

Р.В. Кирия, А.Н. Смирнов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СТАВА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Аннотация. В работе решена задача определения живучести и интенсивности восстановления конвейерного става как системы параллельно соединенных элементов (роликоопор). При этом рассматривался став с роликоопорами четырех различных типов. В результате получены зависимости показателей надежности става ленточного конвейера, в частности, уровня надежности от среднего количества замен роликов в смену для рассмотренных типов роликоопор.

Ключевые слова: ленточный конвейер, конвейерный став, роликоопора, показатели надежности, живучесть.

Как показал опыт эксплуатации ленточных конвейеров на угольных шахтах, основным фактором, влияющим на отказы роликоопор и снижение надежности става конвейера, являются динамические нагрузки, возникающие при движении крупных кусков по роликам. Динамические нагрузки приводят к отказам роликов из-за усталостного разрушения элементов подшипникового узла ролика, что снижает надежность конвейера и увеличивает затраты на обслуживание конвейерного става.

Одним из путей повышения эффективности работы става ленточного конвейера является снижение динамических нагрузок на ролики за счет выбора параметров конвейера и конструкции роликоопор, а также определение показателей ремонтпригодности, то есть определение среднего количества замен роликов в смену, при котором для данного грузопотока надежность конвейерного става будет наибольшей.

Следовательно, одной из важных задач при эксплуатации ленточных конвейеров, транспортирующих горную массу, является задача определения показателей надежности става, то есть вероятности безотказной работы и среднего числа замены роликов в смену.

Став ленточного конвейера можно представить как систему параллельно соединенных одинаковых элементов (роликоопор). Выход

из строя одной или нескольких роlikоопор (роликoв) не приводит к потере работоспособности става ленточного конвейера, а приводит к снижению эффективности его функционирования, т.е. увеличению сопротивления движению ленты с грузом по роlikоопорам. То есть став конвейера является высокорезервированной системой и, несмотря на невысокую надежность роlikоопор, имеет высокую вероятность безотказной работы, близкую к единице [1].

Это значит, что надежность такой сложной системы невозможно оценить вероятностью безотказной работы става [2]. Надежность такой системы определяется понятием живучести [3].

Живучесть става – это способность сохранять свои функции (несущие, подвижные) даже при выходе из строя некоторого количества роликoв.

В процессе работы конвейера (конвейерной линии) через определенные промежутки времени (смена – 8 часов) производится замена некоторого количества вышедших из строя роликoв.

Следовательно, став ленточного конвейера можно рассматривать как систему с восстанавливаемыми элементами, а процесс ее функционирования можно рассматривать как процесс гибели и размножения. Поддерживать живучесть става ленточного конвейера можно за счет необходимого уровня его обслуживания (замены роликoв).

Представим став в виде системы из n параллельно соединенных элементов (роlikоопор) с интенсивностью отказов и восстановлений λ_p и μ_p соответственно. Тогда процесс функционирования става ленточного конвейера можно представить в виде марковского процесса гибели и размножения [4].

Пусть $P_k(t)$ – вероятность того, что в ставе в момент времени t не работают k роlikоопор. Тогда вероятность того, что за бесконечно малое время Δt в ставе, имеющем $(k-1)$ неработающих роlikоопор, откажет еще одна роlikоопора, равна $\lambda_p \Delta t + o(\Delta t)$. А вероятность того, что за время Δt одна роlikоопора восстановится и став будет иметь k неработающих роlikоопор, равна $\mu_p \Delta t + o(\Delta t)$. Кроме того, вероятность того, что за время Δt ни одна роlikоопора не выйдет из строя и не восстановится, а в ставе останется k неработающих роlikоопор, равна $1 - (\lambda_p + \mu_p) \Delta t + o(\Delta t)$.

Тогда вероятность того, что в момент времени $t+\Delta t$ став будет иметь k неработающих роlikоопор, по формуле полной вероятности равна [5]:

$$P_k(t + \Delta t) = P_{k-1}(t)[\lambda_p \Delta t + o(\Delta t)] + P_k[1 - (\lambda_p + \mu_p)\Delta t + o(\Delta t)] + P_{k+1}[\mu_p \Delta t + o(\Delta t)] \quad (1)$$

Переходя в последнем равенстве к пределу $\Delta t \rightarrow 0$, получим систему обыкновенных уравнений относительно вероятности P_k :

$$\frac{dP_k}{dt} = \lambda_p P_{k-1}(t) - (\lambda_p + \mu_p)P_k(t) + \mu_p P_{k+1}(t), \quad (2)$$

где $k=1, 2, \dots, n-1$.

Для $k=0$ и $k=n$ можно получить соответственно аналогичные равенства:

$$\begin{aligned} \frac{dP_0(t)}{dt} &= -\lambda_p P_0(t) + \mu_p P_1(t); \\ \frac{dP_n(t)}{dt} &= \lambda_p P_{n-1}(t) - \mu_p P_n(t). \end{aligned} \quad (3)$$

Кроме того, из теоремы о полной вероятности несовместимых событий для вероятностей $P_k(t)$ выполняется условие:

$$\sum_{k=0}^n P_k(t) = 1. \quad (4)$$

Уравнения (1)–(3) представляют собой систему линейных обыкновенных дифференциальных уравнений относительно неизвестных функций $P_k(t)$ ($k=0, 1, \dots, n$).

Задавшись начальными условиями:

при $t=0$ $P_0 = 1$, $P_k = 0$, где $k=1, 2, \dots, n$,

получим решение этой системы.

На практике время работы конвейера, а следовательно, и става гораздо больше начального периода приработки.

В работе [6] показано, что для любого начального состояния системы, описываемой процессом гибели и размножения, при больших t существуют пределы:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_k(t) = P_k, \quad k = 0, 1, \dots, n,$$

причем решение системы (2) и (3) существует, если выполняется условие

$$\lambda_p < \mu_p (\lambda_p > 0, \mu_p > 0). \quad (5)$$

Переходя к пределу в системе (2) и (3), получим для стационарного режима систему алгебраических уравнений

$$\begin{cases} 0 = \lambda_p P_{k-1} - (\lambda_p + \mu_p) P_k + \mu_p P_{k+1}; \\ 0 = -\lambda_p P_0 + \mu_p P_1; \\ 0 = \lambda_p P_{n-1} - \mu_p P_n, \end{cases} \quad (6)$$

где $k=1,2,\dots,n-1$.

Кроме того, переходя к пределу в (4), получим

$$\sum_{k=0}^n P_k = 1. \quad (7)$$

Решая систему (6) при условии (7), получим [4]

$$P_k = \frac{\theta^k (1 - \theta)}{1 - \theta^{n+1}} \quad (k = 0, 1, \dots, n), \quad (8)$$

где $\theta = \frac{\lambda_p}{\mu_p}$.

Причем, стационарное решение существует и оно единственное при $0 \leq \theta < 1$ ($\lambda_p < \mu_p$). При $\theta \geq 1$ ($\lambda_p \geq \mu_p$) стационарного решения не существует. В этом случае число неработающих роликкоопор возрастает до бесконечности.

Уровень надежности става α определим как вероятность того, что количество неработающих роликкоопор превысит допустимое значение n_1 для данного конвейера:

$$\alpha = P\{k > n_1\}, \quad (9)$$

где n_1 – допустимое количество неработающих роликкоопор в ставе конвейера, определяемое предельно допустимым превышением мощности привода конвейера.

Согласно [7] n_1 определяется из соотношения

$$\frac{N'_c - N_c}{N_c} = k_3 - 1 \quad \text{или} \quad \frac{N'_c}{N_c} = k_3, \quad (10)$$

где N_c – сила сопротивления движению ленты по роликкоопорам при всех работоспособных роликах на ставе ленточного конвейера; N'_c – сила сопротивления при n_1 заторможенных (неработающих) роликах; k_3 – коэффициент запаса привода по тяговой способности (по сцеплению).

Коэффициент k_3 согласно [8, 9] равен 1,2–1,4. В нашем случае принимаем $k_3 = 1,25$.

Если общее количество роlikоопор на ставе конвейера равно n ($n=L_k/l_p$, где L_k – длина конвейера, м), то сила сопротивления при неработающих n_1 роlikоопорах грузеной ветви става равна

$$N'_c = (q_z + q_l + q_p)n_1 f l_p + (q_z + q_l + q_p)(n - n_1)\omega_z l_p + (q_l + q_p)n\omega_x l_p.$$

Сила сопротивления при всех работающих роliках на ставе конвейера равна

$$N_c = (q_z + q_l + q_p)n\omega_z l_p + (q_l + q_p)n\omega_x l_p.$$

Тогда подставим значения N_c и N'_c из последних равенств в (10) и из полученного равенства определим n_1 . В результате для n_1 получено выражение

$$n_1 = \frac{(k_3 - 1)[(q_z + q_l + q_p)\omega_z L_k + (q_l + q_p)\omega_x L_k]}{(q_z + q_l + q_p)(f - \omega_z)l_p}, \quad (11)$$

где ω_z – коэффициент сопротивления движению грузеной ветви конвейера; ω_x – коэффициент сопротивления движению холостой ветви конвейера; f – коэффициент трения резина – металл.

Степень живучести става определим как отношение числа допустимого количества работающих роlikоопор к их общему количеству [8]:

$$\beta_1 = \frac{n - n_1}{n}.$$

Подставляя в последнее равенство n_1 из (11), выразим степень живучести β_1 через параметры ленточного конвейера. Из последнего равенства также следует, что допустимое количество неработающих роlikоопор в ставе конвейера определяется по формуле

$$n_1 = (1 - \beta_1)n.$$

Из (9) следует, что вероятность того, что количество неработающих роliков на ставе конвейера меньше или равно n_1 (или живучесть става) равна

$$P\{k \leq n_1\} = 1 - \alpha.$$

Представим равенство (7) в виде:

$$P\{k \leq n_1\} + P\{k > n_1\} = 1,$$

где $P\{k \leq n_1\} = \sum_{k=0}^{n_1} P_k$; $P\{k > n_1\} = \sum_{k=n_1+1}^n P_k$.

Из последнего равенства имеем

$$P\{k \leq n_1\} = 1 - P\{k > n_1\}$$

или, с учетом (9), получим

$$\sum_{k=0}^{n_1} P_k = 1 - \alpha. \quad (12)$$

Подставив (8) в (12), после суммирования получим

$$\frac{1 - \theta^{n_1+1}}{1 - \theta^{n_1+1}} = 1 - \alpha. \quad (13)$$

Для мощных ленточных конвейеров количество роlikоопор $n \gg 1$, поэтому, переходя в левой части равенства (13) к пределу $n \rightarrow \infty$, получим

$$1 - \theta^{n_1+1} = 1 - \alpha. \quad (14)$$

Из последнего равенства (14) определим θ и в результате получим

$$\theta = \alpha^{\frac{1}{n_1+1}}. \quad (15)$$

Подставив значение $\theta = \lambda_p / \mu_p$ в (15) и определив из него α , после преобразования получим уровень надежности става ленточного конвейера в виде

$$\alpha = \left(\frac{\lambda_p}{\mu_p} \right)^{n_1+1}, \quad (16)$$

где μ_p – интенсивность восстановления роlikоопор, 1/ч; λ_p – интенсивность отказов роликoпoр, 1/ч.

Так как количество роlikоопор на ленточном конвейере больше ста ($n > 100$), то и роликoпoр больше трехсот. В этом случае, согласно [10], поток отказов большого количества независимых элементов является простейшим [4, 11], и вероятность безотказной работы одной роlikоопоры P_r распределена по экспоненциальному закону, т.е.

$$P_r = e^{-\lambda_p t}, \quad (17)$$

где λ_p – интенсивность отказов одной роlikоопоры (опасность отказа) 1/ч; t – текущее время, ч.

При этом λ_p определяется по формуле

$$\lambda_p = \lambda_c + 2\lambda_\sigma$$

где λ_c – интенсивность отказов среднего ролика 1/ч; λ_σ – интенсивность отказов бокового ролика, 1/ч.

Интенсивность отказов среднего и бокового роликов λ_c и λ_σ определяется по формулам

$$\lambda_c = \frac{1}{t_{cp}}, \quad \lambda_\sigma = \frac{1}{t'_{cp}}, \quad (18)$$

где t_{cp} – средний ресурс среднего ролика, ч; t'_{cp} – средний ресурс бокового ролика, ч.

Интенсивность восстановлений роlikоопор определяется по формуле

$$\mu_p = \frac{1}{t_\sigma}, \quad (19)$$

где t_σ – среднее время восстановления роlikоопоры, ч.

Следовательно, по заданным интенсивности отказов λ_p и восстановлений μ_p роlikоопор и допустимому количеству неработающих роlikоопор n_1 или степени живучести β по формуле (16) можно определить уровень надежности става ленточного конвейера α . Из формулы (16) следует, что чем больше интенсивность отказов роlikоопор λ_p , тем больше уровень надежности става ленточного конвейера α и меньше его живучесть, а чем больше интенсивность восстановлений роликков μ_p , тем уровень надежности α меньше.

Согласно [5], среднее число постоянно неработающих роlikоопор на стае равно:

$$n_c = \sum_{k=0}^{\infty} kP_k. \quad (20)$$

Подставляя в (20) P_k из (8), после суммирования получим:

$$n_c = \frac{\theta}{1-\theta}. \quad (21)$$

Из равенства (16) по заданному λ_p определим интенсивность восстановлений μ_p :

$$\mu_p = \frac{\lambda_p}{\alpha^{1/(n_1+1)}}. \quad (22)$$

Следовательно, по заданному λ_p , допустимому количеству неработающих роlikоопор n_1 , степени живучести β и уровню надежности става α по формуле (22) можно определить интенсивность восстановлений роlikоопоры μ_p .

Из (22) видно, что чем больше интенсивность отказов роlikоопор λ_p и меньше допустимое количество неработающих роlikоопор n_1 , тем больше интенсивность восстановлений роlikоопоры μ_p , а следовательно, больше затраты на эксплуатацию става.

Необходимое количество замен роlikов роlikоопор на ставе конвейера в час n_p определим по формуле

$$n_p = \mu_p n,$$

где n – общее количество роlikоопор на линейной части става.

Среднее количество замен роlikов в роlikоопорах в смену определим по формуле

$$n_{см} = 8n_p$$

или

$$n_{см} = 8\mu_p n. \quad (23)$$

Из последнего равенства (23) определим μ_p , полученное выражение подставим в формулу (16) и в результате получим:

$$\alpha = \left(\frac{8n\lambda_p}{n_{см}} \right)^{n_1+1}. \quad (24)$$

Из формулы (24) следует, что с увеличением количества замен роlikов в смену вероятность отказа става ленточного конвейера уменьшается.

На рисунке 1 показаны графики зависимости уровня надежности става α от среднего числа замен роlikов в смену (т.е. интенсивности восстановлений) для жестких (кривая 1), подвесных на канатном ставе (кривая 2), амортизированных (кривая 3) и подвесных на канатном ставе с амортизированными подвесами (подвесных амортизированных) (кривая 4) роlikоопор. При этом параметры конвейера, става и характеристики грузопотока принимали следующие значения: $L_k = 1000$ м; $\omega_z = \omega_x = 0,03$; $f = 0,5$; $q_z = 1700$ Н/м; $q_{л} = 200$ Н/м; $q_p = 200$ Н/м; $l_p = 1$ м; $v_{л} = 2$ м/с; натяжение ленты конвейера $S_{л} = 20000$ Н; натяжение опорного каната става $S_k = 30000$ Н; линейная жесткость амортизаторов $c = 15000$ Н/м². Средний ресурс

среднего t_{cp} и бокового t'_{cp} роликов определялись для различных типов роlikоопор согласно работе [12].

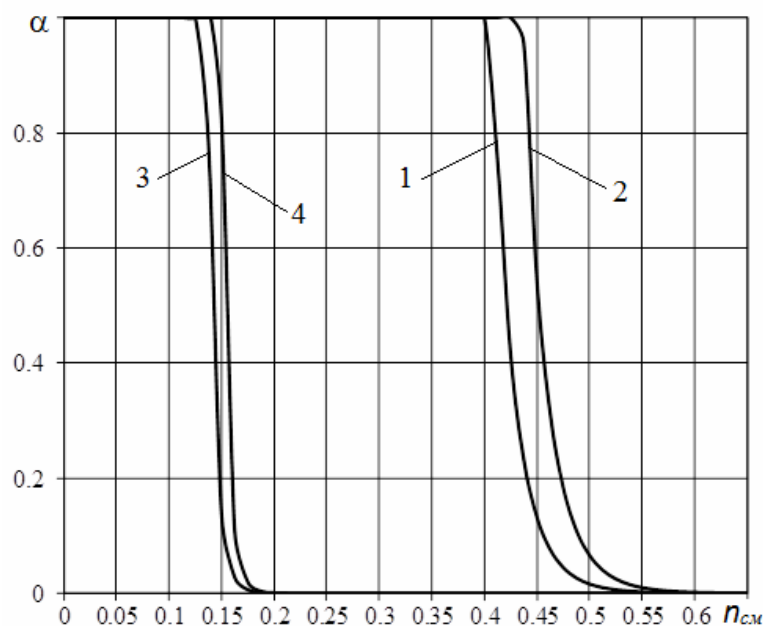


Рисунок 1 – Графики зависимости уровня надежности става α от среднего числа замен роликов в смену $n_{см}$

Из рисунка 1 видно, что для жестких роlikоопор (кривая 1) при увеличении среднего числа замен роликов в смену $n_{см}$ от 0 до 0,4, т.е. до числа роликов, вышедших из строя на стае ленточного конвейера, α принимает постоянное значение, равное 1. Это означает, что в этом диапазоне $n_{см}$ став ленточного конвейера ненадежен, т.е. количество нерабочих роликов при такой интенсивности их замен будет превышать допустимое значение n_1 .

При значениях $n_{см}$ от 0,4 до 0,56 α резко уменьшается до 0 и при значениях $n_{см} > 0,56$ принимает значение 0. Это означает, что при $n_{см} > 0,56$ став надежен, т.е. при таких значениях $n_{см}$ количество нерабочих роликов n_1 всегда будет меньше допустимого ($n_1 = 20$).

Для подвесных роlikоопор (кривая 2) став надежен при $n_{см} > 0,6$, а зона ненадежности става находится в диапазоне $0 < n_{см} < 0,45$.

Для подвесных амортизированных роlikоопор (кривая 4) став надежен при $n_{см} > 0,2$, а ненадежен при $0 < n_{см} < 0,14$.

Самое низкое значение порога надежности $n_{см}$ (т.е. минимального значения $n_{см}$, при котором став надежен) у амортизированных роlikоопор (кривая 3) – $n_{см} > 0,17$.

Соответственно для данных опор при $0 < n_{см} < 0,12$ став ненадежен.

На основании результатов исследований можно сделать следующие **выводы**.

1. На основании теории марковских процессов гибели и размножения определены показатели надежности става ленточного конвейера, характеризующие его живучесть, то есть уровень надежности става и среднее число замен роликков става в смену. При этом если интенсивность отказов больше либо равна интенсивности восстановлений роlikоопор, то уровень надежности става равен единице, т.е. став конвейера ненадежен и находится в нерабочем состоянии.

2. Установлено, что с увеличением среднего числа замен роликков уровень надежности става ленточного конвейера уменьшается от единицы до нуля в узком диапазоне значений числа замен роликков: от 0,4 до 0,6 шт./смену для жестких и подвесных роlikоопор и от 0,12 до 0,2 шт./смену – для амортизированных и подвесных амортизированных роlikоопор.

3. С увеличением длины конвейера, начиная со 100 метров, среднее число замен роликков в смену увеличивается линейно. При этом с увеличением среднего срока службы ролика среднее число замен роликков в смену уменьшается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шевченко А. В. Надежность и живучесть конвейерного става / А. В. Шевченко, Р. В. Кирия // Совершенствование горных машин. – Киев: Наукова думка, 1987. – С. 24–27.
2. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. – М.: Наука, 1978 – 400 с.
3. Флейшман Б. С. О живучести сложных систем / Б. С. Флейшман // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1966. – №5. – С. 14–23.
4. Гнеденко Б. В. Математические методы в теории надежности / Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. – М.: Наука, 1965. – 524 с.

5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения: учебное пособие / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: КНОРУС, 2010. – 480 с.
6. Саати Т. Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения / Т. Л. Саати. – М.: Советское радио, 1971. – 520 с.
7. Смирнов А. Н. Оценка надежности става ленточного конвейера и необходимого уровня его обслуживания / А. Н. Смирнов // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 1998. – Вып. 6. – С. 125–132.
8. Зенков Р.П. Машины непрерывного транспорта / Р.П. Зенков, И.Н. Ивашков, П.И. Колобов. – М.: Машиностроение, 1987.– 432 с.
9. Шахмейстер Л. Г. Теория и расчет ленточных конвейеров / Л. Г. Шахмейстер, В. Г. Дмитриев. – М.: Машиностроение, 1987. – 336 с.
10. J. Endrenyi. Reliability modeling in electric power system / John Wiley and Sons Ltd, NewYork, 1979. – 333 p.
11. Вентцель Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М.: Наука, 1991. – 384 с.
12. Монастырский В.Ф. Определение срока службы роликов ленточных конвейеров для различных типов роликоспор / В. Ф. Монастырский, Р. В. Кирия, А. Н. Смирнов // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 115. – С. 147–155.