обслуговувань і ремонту для агрегатів електромеханічної трансмісії

Вид технічних обслуговувань і ремонту	Тяговий генератор	Шафи управління	Тяговий двигун	Планетарний редуктор	Система охолодження та вентиляції тягового електроприводу
ЩО		+	+	+	+
ТО-1		+	+	+	+
ТО-2	+	+	+	+	+
ТО-3	+	+	+	+	+
Поточний ремонт	+	+	+	+	+

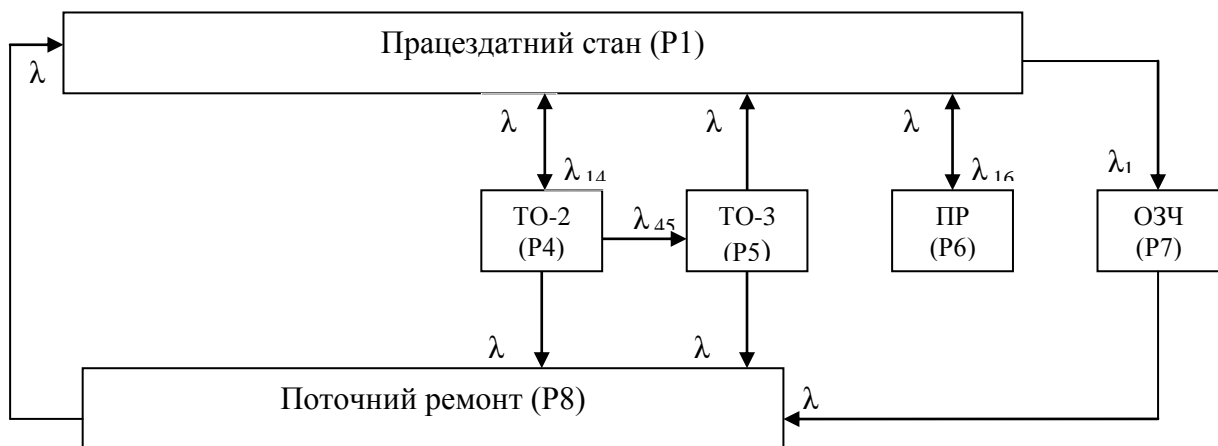


Рис. 2. Граф станів тягового генератора.

Відповідно графам, системи диференціальних рівнянь матриці інтенсивностей для шаф управління, тягового двигуна, планетарного редуктора електро-мотор-колеса та системи охолодження та вентиляції тягового електроприводу збігаються з системою самоскиду(1), а для тягового генератора система відрізняється наступним чином:

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -(\lambda_{16} + \lambda_{17}) \cdot P_1(t) + \lambda_{41} \cdot P_4(t) + \lambda_{51} \cdot P_5(t) + \lambda_{61} \cdot P_6(t) + \lambda_{81} \cdot P_8(t) \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = -(\lambda_{41} + \lambda_{45} + \lambda_{48}) \cdot P_4(t) \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = -(\lambda_{51} + \lambda_{58}) \cdot P_5(t) + \lambda_{45} \cdot P_4(t) \\ \frac{dP_6(t)}{dt} = -\lambda_{61} \cdot P_6(t) + \lambda_{16} \cdot P_1(t) \\ \frac{dP_7(t)}{dt} = -\lambda_{78} \cdot P_7(t) + \lambda_{17} \cdot P_1(t) \\ \frac{dP_8(t)}{dt} = -\lambda_{81} \cdot P_8(t) + \lambda_{48} \cdot P_4(t) + \lambda_{58} \cdot P_5(t) + \lambda_{78} \cdot P_7(t) \end{cases} \quad (2)$$

Із врахуванням того, що терміни проведення планових технічних обслуговувань передбачені нормативною документацією і для всіх складових виконуються одночасно, тому ймовірності переходів з працездатного стану в стани планових технічних обслуговувань однакові. Оскільки переходи з одного стану в інший для окремих агрегатів у відповідних ним графах не передбачені нормативами тому вони відсутні. Розроблені системи диференціальних рівнянь, що описують процес переходу з одного стану в інший п'яти елементів трансмісії: тягового генератора, шаф управління, електромотору, планетарного редуктора електро-мотор-колеса та системи охолодження та вентиляції тягового електроприводу. Після об'єднання п'яти систем диференціальних рівнянь окремих агрегатів в загальну систему для трансмісії в цілому, із врахуванням однакових переходів, отримана система 38 рівнянь з 38 невідомими.

Імітаційне моделювання функціонування кар'єрних самоскидів з електромеханічною трансмісією, як цілісної системи було раніше детально розглянуто [3], щодо моделювання функціонування систем кар'єрних самоскидів, то дані дослідження виконуються вперше. Для моделювання функціонування електромеханічної трансмісії кар'єрного самоскиду та її елементів при різних системах технічного обслуговування та ремонту створені робочі поля мережі та каналу обслуговування, відповідно графів стану спроектовані імітаційні моделі з використанням елементів палітри Enterprise Library засобу імітаційного моделювання Anylogic 6.4.1.

Середовище розробки імітаційної моделі електромеханічної трансмісії в Anylogic 6.4.1 включає в центральній частині схема імітаційної моделі електромеханічної трансмісії, зліва розміщено поле панелі проекту з групами, справа розташовані робочі інструменти моделювання, інформаційні повідомлення для відладки програми чи ті що використовуються при перерахуванні. В нижній частині розташовується поле управління вихідними параметрами результуючих графіків та діаграм, також в нижній частині можуть відображатися хід виконання експерименту та повідомлення про помилки при відладці програми. Під дослідною мережею розташовано кругову діаграму знаходження компонента в тому чи іншому стані в і-й проміжок часу (пробігу з початку експлуатації) та графік зміни ймовірності безвідмовної роботи від модельного часу (пробігу з початку експлуатації).

Попередньо в полі активного класу моделі розміщені графічні зображення, які являють собою графи станнів компонентів електромеханічної трансмісії. Після створення мережі налаштовані канали технічних дій та збору параметрів системи, визначені класи заявок та відпрацьована модель. Налаштування експерименту моделі: модельний час – мотогодини з початку експлуатації, час зупинки моделі – 80000 мото·год., що відповідає пробігу кар'єрного самоскиду до списання. В існуючій системі ТОіР через 20000 мото·год. проводиться заміна базових агрегатів з підвищенням рівня надійності системи у відношенні до попередньо досягнутого, таких дій протягом терміну експлуатації передбачено – 3. В запропонованій системі ТОіР кожні 10000 мото·год. проводиться плановий ремонт (ПР), який також забезпечує підвищення надійності роботи трансмісії.

Порівняння закономірностей зміни ймовірностей безвідмовної роботи електромеханічної трансмісії від пробігу з початку експлуатації при різних системах технічного обслуговування та

ремонту показує (рис. 3.9), що на початку експлуатації до перших 10000 мото-год. графіки повністю збігаються.

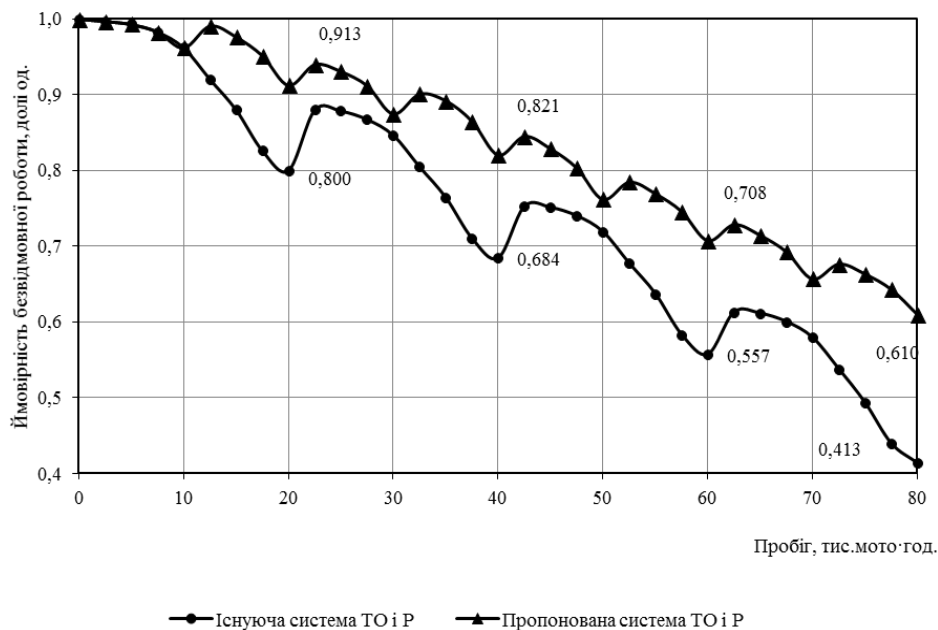


Рис. 3. Ймовірність безвідмовної роботи електромеханічної трансмісії.

Проведення планового ремонту підвищує надійність роботи, що відображається піками на графіку кожні 10000 мото-год. при значеннях пробігу наступних після проведення ПР. Слід відзначити, що в міжремонтний час характер графіків співпадає, а після проведення ремонту спостерігається характерне пікове підвищення значення ймовірностей безвідмовної роботи, що підтверджується фактичними статистичними показниками. Підвищення надійності роботи при базовій системі обслуговування та ремонту обумовлюється плановою заміною агрегатів, які відпрацювали нормативний термін у 20000 мото-год. Після проведення планового ремонту графік зміни ймовірності безвідмовної роботи при пропонованій системі переміщується вище графіку при існуючій системі обслуговування і ремонту, чим більший термін експлуатації тим більша розбіжність, яка в кінці терміну експлуатації досягає 0,197. При цьому на проміжних термінах різниця може досягати 40 % від абсолютного значення ймовірності безвідмовної роботи при існуючій системі ТОіР, а середнє значення підвищення надійності роботи трансмісії за весь термін експлуатації становить 0,092.

Висновки. Таким чином на основі розроблених математичних моделей функціонування електромеханічної трансмісії кар'єрних автосамоскидів БЕЛАЗ-75131 доведено, що впровадження планового ремонту, який проводиться кожні 10000 мото-год., дозволяє на 14,77 % підвищити час знаходження досліджуваного об'єкту в працездатному стані та додатково перевезти близько 200 тис. т.

1. Монастирський Ю. А. Дослідження надійності роботи агрегатів підвіски кар'єрних автосамоскидів / Ю. А. Монастирський, В. М. Денис // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг, 2010. – Вип. 26. – С. 132-134.

2. Монастирський Ю. А. Моделювання функціонування кар'єрних автосамоскидів / Ю. А. Монастирський // Качество минерального сырья: сб. научн. трудов. – Кривой Рог, 2011. – С. 420-424.

3. Монастирський Ю. А. Математичні моделі функціонування кар'єрних самоскидів БЕЛАЗ з електромеханічною трансмісією / Ю. А. Монастирський, І.В. Бондар, Т.А. Климів // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал. - Луцьк: Луцький НТУ, 2017. - №2(9). – С. 82–86.

4. Гайдес М. А. Общая теория систем (системы и системный анализ) / М. А. Гайдес. – Винница: Глобус-пресс, 2005. – 201 с.

Рецензент:

Таран І.О., доктор технічних наук, професор, ДВНЗ «Національний гірничий університет», завідувач кафедри управління на транспорті, Дніпро, Україна.