ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(7):85-95
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.647.21 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_7_0_85

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СТАВА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ РОЛИКООПОР

В.В. Дмитриева[1], П.Е. Сизин[2]

[1] РГУ Нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, Москва, Россия,
e-mail: dm-valeriya@yandex.ru
[2] ИБО НИТУ «МИСиС», Москва, Россия

Аннотация: При эксплуатации современных многокилометровых ленточных конвейеров возникает задача анализа надежности. Большой интерес представляет получение оценок надежности и среднего времени безотказной работы самого конвейера. Рассмотрены различные схемы резервирования роликоопор. Получен закон надежности системы для случая, когда конвейер разбит на участки с одинаковым количеством роликоопор, и на каждом из участков допустим отказ не более чем m элементов. Для случая, когда став конвейера содержит *n* роликоопор и конвейер работает исправно при отказе не более *k* роликоопор, найдено среднее время его безотказной работы для показательного закона надежности каждого элемента и для закона Вейбулла. Исследована зависимость среднего времени безотказной работы от *k*. В схеме ненагруженного резерва работа конвейера продолжается, пока не будут исчерпаны резервные элементы. Отказы отдельных элементов описываются моделью пуассоновского потока событий. Получено выражение для вероятности отказа системы за время *t*. При большом *t* и большом количестве роликоопор время безотказной работы конвейера описывается нормальным распределением. С учетом этого получено выражение для вероятности отказа конвейера за время *t*. Эти результаты могут быть использованы при планировании обслуживания конвейера и оценке необходимого резерва роликоопор.

Ключевые слова: ленточный конвейер, роликоопора, анализ надежности, экспоненциальный закон надежности, нагруженный резерв, ненагруженный резерв, показатели надежности, среднее время безотказной работы, закон Вейбулла.

Для цитирования: *Дмитриева В. В., Сизин П. Е.* Оценка надежности става ленточного конвейера при различных схемах резервирования роликоопор // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 7. – С. 85–95. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_7_0_85.

Reliability evaluation of belt conveyor line at different redundancies of carrying rollers

V.V. Dmitrieva[1], P.E. Sizin[2]

[1] Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University),
Moscow, Russia, e-mail: dm-valeriya@yandex.ru
[2] Institute of Basic Education, National University of Science and Technology «MISiS»,
Moscow, Russia

Abstract: Operation of modern many kilometers long belt conveyors involves their reliability analysis. It seems to be of concern to assess reliability and mean time between failures of conveyors. This study considers different redundancies of carrying rollers. The reliability law is drawn for the case of a conveyor divided into sections with equal numbers of carrying rollers, and it is allowed that no more than m elements may fail per section. In case when conveyor line contains n rollers and operates fault-free in case of failure of k rollers, the mean time between failures of the conveyor is found at the exponential rule of reliability and at the Weibull distribution. The relationship between the mean time between failures and k is examined. A conveyor with unloaded redundant units keeps on operating until all redundant units are exhausted. Failures of individual units are described by the Poisson distribution model. The failure probability expression versus the time t is obtained. At high t and large number of carrying rollers, the failure-free time of the conveyor follows the normal distribution. In this context, the expression of the conveyor failure probability within the time t is obtained. The results are applicable in conveyor maintenance scheduling and in assessment of the required roller redundancy.

Key words: belt conveyor, carrying roller, reliability analysis, exponential reliability distribution, loaded redundant units, unloaded redundant units, reliability indices, mean time between failures, Weibull distribution.

For citation: Dmitrieva V. V., Sizin P. E. Reliability evaluation of belt conveyor line at different redundancies of carrying rollers. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(7):85-95. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_7_0_85.

Постановка задачи

На современном горном предприятии конвейер составляет неотъемлемую часть целой производственной системы со многими технологическими процессами. Надежность работы конвейера и долговечность его узлов являются решающими факторами эффективной производственной деятельности и основными условиями экономической рентабельности [1]. Анализ надежности оборудования является актуальной и востребованной на практике задачей, решаемой современными исследователями [2—4].

Надежность машины — это ее свойство выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей (скорости, производительности, расхода энергии) в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания и ремонтов. Надежность — комплексное свойство машины, включающее безотказность, долговечность и ремонтопригодность.

Конвейер является восстанавливаемой и ремонтируемой машиной, поскольку после возникновения отказа его работоспособность можно восстанавливать [5].

Основные показатели надежности — это вероятность безотказной работы, средняя наработка на отказ и интенсивность отказов; вероятность восстановления в заданное время и среднее время восстановления. Расчет показателей надежности на современном этапе исследований проводится как аналитически, так и методами имитационного моделирования, или с использованием новых средств автоматизации [6, 7]. Методы имитационного моделирования особенно успешно используются при анализе надежности оборудования, поскольку избавляют от необходимости проводить сложные аналитические вычисления [8—10].

Став ленточного конвейера, как известно [11], состоит из металлоконструкции, роликоопор грузовой ветви и роликоопор порожней ветви. С точки зрения теории надежности будем считать эти элементы включенными последовательно, поскольку отказ одного из них приведет к отказу конвейера в целом. Поскольку металлоконструкции практически не выходят из строя, то надежность става определяется надежностью роликоопор. В смысле надежности и на грузовой, и на порожней ветви роликоопоры соединены последовательно. Количество роликоопор обычно бывает несколько избыточным, благодаря чему можно не останавливать конвейер на ремонт при выходе из строя нескольких роликоопор. Однако при выходе из строя некоторого предельного количества роликоопор наступает аварийная ситуация, поэтому необходимо знать, хотя бы приблизительно, вероятность выхода из строя того или иного их количества. На основе этой информации можно планировать резервирование роликоопор, необходимый запас элементов для ремонта конвейера и т.д. Целью работы является получение статистических характеристик надежности ленточного конвейера при различных схемах резервирования элементов. Введем некоторые обозначения, используемые в теории надежности. Пусть у нас имеются n роликоопор ленточного конвейера, где n включает в себя как необходимые для работы конвейера роликоопоры, так и резервные. Вероятности их безотказной работы в течение времени t обозначаются через $p_1(t)$, $p_2(t)$, …, $p_n(t)$. Вероятность того, что за время t произошел отказ i-го элемента, есть $q_i(t) = 1 - p_i(t)$. Вероятность безотказной работы всей системы (надежность системы) обозначим через $P(t)$.

Рассмотрим несколько алгоритмов резервирования.

Нагруженный резерв

Вначале необходимо рассмотреть схему нагруженного резерва. В рамках этой схемы предполагается, что все резервные роликоопоры участвуют в работе, и отказом системы считается отказ всех резервных элементов. По существу, в этой схеме отсутствует различие между основными роликоопорами и резервными. При этом количество включенных в работу роликоопор является несколько избыточным, и отказ небольшого их количества не влияет критическим образом на работу системы.

Рассмотрим двухступенчатую вероятностную схему, представляющую практический интерес для исследования надежности современных многокилометровых конвейеров [8]. Пусть став ленточного конвейера содержит n роликоопор с одинаковыми характеристиками. Разделим став конвейера на пере-

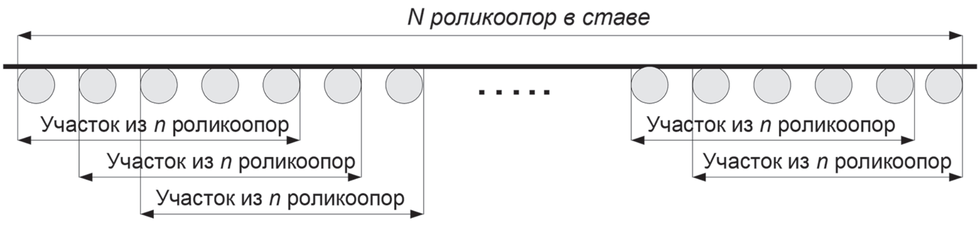

Рис. 1. Вероятностная схема
Fig. 1. Probability scheme

крывающиеся участки по n роликоопор. Наглядно эту схему представим на рис. 1. Для безотказной работы каждого участка необходимо, чтобы на этом участке произошел отказ не более чем m роликоопор. При отказе m+1 роликоопоры на одном участке происходит отказ всего конвейера (например, рвется лента). Участки из n роликоопор перекрываются, но при высокой надежности каждой роликоопоры вероятность того, что откажут сразу два соседних перекрывающихся участка, пренебрежимо мала в сравнении с вероятностью отказа одного из участков, и поэтому отказы участков можно считать независимыми событиями. Количество таких участков приближенно равно N, поскольку отсутствие нескольких полных участков в начале и в конце ленты можно не принимать во внимание.

Надежность одного участка есть

$$P_y(t) = \sum_{i=0}^{m} C_n^i \cdot p^i(t) q^{n-1}(t), \qquad (1)$$

где C^i_n — число сочетаний по i элементов из n, а вероятность безотказной работы системы в течение времени t дается выражением

$$P(t) = P_y^N(t). \qquad (2)$$

При отказе не более k участков (например, небольшое количество отказов устраняется очень быстро, а отказ некоторого количества участков приводит к длительной остановке конвейера) формула для вероятности безотказной работы усложняется:

$$P(t) = \sum_{i=0}^{k-1} C_N^i \cdot P_y^{N-i}(t)\left(1 - P_y(t)\right)^i. \qquad (3)$$

В [12] указывается, что отдельные элементы конструкции обычно характеризуются экспоненциальным законом надежности или законом надежности Вейбулла. Для усталостного разрушения характерен закон Вейбулла, для внезапных отказов — экспоненциальный закон надежности. Предположим, что для каждой роликоопоры ленточного конвейера действует экспоненциальный закон надежности, функция надежности для i-го элемента есть $P_i(t) = e^{-\lambda_i t}$, где λ_i — интенсивность отказов для i-го элемента.

Определим теперь среднее время работы конвейера $T_{ср}$ в условиях нагруженного резерва. Воспользуемся известной формулой:

$$T_{cp} = \int_0^\infty P(t)dt. \qquad (4)$$

Для одного элемента с экспоненциальным законом надежности эта величина равна

$$T_{cp} = \int_0^\infty e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \qquad (5)$$

Вероятность отказа за время t ровно i элементов равна

$$P_i(t) = C_n^i (e^{-\lambda t})^{n-i} \left(1 - e^{-\lambda t}\right)^i. \qquad (6)$$

Вероятность безотказной работы конвейера определяется как

$$P_{(k)}(t) = P_0(t) + P_1(t) + \ldots + P_k(t). \qquad (7)$$

Для нахождения $T_{ср}$ рассмотрим интегралы вида:

$$\begin{aligned} &\int_0^\infty \left(e^{-\lambda t}\right)^{n-i} \left(1 - e^{-\lambda t}\right)^i dt = \\ &= \frac{1}{\lambda} \int_0^1 z^{n-i-1} \left(1 - z\right)^i dz \end{aligned}, \qquad (8)$$

в которых использована замена $z = e^{-\lambda t}$. С помощью известной формулы:

$$\int_0^1 z^m \left(1 - z\right)^n dz = \frac{m!n!}{\left(m + n + 1\right)!}, \qquad (9)$$

находим

$$\int_0^\infty P_i(t)dt = C_n^i \cdot \frac{\left(n - i - 1\right)!i!}{n!} = \frac{1}{n - i}, \qquad (10)$$

и тогда среднее время безотказной работы конвейера (до отказа более чем k роликоопор) есть

$$T_{cp} = \int\limits_0^\infty P_{(k)}(t)dt = \\ = \frac{1}{\lambda}\left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n-1} + \ldots + \frac{1}{n-k}\right) \quad (11)$$

Это среднее время при малых k практически линейно зависит от «разрешенного» количества отказов k:

$$T_{cp} \approx \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{k}{n}.$$

Также легко видеть, что оно обратно пропорционально n: при росте количества работающих элементов, например, в два раза средний срок работы до отказа уменьшается примерно вдвое. Этот кажущийся парадокс объясняется тем, что при большем количестве элементов отказы происходят чаще. Если при этом не меняется число «разрешенных» отказов, надежность системы становится меньше. Графики подынтегральной функции $P_{(k)}$ для n = 10 и k = 1, ..., 4 приведены на рис. 2.

Рассмотрим также случай, когда все элементы характеризуются законом надежности Вейбулла [9], и среднее время безотказной работы одного элемента

$$T_{cp} = \int\limits_0^\infty e^{-\alpha t^2} dt = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\pi}{\alpha}}, \quad (12)$$

где α — параметр распределения Вейбулла.

Вероятность отказа за время t ровно i элементов теперь равна

$$P_i(t) = C_n^i \left(e^{-\alpha t^2}\right)^{n-i} \left(1 - e^{-\alpha t^2}\right)^i. \quad (13)$$

С помощью замены $z = e^{-\alpha t^2}$ получаем:

$$\int\limits_0^\infty \left(e^{-\alpha t^2}\right)^{n-i} \left(1 - e^{-\alpha t^2}\right)^i dt = \\ = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\alpha}} \int\limits_0^1 z^{n-i-1} \frac{(1-z)^i}{\sqrt{-\ln z}} dz \quad (14)$$

При больших n и малых i в существенной для этого интеграла области

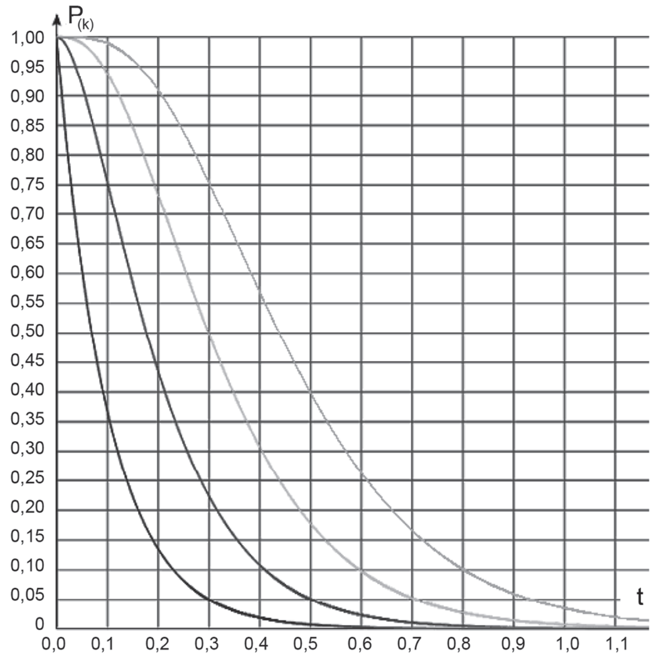

Рис. 2. Вероятности отказов менее чем k элементов, k = 1, 2, 3, 4 слева направо

Fig. 2. Failure probabilities for less than k elements, k=1, 2, 3, 4 left to right

переменная z близка к 1 и допустима линеаризация $-\ln z = -\ln(1-(1-z)) \approx 1-z$. С учетом этого

$$\int_0^\infty \left(e^{-\alpha t^2}\right)^{n-i} \left(1-e^{-\alpha t^2}\right)^i dt \approx \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\alpha}} \int_0^1 z^{n-i-1} (1-z)^{i-\frac{1}{2}} dz \tag{15}$$

Теперь нам требуется более общая формула [13]:

$$\int_0^1 z^\alpha (1-z)^\beta dz = \frac{\Gamma(\alpha+1)\Gamma(\beta+1)}{\Gamma(\alpha+\beta+2)}. \tag{16}$$

Находим

$$\int_0^\infty P_i(t)dt = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\alpha}} \cdot C_n^i \cdot \frac{(n-i-1)!\,\Gamma\left(i+\frac{1}{2}\right)}{\Gamma\left(n+\frac{1}{2}\right)} = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\alpha}} \cdot \frac{1}{n-i} \cdot \frac{\Gamma(n+1)}{\Gamma\left(n+\frac{1}{2}\right)} \cdot \frac{\Gamma\left(i+\frac{1}{2}\right)}{\Gamma(i+1)} \tag{17}$$

и тогда среднее время безотказной работы представлено в виде:

$$T_{cp(k)} = \int_0^\infty P_{(k)}(t)dt = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\alpha}} \cdot \sum_{i=0}^{k} \frac{1}{n-i} \cdot \frac{\Gamma(n+1)}{\Gamma\left(n+\frac{1}{2}\right)} \cdot \frac{\Gamma\left(i+\frac{1}{2}\right)}{\Gamma(i+1)}. \tag{18}$$

В случае распределения Вейбулла зависимость $T_{ср}$ от k и n оказывается несколько сложнее. При небольших k рост $T_{ср}$ вновь становится линейным, но этот

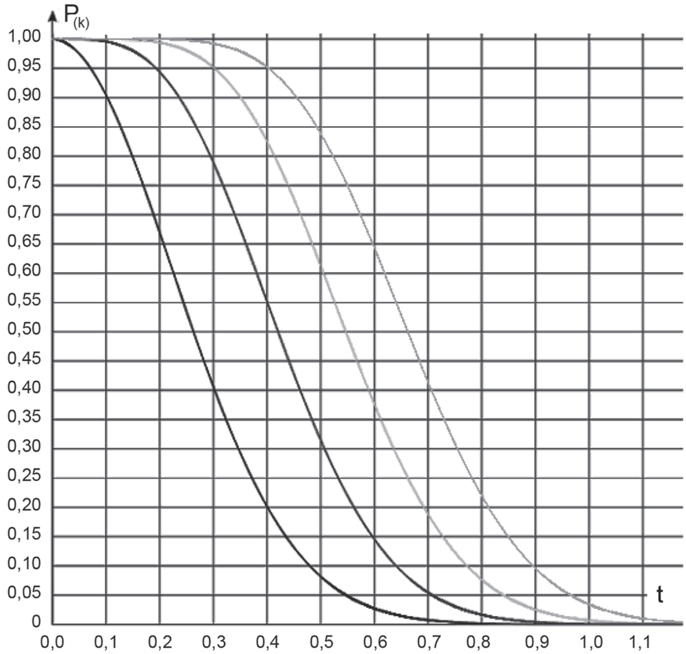

Рис. 3. Вероятности отказа менее чем k элементов в случае распределения Вейбулла, k = 1, 2, 3, 4 слева направо

Fig. 3. Failure probabilities for less than k elements in case of the Weibull distribution, k=1, 2, 3, 4 left to right

приближенный закон нарушается для k = 0. Величина $\sqrt{\alpha T_{cp}}$ оставляет 0,280 для k = 0; 0,432 для k = 1, 0,556 для k = 2 и 0,671 для k = 3 (везде принимаем n = 10). Графики подынтегральной функции $P_{(k)}(t)$ для n = 10 и приведены на рис. 3.

Ненагруженный резерв. Анализ с помощью распределения Пуассона

Рассмотрим несколько иную схему. Пусть став ленточного конвейера содержит n роликоопор с одинаковым законом надежности. Будем считать, что система работает исправно, пока число отказавших роликоопор не превышает некоторого заданного k. Отказом ленточного конвейера считается отказ любых k роликоопор из n. Этой схемой можно описывать всю систему, а не только резерв: предполагаем, что конвейер выходит из строя при отказе k роликоопор, а при отказе меньшего их числа сохраняет свою работоспособность. В то же время она применима для описания ненагруженного резерва: предположим, что в резерве имеются $k-1$ роликов. При отказе одного из работающих роликов на его место сразу же становится резервный. Но при отказе k-го ролика заменять его нечем, это и считается отказом всей системы. После отказа $i-1$ элементов функция надежности системы есть $P_i(t) = e^{-\lambda_i t}$ (не путать с функцией надежности отдельного элемента в предыдущем пункте!). В случае $\lambda_1 = \lambda_2 = \ldots = \lambda_n = \lambda$ вероятность отказа k роликоопор за время t описывается формулой Пуассона

$$P_n(k) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}. \tag{19}$$

Этим приближением можно пользоваться в случае ненагруженного резерва: при замене отказавшего элемента на новый характеристики системы не меняются. Тогда вероятность отказа конвейера за время t равна [14]

$$Q(t) = 1 - \sum_{0}^{i=k-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t}. \tag{20}$$

Эта формула почти очевидна — событием, противоположным отказу конвейера, является отказ любого числа роликоопор от 0 до $k-1$. Однако эта формула неудобна для исследования системы и быстрой оценки вероятности отказа. Получим для нее простое приближение. Из разложения

$$e^{\lambda t} = 1 + \frac{\lambda t}{1!} + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \ldots + \frac{(\lambda t)^i}{i!} + \ldots \tag{21}$$

получаем

$$e^{\lambda t} Q(t) = e^{\lambda t}\left(1 - \left(1 + \frac{\lambda t}{1!} + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \ldots \right.\right.$$

$$\left.\left. \ldots + \frac{(\lambda t)^{k-1}}{(k-1)!} + \ldots \right) e^{-\lambda t}\right) =$$

$$= e^{\lambda t} - \left(1 + \frac{\lambda t}{1!} + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \ldots + \frac{(\lambda t)^{k-1}}{(k-1)!}\right) \approx$$

$$\approx \frac{(\lambda t)^k}{k!} + \frac{(\lambda t)^{k+1}}{(k+1)!} + \ldots \tag{22}$$

В случае $\lambda t \ll 1$можно, во-первых, ограничиться первым слагаемым в итоговом выражении для $Q(t)$, во-вторых, положить $e^{\lambda t}$ равным единице. Тогда получаем совсем простое выражение

$$Q(t) \approx \frac{(\lambda t)^k}{k!}. \tag{23}$$

Полученный результат имеет простой смысл: при малом λt вероятность отказа не менее k элементов приближенно равна вероятности отказа ровно k элементов. Можно также показать, что при различных λ_i этот результат принимает вид:

$$Q(t) \approx \frac{\lambda_1 \lambda_2 \ldots \lambda_k t^k}{k!}. \tag{24}$$

В случае немалых $\lambda_i t$ (большое время работы или ненадежные роликоопоры)

$$Q(t) \approx \frac{\lambda_1 \lambda_2 \ldots \lambda_k t^k}{k!} \cdot \exp\left(-\frac{(\lambda_1 + \lambda_2 + \ldots + \lambda_k)}{k} t\right). \quad (25)$$

Полученные формулы справедливы, как и было сказано выше, когда в группе резерва имеются всего k элементов, которые включаются в работу по одному, и работа продолжается до отказа последнего из них.

В случае невозможности замены отказавших роликоопор при выходе из строя каждой из них увеличивается нагрузка на остальные. В связи с этим вероятность следующего отказа возрастает. Эта ситуация может быть описана различными значениями λ_i, при этом $\lambda_{i+1} > \lambda_i$.

В случае немалых $\lambda_i t$ и большого количества роликоопор время безотказной работы системы описывается нормальным распределением. Представим случайную величину T — время безотказной работы конвейера — в виде суммы времен безотказной работы роликоопор $T = T_1 + T_2 + \ldots + T_k$.

Математические ожидания времен работы отдельных элементов есть $M(T_i) = \frac{1}{\lambda_i}$; их дисперсии $D(T_i) = \frac{1}{\lambda_i^2}$ (все элементы описываются показательными законами надежности). Тогда

$$M(T) = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \ldots + \frac{1}{\lambda_k}; \quad D(T) = \frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{1}{\lambda_2^2} + \ldots + \frac{1}{\lambda_k^2} \quad (26)$$

В данном случае будем считать отказом системы отказ всех ее элементов. В силу центральной предельной теоремы время работы всей системы (сумма времен работы всех ее элементов до отказа последнего) выражается формулой

$$Q(t) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = \frac{1}{2} + \Phi(x); \quad x = \frac{t - M(T)}{\sqrt{D(T)}} \quad (27)$$

Сделаем некоторые численные оценки надежности системы в рассмотренных случаях. Вероятность безотказной работы системы N роликоопор в условиях нагруженного резерва, когда для безотказной работы требуется отсутствие отказа n роликоопор подряд, в случае экспоненциального закона надежности каждой роликоопоры приближенно равна

$$P(t) = \left(1 - \left(1 - e^{\lambda t}\right)^n\right)^N. \quad (28)$$

При малых λt, разлагая экспоненту в ряд Маклорена и используя второй замечательный предел, получаем приближенное равенство

$$P(t) \approx e^{-N(\lambda t)^n}. \quad (29)$$

Например, при $\lambda t = 0{,}1$; $n = 3$, $N = 1000$ получаем $P(t) \approx 0{,}42$.

Аналогичное рассмотрение можно провести в случае закона надежности Вейбулла. Тогда имеем

$$P(t) = \left(1 - \left(1 - e^{\alpha t^2}\right)^n\right)^N. \quad (30)$$

При малых αt^2 получаем приближение

$$P(t) \approx e^{-N(\alpha t^2)^n}. \quad (31)$$

Например, при $\alpha t^2 = 0{,}1$; $n = 3$, $N = 1000$ получаем $P(t) \approx 0{,}42$.

При замене некоторого значения λt таким же значением αt^2 оценка $P(t)$ не изменяется.

В случае ненагруженного резерва, описываемом распределением Пуассона, оценка надежности существенно зависит от числа $k-1$ резервных элементов, которыми можно заменять основные. Например, при $k = 4$ (всего три элемента в резерве) и $\lambda t = 0{,}1$; получаем

$$P(t) \approx 1 - \frac{0{,}1^4}{4!} \approx 0{,}999996.$$

В этой схеме можно предположить значительные времена работы, для которых экспонента в распределении Пуассона существенно отличается от единицы. Так, для $k = 4$ и $\lambda t = 1$ получаем

$$P(t) \approx 1 - \frac{1}{4!}e^{-1} \approx 0,985 .$$

Выводы

В статье рассмотрены различные схемы резервирования элементов конструкции ленточного конвейера. Получен закон надежности для конвейера, разделенного на участки, в пределах каждого из которых выход из строя не более m роликоопор не приводит к останову конвейера. Найдено среднее время работы конвейера при экспоненциальном законе надежности отдельных роликоопор и законе Вейбулла.

Для случая ненагруженного резерва вероятность отказов получена с помощью распределения Пуассона.

При невозможности замены элементов вероятность отказа конвейера найдена с применением нормального распределения.

Показано, что большая надежность достигается при применении ненагруженного резерва.

Результаты могут быть использованы при планировании обслуживания конвейера и оценке необходимого резерва роликоопор [15, 7, 3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.

2. *Meiyan Li, Sun Yingqian, Chuan Luo* Reliability analysis of belt conveyor on fault data // IOP Conference Series. Materials Science and Engineering. 2019, vol. 692, article 012009. DOI: 10.1088/1757-899X/692/1/012009.

3. *Xiangwei Lui, Daijie He, Gabriel Lodewijks, Yusong Pang* Integrated decision making for predictive maintenance of belt conveyor sistems // Reliability Engineering. System Safety. 2019, vol. 188, pp. 347—351. DOI: 10.1016/j.ress.2019.03.047.

4. *Burak Ozdemir, Mustafa Kumral* Analysing human effect on the reliability of mining equipment // International Journal of Heavy Vehicle Systems. 2019, vol. 1, no. 1. DOI: 10.1504/IJHVS.2019.10018454.

5. *Шахмейстер Л. Г., Дмитриев В. Г.*. Вероятностные методы расчета транспортирующих машин. — М.: Машиностроение, 1983. — 256 с.

6. *Русин А. Ю., Абдулхамед М., Барышев Я. В.* Алгоритмы автоматизированной системы управления испытанием оборудования на надежность // Программные продукты и системы. — 2016. — № 2. — С. 23—26. DOI 10.15827/0236-235X.114.023-026.

7. *Черемушкина М. С., Склярук А. Б.* Мониторинг как средство повышения надежности конвейерного транспорта / Неделя Науки СПБПУ. Материалы научной конференции с международным участием. — Санкт-Петербург, 2016. — С. 304—305.

8. *Уанкпо Г. Ж. К., Козырев Д. В.* Программный комплекс имитационного моделирования и расчета стационарных вероятностей и оценки надежности резервированной системы с произвольными распределениями времени безотказной работы и ремонта ее элементов // Современные информационные технологии и IT-образование. — 2019. — т. 15. — № 3. — С. 553—562. DOI: 10.25559/SITITO.15.201903.553-562.

9. *Summit R., Halomoan D.* Reliability modelling for maintenance scheduling of mobile mining equipment / Proceedings Engineering Mathematics and Applications Conference. 2013, vol. 55. DOI: 10.21914/anziamj.v55i0.7863.

10. *Бахтурин Ю. А.* Учет надежности оборудования транспортных систем карьеров при имитационном моделировании // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — СВ 37. — С. 42—50.

11. *Дмитриев В. Г., Галкин В. И.* Надежность става ленточного конвейера // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2000. — № 3. — С. 93—95.
12. *Галкин В. И.* Методы расчета и оценка показателей надежности ленточных конвейеров горных предприятий. Автореф. диссертации на соискание ученой степени доктора техн. наук. — М.: Изд-во МГГУ, 2000.
13. *Градштейн И. С., Рыжик И. М.* Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. 4-е изд. — М.: Физматгиз, 1963. — 1100 с.
14. *Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д.* Математические методы в теории надежности: Основные характеристики надежности и их статистический анализ. Изд. 3. — М.: Издательская группа URSS, 2019. — 584 с.
15. *Angeles E., Kumral M.* Optimal inspection and preventive maintenance scheduling of mining equipment // Journal of Failure Analysis and Prevention. 2020, vol. 20, no. 2. DOI: 10.1007/s11668-020-00949-z. ГИАБ

REFERENCES

1. Antonov A. V., Luk'yanov I. I. Influence of equipment reliability on technical and economic indicators of coal mining enterprises. *Fundamental research*. 2015, no. 12-1, pp. 130—132. [In Russ].
2. Meiyan Li, Sun Yingqian, Chuan Luo Reliability analysis of belt conveyor on fault data. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*. 2019, vol. 692, article 012009. DOI: 10.1088/1757-899X/692/1/012009.
3. Xiangwei Lui, Daijie He, Gabriel Lodewijks, Yusong Pang Integrated decision making for predictive maintenance of belt conveyor sistems. *Reliability Engineering. System Safety*. 2019, vol. 188, pp. 347—351. DOI: 10.1016/j.ress.2019.03.047.
4. Burak Ozdemir, Mustafa Kumral Analysing human effect on the reliability of mining equipment. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*. 2019, vol. 1, no. 1. DOI: 10.1504/IJHVS.2019.10018454.
5. Spakhmeyster L. G., Dmitriev V. G. Veroyatnostnye metody rascheta transportiruyushchikh mashin [*Probabilistic methods for calculating transporting machines*], Moscow, Mashinostroenie, 1983, 256 p.
6. Rusin A. Yu., Abdulkhamed M., Baryshev Yu. V. Algorithms of an automated control system for testing equipment for reliability. *Programmnye produkty i sistemy*. 2016, no. 2, pp. 23—26. [In Russ]. DOI 10.15827/0236-235X.114.023-026.
7. Cheremushkina M. S., Sklyaruk A. B. Monitoring as a means of improving the reliability of conveyor transport. *Nedelya Nauki SPBPU. Materialy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [SPBPU Week of Science. Proceedings of the scientific conference with international participation], Saint-Petersburg, 2016, pp. 304—305. [In Russ].
8. Uankpo G. Zh. K., Kozyrev D. V. Software package for simulating and calculating stationary probabilities and evaluating the reliability of a redundant system with arbitrary distributions of uptime and repair of its elements. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2019, vol. 15, no. 3, pp. 553—562. [In Russ]. DOI: 10.25559/SITITO.15.201903.553-562.
9. Summit R., Halomoan D. Reliability modelling for maintenance scheduling of mobile mining equipment. *Proceedings Engineering Mathematics and Applications Conference*. 2013, vol. 55. DOI: 10.21914/anziamj.v55i0.7863.
10. Bakhturin Yu. A. Accounting for the reliability of equipment for transport systems of quarries in simulation modeling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019. Special edition 37, pp. 42—50. [In Russ].
11. Dmitriev V. G., Galkin V. I. Reliability of the belt conveyor stave. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2000, no. 3, pp. 93—95. [In Russ].
12. Galkin V. I. *Metody rascheta i otsenka pokazateley nadezhnosti lentochnykh konveyerov gornykh predpriyatiy* [Methods of calculation and evaluation of reliability indicators of belt conveyors of mining enterprises], Doctor’s thesis, Moscow, Izd-vo MGGU, 2000.

13. Gradshteyn I. S., Ryzhik I. M. *Tablitsy integralov, summ, ryadov i proizvedeniy*. 4-e izd. [Tables of integrals, sums, series and products, 4th edition], Moscow, Fizmatgiz, 1963, 1100 p.
14. Gnedenko B. V., Belyaev Yu. K., Solov'ev A. D. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti: Osnovnye kharakteristiki nadezhnosti i ikh statisticheskiy analiz*. Izd. 3 [Mathematical methods in reliability theory: Main characteristics of reliability and their statistical analysis, 3rd edition], Moscow, Izdatel'skaya gruppa URSS, 2019, 584 p.
15. Angeles E., Kumral M. Optimal inspection and preventive maintenance scheduling of mining equipment. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2020, vol. 20, no. 2. DOI: 10.1007/s11668-020-00949-z.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дмитриева Валерия Валерьевна — канд. техн. наук, доцент,
РГУ Нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, e-mail: dm-valeriya@yandex.ru,
Сизин Павел Евгеньевич — канд. физ.-мат. наук, доцент,
ИБО НИТУ «МИСиС», e-mail: mstranger@list.ru.
Для контактов: Дмитриева В.В., e-mail: dm-valeriya@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.V. Dmitrieva, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University),
119991, Moscow, Russia, e-mail: dm-valeriya@yandex.ru,
P.E. Sizin, Cand. Sci. (Phys. Mathem.), Assistant Professor,
Institute of Basic Education, National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia, e-mail: mstranger@list.ru.
Corresponding author: V.V. Dmitrieva, e-mail: dm-valeriya@yandex.ru.

Получена редакцией 16.11.2020; получена после рецензии 22.12.2020; принята к печати 10.06.2021.
Received by the editors 16.11.2020; received after the review 22.12.2020; accepted for printing 10.06.2021.

РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА СОРТИРОВКИ ЩЕБНЯ НА БАЗЕ ARDUINO

(№ 1243/07-21 от 12.05.2021; 7 с.)

Маирова Аминат Тимуровна, Тлежукова Аминат Анатольевна, Гижгиева Саида Алиевна — магистранты, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Институт информатики, электроники и робототехники.

Рассмотрены вопросы о применении фотометрического метода сортировки щебня на базе Arduino. Особое внимание уделяется аппаратно-программному комплексу Arduino. Обозначены некоторые проблемные вопросы и намечены пути их решения. Рассмотрены примеры проекта и приведены схемы подключения.

Ключевые слова: сепарация, проект сепаратор на Arduino, использование фотометрических датчиков, проекты на Arduino.

RESEARCH AND APPLICATION OF THE PHOTOMETRIC METHOD OF SORTING CRUSHED STONE BASED ON ARDUINO

A.T. Mairova, A.A. Tlezhukova, S.A. Gizhgieva, Magisters, H.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Institute of Informatics, Electronics and Computer Technology, 360004, Nalchik, Russia.

The article discusses the issues of using the photometric method of sorting rubble based on Arduino. Particular attention is paid to the Arduino hardware and software complex. Some problematic issues are identified and ways of their solution are outlined. The article also discusses project examples, and provides connection diagrams.

Key words: separation, project separator on Arduino, use of photometric sensors, projects on Arduino.