

Ю.С. Бочкарев, М.А. Викулов, А.М. Ишков, И.И. Седалищев
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ
АВТОСАМОСВАЛОВ БЕЛАЗ-7540 В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

Проведен анализ эксплуатации автосамосвалов марки БелАЗ-7540 серии А на россыпных месторождениях Севера. Описаны климатические условия месторождений Севера, выделены факторы, влияющие на работоспособность автосамосвалов. Выявлены системы автосамосвалов, лимитирующие работоспособность, а также влияние отрицательных температур на эти системы. Сделаны выводы о работоспособности, в частности изучено изменение параметра потока отказов по месяцам в течение года. Произведен математический анализ посредством приближения косинусоидой с обоснованием выбора метода, а именно приведен косинор-анализ числа отказов; оценена точность расчетов.

Ключевые слова: анализ, система, автосамосвал, климат, косинор-анализ, статистика, параметр потока отказов, математическая модель.

Согласно, климатическому районированию по ГОСТ 16350–80 [1] территория Крайнего Севера Якутии относится к районам с очень холодным климатом, что характеризуется температурным режимом с пиковыми значениями температуры до -60°C в зимний период и до $+35^{\circ}\text{C}$ в летний период с быстро нарастающими среднесуточными температурами весной и понижающимися осенью. Среднегодовая температура составляет -17°C , средняя температура холодного времени года -30°C , а теплого периода 15°C . Относительная влажность воздуха колеблется до 73–79% в холодное время года и до 45–50% в теплое время года.

В настоящее время в этих районах ведутся интенсивные горные работы по разработке месторождений полезных ископаемых, на которых эксплуатируются автосамосвалы грузоподъемностью от 27 до 36 т. Имеется небольшой ряд научных работ [2, 3, 4, 5, 6] затрагивающих вопросы качества эксплуатации карьерных автосамосвалов названной грузоподъемности, но в то же время не раскрыта в достаточной степени специфика эксплуатации карьерных автосамосвалов в условиях россыпных месторождений Севера.

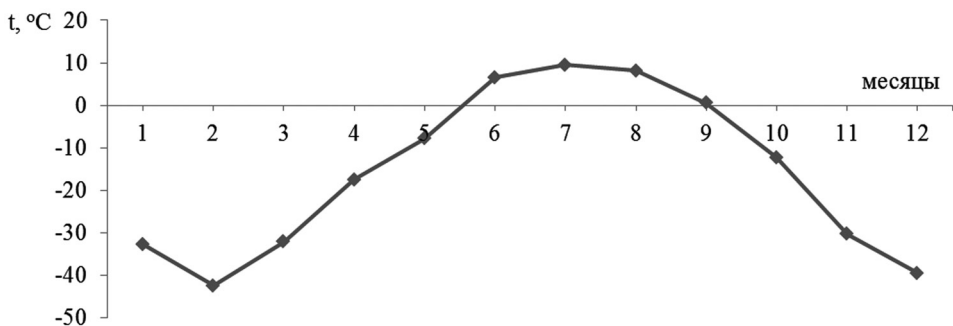


Рис. 1. Изменение среднесуточных температур

Таким образом, проведение исследований по оценке работоспособности карьерных автосамосвалов небольшой грузоподъемности с гидромеханической трансмиссией является актуальной задачей.

Нами была собрана статистическая информация по работоспособности автосамосвалов марки БелАЗ-7540 серии А в северном исполнении эксплуатируемым на участке «Маят» предприятия ОАО «Алмазы Анабара».

Участок «Маят» характеризуется следующими климатическими условиями (рис. 1). Из рис. 1 видно, что по продолжительности теплое время года составляет всего 4 месяца: июнь, июль, август и сентябрь, где самым теплым месяцем является июль, а оставшиеся месяцы составляют холодное время года, с крайне низкими температурами в феврале.

Информация по работоспособности автосамосвалов была собрана за три года эксплуатации по 10 автосамосвалам.

Эксплуатационная надежность и эффективность использования карьерного транспорта зависят от различных факторов, определяющих параметры работы машины, к которым можно отнести [3, 6]: климатические условия (температурный режим и влажность окружающего воздуха, скорость ветряного потока), производительность предприятия, расстояние транспортирования, рельеф, тип и качество покрытия дорожного полотна, тип погрузочной машины, тип груза и его характеристики, состояние ремонтной базы, скоростные режимы движения машины, тип и возраст машины.

Из анализа собранной статистической информации и сгруппированной по системам видно, что в целом большее число отказов приходится на период эксплуатации с отрицательными температурами окружающего воздуха (см. таблицу).

Отказы за период эксплуатации по системам автосамосвалов

Система	Отказы, ед.		
	общее число отказов	число отказов при отрицательных температурах	число отказов при положительных температурах
Подвеска	679	433	246
Силовая установка	622	436	186
Ведущий мост	380	191	189
Колеса и шины	373	213	160
Тормозные системы	342	183	159
Электрооборудование	325	211	114
Трансмиссия	253	161	92
Кабина, оперение, платформа	152	88	64
Передняя ось	84	42	42
Рулевое управление	74	30	44
Опрокидывающий механизм	35	18	17
Всего	3319	2006	1313

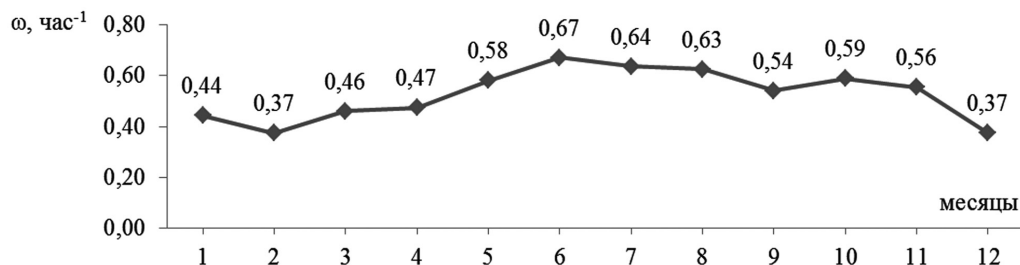


Рис. 2. Изменение параметра потока отказов в течение года

Результаты статистической обработки в целом свидетельствуют о том, что климатические условия, а именно отрицательные температуры оказывают негативное влияние на подвеску, силовую установку, ведущий мост, колеса и шины, трансмиссию, электрооборудование, тормозные системы, кабину, оперение, платформу.

Но в тоже время отсутствует прямое влияние отрицательных температур на переднюю ось, рулевое управление и опрокидывающий механизм.

Лимитирующими работоспособность автосамосвалов марки БелАЗ-7540 серии А являются, следующие системы: подвеска, силовая установка, ведущий мост, колеса и шины, тормозные системы, электрооборудование, трансмиссия.

Одним из показателей работоспособности автосамосвалов является параметр потока отказов (ω), который по ГОСТу 27.002-89 [7] определяется, как отношение математического ожидания числа отказов восстанавливаемого объекта за достаточно малую его наработку к значению этой наработки и определяется по формуле:

$$\omega = \frac{1}{T}$$

где T – средняя наработка на отказ.

На рис. 2 приведены результаты расчета параметра потока отказов по месяцам.

Из графика, приведенного на рис. 2 видно, что параметр потока отказов увеличивается к началу промывочного сезона, что говорит о наращивании объемов горных работ, а к концу года наблюдается некоторое снижение параметра потока отказов в связи с погашением объемов из-за окончания промывочного сезона. Такая картина характерна для россыпных месторождений, разрабатываемых на Севере.

Процессы, протекающие в узлах и механизмах, имеют циклический характер, вследствие того, что режим воздействия внешних факторов на них циклический. Прогнозируя изменение внешних факторов можно увеличить работоспособность систем.

Таким образом, автосамосвал можно представить как некоторую механическую систему, взаимодействующую с окружающей средой [3], что на наш взгляд сравнимо с физиологическими процессами, протекающими в живых организмах, для исследования которых широко применяется на международном уровне косинор-анализ.

Данный метод позволяет обнаружить скрытую периодичность, выявление которой дает возможность установить скрытую взаимосвязь количественных

показателей с внешними факторами, а так же составить прогноз этих показателей на будущие периоды.

Преимущество данного метода при анализе временных рядов состоит в том, что измерения могут быть равноотстоящими друг от друга, так и неравноотстоящими, т.е. наблюдения не обязательно должны быть постоянными.

Имеется лишь несколько работ, в которых применялся косинор-анализ для исследования хронограмм в области инженерии [6, 8].

Косинор-анализ метод обработки временных рядов наименьшими квадратами с приближением временного ряда косинусоидой. Входной информацией для косинор-анализа служит пучок хронограмм, а выходным результатом является амплитуда (A), акрофаза (φ) – момент времени, когда колебание достигает своего максимального значения. Полученные таким образом точки в Декартовых координатах рассматриваются как реализация двумерной случайной величины с предполагаемым нормальным законом распределения.

Для определения скрытой периодичности отказов автосамосвалов БелАЗ-7540 в зависимости от времени эксплуатации использована модель вида:

$$U(t) = A \cos(\omega_0 t - \varphi) + h + pt = x \cos(\omega_0 t) + y \sin(\omega_0 t) + h + pt, \quad (1)$$

где A – амплитуда, φ – акрофаза, h – среднее число отказов, p – коэффициент линейного характера нарастания числа отказов, которые необходимо оценить, ω_0 – угловая частота равная $2\frac{\pi}{T}$, где T – период времени эксплуатации, t – момент времени, $U(t)$ – число отказов.

Преобразовав формулу (1) получаем систему из четырех уравнений с четырьмя неизвестными – x , y , h , p :

$$\begin{cases} \frac{dl}{dx} = 2 \sum_{i=1}^m \left[x \cos(\omega_0 t_i)^2 + y \frac{\sin(2\omega_0 t_i)}{2} + h \cos(\omega_0 t_i) + pt_i \cos t_i - U_i \cos(\omega_0 t_i) \right] = 0, \\ \frac{dl}{dy} = 2 \sum_{i=1}^m \left[x \frac{\cos(2\omega_0 t_i)}{2} + y \sin(\omega_0 t_i)^2 + h \sin(\omega_0 t_i) + pt_i \sin(\omega_0 t_i) - U_i \sin(\omega_0 t_i) \right] = 0, \\ \frac{dl}{dh} = 2 \sum_{i=1}^m [x \cos(\omega_0 t_i) + y \sin(\omega_0 t_i) + h + pt_i - U_i] = 0, \\ \frac{dl}{dp} = 2 \sum_{i=1}^m [x t_i \cos(\omega_0 t_i) + y t_i \sin(\omega_0 t_i) + ht_i + pt_i^2 - U_i t_i] = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Таким образом, получаем уравнение 4-го порядка:

$$A \begin{bmatrix} x \\ y \\ h \\ p \end{bmatrix} = b, \quad (3)$$

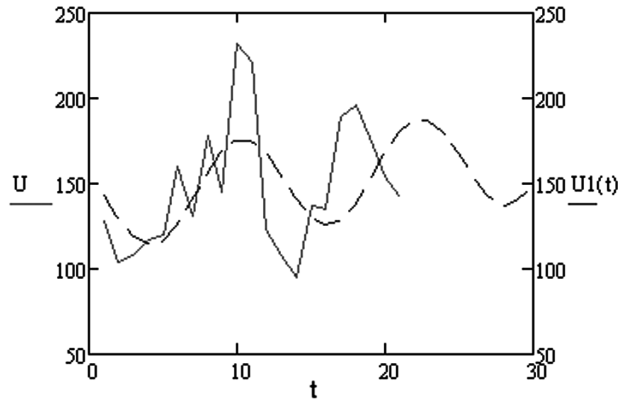


Рис. 3. Хронограмма отказов и косинусоида: U – фактические отказы, $U_1(t)$ – (косинусоида) прогнозируемые отказы, t – месяцы

где

$$A = \sum_{i=1}^m \begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t_i)^2 & \frac{\sin(2\omega_0 t_i)}{2} & \cos(\omega_0 t_i) & t_i \cos(\omega_0 t_i) \\ \frac{\cos(2\omega_0 t_i)}{2} & \sin(\omega_0 t_i)^2 & \sin(\omega_0 t_i) & t_i \sin(\omega_0 t_i) \\ \cos(\omega_0 t_i) & \sin(\omega_0 t_i) & 1 & t_i \\ t_i \cos(\omega_0 t_i) & t_i \sin(\omega_0 t_i) & t_i & t_i^2 \end{bmatrix};$$

$$b = \sum_{i=1}^m \begin{bmatrix} U_i \cos(\omega_0 t_i) \\ U_i \sin(\omega_0 t_i) \\ U_i \\ U_i t_i \end{bmatrix}$$

Решая полученную систему уравнения, получаем x , y , h , p . Потом находим амплитуду (A):

$$A = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (4)$$

Затем находим акрофазу (φ) из условия, что:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{y}{x}\right), \text{ если } x \geq 0,$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{y}{x}\right) + \pi, \text{ если } x < 0. \quad (5)$$

Далее находим доверительный интервал (δ) для A по формуле:

$$\delta = \frac{\sqrt{2\chi_p^2 \sum_{i=1}^m [U_i(t_i) - U_i]^2}}{m} \quad (6)$$

где χ_p^2 – квантиль χ -распределения, соответствующей вероятности P .

Применяется следующее правило: если $\delta < A$, то периодичность есть; если $\delta > A$, периодичности нет.

Расчеты, произведенные в программе Mathcad дали значения для $x = 6$, $y = 28$, $h = 138$, $p = 0,97$, $A = 28,46$, $\varphi = 5,4$, $\delta = 26,97$. Как видно $\delta < A$, что показывает наличие периодичности.

В итоге мы получаем математическую модель прогнозирования отказов автосамосвалов БелАЗ-7540:

$$U(t) = 28,46 \cdot \cos(0,52t - \varphi) + 138 + 0,97t, \quad (7)$$

По полученным данным строится косинусоида, описывающая изменение данных с течением времени (рис. 3).

Так как результаты прогноза основываются на информации о поведении объекта в прошлом, они всегда будут иметь некоторую ошибку.

Поэтому необходимо оценить точность прогноза. Для чего определим среднеабсолютную процентную ошибку (mean absolute percentage error), которая представляет собой среднее абсолютных ошибок прогноза, выраженная в процентах относительно фактических, и определяется по следующей формуле:

$$MAPE = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} \left(\frac{U_i - U(t_i)}{U(t_i)} \right) 100 \quad (8)$$

где U_i – фактические значения отказов, $U(t_i)$ – прогнозные значения отказов, m – число измерений.

Расчет показывает среднеабсолютную процентную ошибку в 3,28%, что меньше 10% и означает, что прогноз имеет высокую точность.

Таким образом, с помощью косинор-анализа нам удалось выявить скрытую периодичность возникновения отказов, что указывает на предсказуемость их возникновения, а также построить математическую модель числа отказов в зависимости от времени эксплуатации техники. Помимо прогнозирования отказов, метод позволяет оценить статистическую точность прогноза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 16350-80. Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. Переиздание. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. – 92 с.
2. Парунакян В.Э., Артамонова Ю.В. Оценка влияния основных технико-эксплуатационных показателей на срок службы большегрузных автосамосвалов БелАЗ-7540 // *Вестник Приазовского государственного технического университета*. – 2007. – № 17. – С. 189–192.
3. Кузнецов С.Р. Обоснование рациональной скорости движения карьерных автосамосвалов в режиме топливной экономичности на основе оптимизации тягово-скоростных характеристик двигателя, дисс. канд. техн. наук. – СПб., 2014. – 133 с.
4. Мариев П.Л., Кулешов А.А., Егоров А.Н., Зырянов И.В. Карьерный автотранспорт стран СНГ в XXI веке. – СПб.: Наука, 2006. – 387 с.
5. Чебан А.Ю., Секисов Г.В., Хрунина Н.П. Структурный анализ технических средств, действовавших при добыче строительных горных пород на юге Дальневосточного региона // *Горная промышленность*. – 2013. – № 44. – С. 26–29.
6. Ишков А.М., Кузьминов М.А., Зудов Г.Ю. Теория и практика надежности техники в условиях Севера – Якутск: ЯФ «Изд-во СО РАН», 2004. – 313 с.
7. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 37 с.
8. Емельянов И.П. Математическая модель имитации научного эксперимента по анализу хронограмм / *Методы прикладной математики в геологии и геофизике: Сборник научных трудов*. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1980. – С. 9–28. **ГИАБ**

Бочкарев Ю.С. – аспирант, старший преподаватель,
e-mail: ys.bochkarev@s-vfu.ru,
Викулов М.А. – профессор, зав. кафедрой,
e-mail: gormashygu@mail.ru,
Ишков А.М. – профессор, e-mail: gormashygu@mail.ru,
Седалищев И.И. – соискатель, e-mail: gormashygu@mail.ru,
Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова.

UDC 629.1.02

RESEARCH OF THE EXPLOITATION OF DUMP TRUCKS BELAZ-7540 IN CONDITIONS OF THE NORTH

Bochkaryov Y.S.¹, Graduate Student, Senior Lecturer, e-mail: ys.bochkarev@s-vfu.ru,
Vikulov M.A.¹, Professor, Head of Chair, e-mail: gormashygu@mail.ru,
Ishkov A.M.¹, Professor, e-mail: gormashygu@mail.ru,
Sedalishhev I.I.¹, Applicant, e-mail: gormashygu@mail.ru,
M.K. Ammosov North-East Federal University, 678015, Yakutsk, Russia.

Operation of BelAZ-7540A dump trucks in placer mining on the North is analyzed. The author describes climatic conditions of the North and reveals factors that influence operability of the dump trucks. The dump truck units that limit operability are identified, and the influence of negative temperature on these units is shown. The operability analysis is summarized; in particular, failure flow change per months of the year is examined. The mathematical analysis uses cosine approximation with validation of method decision, namely, the cosinor-analysis of number of failures is performed, and the accuracy of the calculation is estimated.

Key words: analysis, system, dump truck, climate, cosinor-analisys, statistic, parameter failure rate, mathematical model.

REFERENCES

1. *Klimat SSSR. Raionirovanie i statisticheskie parametry klimaticheskikh faktorov dlya tekhnicheskikh tselei. GOST 16350-80* (Climate in USSR. Zoning and statistic parameters of climatic factors for engineering purposes. State Standart 16350-80), Moscow, IPK Izd-vo standartov, 2002, 92 p.
2. Parunakyan V.E., Artamonova Yu.V. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2007, no 17, pp. 189–192.
3. Kuznetsov S.R. *Obosnovanie ratsional'noi skorosti dvizheniya kar'ernykh avtosamosvalov v rezhime toplivnoi ekonomichnosti na osnove optimizatsii tyagovo-skorostnykh kharakteristik dvigatelya* (Validation of rational speed of open pit mine dump trucks in the mode of fuel efficiency based on optimized pulling and speed characteristics of motor), Candidate's thesis, Saint-Petersburg, 2014, 133 p.
4. Mariev P.L., Kuleshov A.A., Egorov A.N., Zyryanov I.V. *Kar'ernyi avtotransport stran SNG v XXI veke* (21st century open pit mine motor transport in CIS), Saint-Petersburg, Nauka, 2006, 387 p.
5. Cheban A.Yu., Sekisov G.V., Khrunina N.P. *Gornaya promyshlennost'*. 2013, no 44, pp. 26–29.
6. Ishkov A.M., Kuz'minov M.A., Zudov G.Yu. *Teoriya i praktika nadezhnosti tekhniki v usloviyakh Severa* (Theory and practice of equipment reliability in the conditions of the North), Yakutsk, YaF «Izd-vo SO RAN», 2004, 313 p.
7. *Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya. GOST 27.002-89* (Reliability in engineering. Terms and definitions. State Standart 27.002-89), Moscow, Izd-vo standartov, 1990, 37 p.
8. Emel'yanov I.P. *Metody prikladnoi matematiki v geologii i geofizike. Sbornik nauchnykh trudov* (Methods of applied mathematics in geology and geophysics. Collection of papers), Yakutsk, YaF SO AN SSSR, 1980, pp. 9–28.

