

УДК 622.647.21 © В.В. Дмитриева¹, Д.В. Дзюин¹, Ф.В. Цой²,
Ю. Назаров², 2024

UDC 622.647.21 © V.V. Dmitrieva¹, D.V. Dzyuin¹, F.V. Tsoj²,
Yu. Nazarov², 2024

¹ РГУ Нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 119991, г. Москва, Россия

² Горный институт НИТУ «МИСИС», 119049, г. Москва, Россия

✉ e-mail: dm-valeriya@yandex.ru

¹ Gubkin Russian State University of Oil and Gas,
Moscow, 119991, Russian Federation

² National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS),
Moscow, 119049, Russian Federation

✉ e-mail: dm-valeriya@yandex.ru

Надежность става ленточного конвейера при поочередном восстановлении вышедших из строя роlikоопор

Reliability of a belt conveyor flight with successive repair of failed idlers

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-6-92-95>

ДМИТРИЕВА В.В.

Доцент кафедры Теоретической электротехники
и электрификации нефтяной
и газовой промышленности

РГУ Нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина,
119991, г. Москва, Россия,

e-mail: dm-valeriya@yandex.ru

ДЗЮИН Д.В.

Аспирант кафедры Теоретической электротехники
и электрификации нефтяной
и газовой промышленности

РГУ Нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина,
119991, г. Москва, Россия,

e-mail: dziuin@mail.ru

ЦОЙ Ф.В.

Магистр кафедры Горного оборудования
транспорта и машиностроения Горного
института НИТУ МИСИС,

119049, г. Москва, Россия,
e-mail: Feliks.tsoy.83@mail.ru

НАЗАРОВ Ю.

Магистр кафедры Горного оборудования
транспорта и машиностроения Горного
института НИТУ МИСИС,

119049, г. Москва, Россия,
e-mail: nazarov.dzhon.96@mail.ru

При эксплуатации технологического оборудования возникает задача анализа надежности. Большой интерес представляет получение оценок надежности и безотказной работы ленточного конвейера, которые напрямую связаны с надежностью роlikоопор. Они являются элементами восстанавливаемыми. В статье рассмотрена схема поочередного восстановления вышедших из строя роlikоопор. Математический аппарат, выбранный для исследования, – уравнения Колмогорова. В статье получены следующие характеристики системы из n независимо работающих роlikоопор: вероятности исправной работы любого числа k роlikоопор; математическое ожидание числа исправно работающих роlikоопор; вероятности отказа не более чем i роlikоопор. Эти вероятности могут быть использованы для оценки необходимого количества запасных роlikоопор и планирования работ по техническому обслуживанию конвейера.

Ключевые слова: ленточный конвейер, роlikоопора, вероятность восстановления, среднее время восстановления, схема с поочередным восстановлением элементов, схема с одновременным восстановлением элементов, интенсивность отказов, безотказная работа, математическое ожидание числа работающих роlikоопор.

Для цитирования: Надежность става ленточного конвейера при поочередном восстановлении вышедших из строя роlikоопор / В.В. Дмитриева, Д.В. Дзюин, Ф.В. Цой и др. // Уголь. 2024;(6):92-95. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-4-92-95.

Abstract

Operation of technological equipment poses the task of its reliability analysis. A great interest lies in obtaining estimates of reliability and

failure-free operation of belt conveyors, which are directly related to the reliability of idlers. These idlers are repairable elements. The article discusses an approach with successive repair of failed idlers. The Kolmogorov equations were chosen as the mathematical tool for the study. The following characteristics of the system of n independently working idlers are obtained and presented in the article: the probability of serviceable operation of any k -number of idlers; the mathematical expectation of the number of properly operating idlers; the probability of failure of not more than i -number of idlers. These probabilities can be used for estimation of necessary quantity of spare roller bearings and planning of works on maintenance of the conveyor.

Keywords

Belt conveyor, idler, probability of repair, average time of repair, approach with successive repair of elements, approach with simultaneous repair of elements, failure rate, failure-free operation, mathematical expectation of the number of properly operating idlers.

For citation

Dmitrieva V.V., Dzyuin D.V., Tsoj F.V., Nazarov Yu. Reliability of a belt conveyor flight with successive repair of failed idlers. *Ugol'*. 2024;(6):92-95. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-6-92-95.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие горнодобывающей отрасли [1] напрямую связано с совершенствованием горной техники [2, 3, 4, 5] и с повышением ресурса их основных узлов [6, 7]. Высокая эффективность горного производства связана с работой транспортных поточных систем [8, 9, 10].

Надежность работы конвейера и долговечность элементов его конструкции определяют его рентабельность и эффективность работы [11]. Анализ надежности оборудования является актуальной и востребованной на практике задачей для современных исследователей [12, 13].

Конвейер является восстанавливаемой и ремонтируемой машиной [14]. Вероятность восстановления в заданное время и среднее время восстановления являются одними из показателей надежности. В настоящее время расчет показателей надежности можно проводить аналитически или с использованием новых средств САПР или методов имитационного моделирования [15].

Как показано в работах [16, 17, 18, 19], надежность става конвейера определяется надежностью роликкоопор. С точки зрения надежности конвейерные роликкоопоры соединены последовательно. Допустим, что существует возможность заменять вышедшие из строя роликкоопоры, не останавливая конвейер. Для определения необходимого количества запасных роликкоопор, для планирования ремонтных работ необходимо знать вероятность выхода из строя некоторого их количества за определенный промежуток времени, в течение которого их не удастся восстановить. Целью работы является исследование динамики числа работающих роликкоопор в случае, когда вышедшие из строя могут быть отремонтированы или заменены в процессе работы конвейера.

СХЕМА С ПООЧЕРЕДНЫМ ВОССТАНОВЛЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

Пусть у нас имеются n роликкоопор. Вероятности безотказной работы каждой из них в течение времени t обозначаются через $p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)$. Вероятность того, что за время t произошел отказ i -го элемента, есть $q_i(t) = 1 - p_i(t)$. Вероятность безотказной работы ленточного конвейера (надежность системы) обозначим через $P(t)$.

Рассмотрим модель, в рамках которой вышедшие из строя роликкоопоры могут быть восстановлены и вновь пущены в работу. В этом случае поведение системы описывается системой уравнений Колмогорова. Пусть для системы с k работающими элементами (состояние k) интенсивность переходов в состояние $k-1$, то есть интенсивность отказов, равна μ_k , а интенсивность переходов в состояние $k+1$, то есть интенсивность восстановления, есть λ_k . Тогда уравнения Колмогорова принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp_0(t)}{dt} &= -\lambda_0 p_0(t) + \mu_1 p_1(t) \\ &\dots \\ \frac{dp_k(t)}{dt} &= \lambda_{k-1} p_{k-1}(t) - \mu_k p_k(t) - \lambda_k p_k(t) + \mu_{k+1} p_{k+1}(t) \\ &\dots \\ \frac{dp_n(t)}{dt} &= \lambda_{n-1} p_{n-1}(t) - \mu_n p_n(t) \end{aligned} \right\} (1)$$

Нас будет интересовать устоявшееся состояние системы, в котором все вероятности постоянны, и их производные равны нулю. Тогда получаем цепочку соотношений:

$$\mu_k p_k(t) = \lambda_{k-1} p_{k-1}(t), \tag{2}$$

где p_i – предельные значения вероятностей $p_i(t)$ при $t \rightarrow \infty$. Теперь можно последовательно выразить p_i :

$$p_{n-1} = \frac{\mu_n}{\lambda_{n-1}} p_n; \quad p_{n-2} = \frac{\mu_n \mu_{n-1}}{\lambda_{n-1} \lambda_{n-2}} p_n; \quad p_k = \frac{\mu_n \dots \mu_{k+1}}{\lambda_{n-1} \dots \lambda_k} p_n. \tag{3}$$

Вводя для $k = 0, 1, \dots, n-1$ обозначение $\theta_k = \frac{\mu_n \dots \mu_{k+1}}{\lambda_{n-1} \dots \lambda_k}$, $p_k = \theta_k p_n$; $\theta_n \equiv 1$ и учитывая требование $\sum_{i=0}^n p_i = 1$, получаем выражение для искомым вероятностей:

$$p_k = \frac{\theta_k}{\sum_{i=0}^n \theta_i}. \tag{4}$$

Эти выражения позволяют получить различные характеристики исследуемой системы. Например, математическое ожидание числа работающих элементов есть:

$$M(k) = \sum_{i=0}^n i p_i = \frac{\sum_{i=0}^n i \theta_i}{\sum_{i=0}^n \theta_i}. \tag{5}$$

Рассмотрим подробнее частный случай $\lambda_1 = \dots = \lambda_n = \lambda$, $\mu_1 = \dots = \mu_n = \mu$. Это предположение представляется реалистичным: при большом количестве элементов системы отказ нескольких из них слабо влияет на интенсивность дальнейших отказов; также можно допустить, что интенсивности восстановления отказавших элементов одинаковы. Естественно также принять, что $\lambda > \mu$: характерное

время восстановления элемента, конечно, много меньше срока его службы.

В этом случае $\theta_{n-1} = \frac{\mu}{\lambda}$; $\theta_{n-1} = \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^2$; ... ; $\theta_1 = \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^{n-1}$. За-

меним приближенно $\sum_{i=0}^n \theta_i$ суммой бесконечно убывающей геометрической прогрессии:

$$\sum_{i=0}^n \theta_i = 1 + \frac{\mu}{\lambda} + \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^2 + \dots = \frac{1}{1 - \frac{\mu}{\lambda}} = \frac{\lambda}{\lambda - \mu} \quad (6)$$

Тогда для вероятностей пребывания системы в том или ином состоянии находим:

$$p_n = \frac{\lambda}{\lambda - \mu}; p_{n-1} = \frac{\lambda - \mu}{\lambda} \cdot \frac{\mu}{\lambda}; p_1 = \frac{\lambda - \mu}{\lambda} \cdot \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^{n-1}. \quad (7)$$

Преобразуем теперь в (5) числитель:

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^n i \theta_i &= n + (n-1) \cdot \frac{\mu}{\lambda} + (n-2) \cdot \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^2 + \dots + 1 \cdot \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^{n-1} = \\ &= n \left(1 + \frac{\mu}{\lambda} + \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^2 + \dots\right) - \left(0 + 1 \cdot \frac{\mu}{\lambda} + 2 \cdot \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^2 + \dots\right) \approx \\ &\approx n \sum_{i=0}^{\infty} \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^i - \sum_{i=0}^{\infty} i \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^i. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь первая сумма – уже упоминавшаяся сумма бесконечно убывающей геометрической прогрессии, вторая

также хорошо известна: $\sum_{i=0}^{\infty} ix^i = \frac{x}{(1-x)^2}$, поэтому:

$$\sum_{i=0}^n i \theta_i = n \frac{\lambda}{\lambda - \mu} - \frac{\mu/\lambda}{(1 - \mu/\lambda)^2} = \frac{\lambda}{\lambda - \mu} \left(n - \frac{\mu}{\lambda - \mu} \right) \quad (9)$$

$$M(k) = n - \frac{\mu}{\lambda - \mu}. \quad (10)$$

В случае $\lambda \gg \mu$ (восстановление элементов намного быстрее их выхода из строя) $M(k)$ отличается от n менее чем на единицу, включены практически все элементы, система работает очень надежно. Если же λ и μ сравнимы, $M(k)$ может быть на несколько единиц меньше n .

ПРИМЕР ПРАКТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА С ВОССТАНАВЛИВАЕМЫМИ РОЛИКООПОРАМИ

При поочередном восстановлении роликкоопор можно рассмотреть два случая. Для иллюстрации случая сравнимых интенсивностей отказа μ и восстановления λ примем $\lambda = 2\mu$. Тогда $\sum_{i=0}^n \theta_i \approx 2$ и вероятность пребывания системы на верхнем уровне (все роликкоопоры находятся в ра-

бочем состоянии) $p_n = \frac{1}{2}$. Вероятность работы конвейера

с одной сломанной роликкоопорой $p_{n-1} = \frac{1}{4}$, вероятность

работы с двумя сломанными роликкоопорами $p_{n-2} = \frac{1}{8}$ и

т.д. Тогда вероятность выхода их строя не более чем i элементов есть:

$$P(n - k \leq i) = 1 - \frac{1}{2^{i+1}}. \quad (11)$$

Например, вероятность отказа не более девяти роликкоопор $P(n - k \leq 9) = 1 - \frac{1}{1024}$, а математическое ожида-

ние количества исправных роликкоопор, согласно (10), в этом случае равно $M(k) = n - 1$.

Пусть теперь $\lambda \gg \mu$. Примем для иллюстрации $\lambda = 10\mu$. Тогда $p_n = 0,9$, $p_{n-1} = 0,09$, $p_{n-2} = 0,009$. Вероятность отказа не более двух роликкоопор $P(n - k \leq 2) = 0,999$; вероятность отказа не более трех – $P(n - k \leq 3) = 0,9999$ и т.д. Математиче-

ское ожидание числа исправных элементов $M(k) = n - \frac{1}{9}$.

Очевидно, что в случае, когда интенсивность отказов много меньше интенсивности восстановления элементов, то система работает с высокой надежностью, и в работу включены почти все элементы.

Решение подобных задач можно использовать для мониторинга и планирования ремонтных работ.

ВЫВОДЫ

В статье получены следующие характеристики системы из n независимо работающих роликкоопор: вероятности исправной работы любого числа k роликкоопор; математическое ожидание числа исправно работающих роликкоопор; вероятности отказа не более чем i роликкоопор. Эти вероятности могут быть использованы для оценки необходимого количества запасных роликкоопор и планирования работ по техническому обслуживанию конвейера. В случае поочередного восстановления роликкоопор высокая надежность работы конвейера обеспечивается, если интенсивность восстановления элементов во много раз превышает интенсивность их отказов. В случае же одновременного восстановления элементов высокий уровень надежности и безотказная работа почти всех роликкоопор достигается даже при сравнимых интенсивностях отказов и восстановления элементов.

Список литературы • References

1. Формализация процесса выбора технологий отработки месторождений полезных ископаемых / П.А. Каунг, В.В. Зотов, М.А. Гаджиев и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 2. С. 124-138. DOI: 10.25018/0236-1493-2022-2-0-124.
Kaung P.A., Zotov V.V., Gadzhiev M.A., Artemov S.I., Gireev I.A. Formalization of selection procedure of mineral mining technologies. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(2):124-138. (In Russ). DOI: 10.25018/0236-1493-2022-2-0-124.
2. Gubanov S., Petsyk S., Komissarov A. Simulation of stresses and contact surfaces of disk rolling cutters with the rock when sinking in mixed soils. *E3S Web of Conferences*. 2020;177(03008):1-5. DOI: 10.1051/e3sconf/202017703008.
3. Перекутнев В.Е. Зотов В.В. Моделирование приводных шкивов подъемных установок с резинокросовыми канатами //

- Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 6. С. 105-114. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-6-0-105-114.
- Perekutnev V.E., Zotov V.V. Modeling drive wheels of hoisting machines with rubber cables. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(6):105-114. (In Russ). DOI: 10.25018/02361493-2020-6-0-105-114.
4. Клементьева И.Н., Кузиев Д.А. Современное состояние и перспективы развития конструкций карьерных комбайнов для безвзрывной послойной выемки прочных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 2. С. 123-128. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-123-128.
Klement'eva, I.N., Kuziev, D.A. Actual status and prospects for future development of surface miners, designed for blastless lit-by-lit excavation of solid rock. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(2):123-128. (In Russ). DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-123-128.
 5. Mnatsakanyan V.U., Surina N.V., Belyankina O.V., Sizova E.I. Assembly accuracy of power cylinders for powered roof supports in longwalls. *Eurasian Mining.* 2023;(1):50-54. DOI: 10.17580/em.2023.01.11.
 6. Sevagin S.V., Mnatsakanyan V.U. Ensuring the required manufacturing quality of hydraulic-cylinder rods in mining machines. 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 709 044095. DOI: 10.1088/1757-899X/709/4/044095.
 7. Соловьев С.В., Кузиев Д.А. Исследование жесткостных параметров привода тягового механизма драглайна ЭШ-10/70 // Уголь. 2017. № 1. С. 37-38. URL: <http://www.ugolinfo.ru/Free/012017pdf> (дата обращения: 15.05.2024).
Soloviev S.V., Kuziev D.A. Dragline ESh-10/70 linkage stiffness parameters study. *Ugol.* 2017;(1): 37-38. Available at: <http://www.ugolinfo.ru/Free/012017pdf> (accessed 15.01.2023). (In Russ.).
 8. Galkin V.I., Sheshko E.E., Dyachenko V.P., Sazankova E.S. The main directions of increasing the operational efficiency of high productive belt conveyors in the mining industry. *Eurasian Mining.* 2021;36(2):64-68. DOI: 10.17580/em.2021.02.14.
 9. Malakhov V.A., Tropako A.V., Dyachenko V.P. Rolling resistance coefficient of belt conveyor rollers as function of operating conditions in mines. *Eurasian Mining.* 2021;(2):64-68. DOI: 10.17580/em.2022.01.14.
 10. Adigamov A., Zotov V., Kovalev R., Kopylov A. Calculation of transportation of the stowing composite based on the waste of water-soluble ores. *Transportation Research Procedia*, St. Petersburg, 02-04 June 2021. St. Petersburg, 2021, pp. 17-23. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.09.020.
 11. Антонов А.В., Лукьянов И.И. Влияние надежности оборудования на технико-экономические показатели угледобывающих предприятий // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. 2015. № 12-1. С. 130-132.
Antonov A.V., Lukyanov I.I. The influence of equipment reliability on the technical and economic indicators of coal mining enterprises. *Fundamental and applied research in the modern world.* 2015; (12-1):130-132. (In Russ.).
 12. Li M., Yingqian S., Luo C. Reliability Analysis of Belt Conveyor Based on Fault Data. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 692, 012009. DOI: 10.1088/1757-899X/692/1/012009.
 13. Liu X., He D., Lodewijks G., Pang Y., Mei J. Integrated decision making for predictive maintenance of belt conveyor systems. *Reliability Engineering & System Safety.* 2019;(188):347-351. DOI: 10.1016/j.res.2019.03.047.
 14. Шахмейстер Л.Г., Дмитриев В.Г. Вероятностные методы расчета транспортирующих машин. М.: Машиностроение, 1983. С. 256.
 15. Галкин В.И., Доблер М.О., Дьяченко В.П. Обоснование конструктивных параметров линейной вантовой секции подвешенного канатного конвейера типа ropescon® // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023;(11): 115-127. DOI: 10.25018/0236-1493-2023-11-0-115.
Galkin V.I., Dobler M.O., Dyachenko V.P. Substantiation of design parameters of a linear cable-stayed section of a ropescon® type suspended rope conveyor. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(11):115-127. (In Russ). DOI: 10.25018/0236-1493-2023-11-0-115.
 16. Галкин В.И., Доблер М.О. Анализ конструктивных особенностей става ленточного конвейера типа Ropescon® // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 8. С. 85-94. DOI: 10.25018/0236-1493-2022-8-0-85.
Galkin V.I., Dobler M.O. Analysis of the design features of the Ropescon® type belt conveyor. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(8):85-94. (In Russ). DOI: 10.25018/0236-1493-2022-8-0-85.
 17. Бахтурин Ю.А. Учет надежности оборудования транспортных систем карьеров при имитационном моделировании // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 537. С. 42-50. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-42-50.
Bakhturin Yu.A. Accounting for the reliability of equipment of quarry transport systems in simulation modeling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(537):42-50. (In Russ). DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-42-50.
 18. Дмитриев В.Г., Галкин В.И. Надежность става ленточного конвейера // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2000. № 3. С. 93-95.
Dmitriev V.G., Galkin V.I. Reliability of the belt conveyor. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2000;(3):93-95. (In Russ.).
 19. Gerike B., Drozdenko Y., Kuzin E. et al. Formation of Comprehensive Service System of Belt Conveyor Gearboxes. *E3S Web of Conferences.* 2018;(41):03011. DOI: 10.1051/E3SCONF/20184103011.

Authors Information

Dmitrieva V.V. – Associate Professor, Department of Theoretical Electrical Engineering and Electrification of Oil and Gas Industry, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: dm-valeriya@yandex.ru

Dzyuin D.V. – Post-graduate student, Department of Theoretical Electrical Engineering and Electrification of Oil and Gas Industry, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: dziouin@mail.ru

Tsoj F.V. – Master student, Department of Mining Equipment, Transportation and Mechanical Engineering, Mining Institute, National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation, e-mail: Feliks.tsoy.83@mail.ru

Nazarov Yu. – Master student, Department of Mining Equipment, Transportation and Mechanical Engineering, Mining Institute, National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation, e-mail: nazarov.dzhon.96@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 22.03.2024

Поступила после рецензирования: 16.05.2024

Принята к публикации: 26.05.2024

Paper info

Received March 22, 2024

Reviewed May 16, 2024

Accepted May 26, 2024