УДК 622.643.2

К.А.ВАСИЛЬЕВ, И.И.МАРГОЛИН

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ МНОГОПРИВОДНОГО ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Многоприводный ленточный конвейер (МЛЛК) при анализе его надежности можно рассматривать как объект, состоящий из двух структурных элементов: системы приводов и комплекса всех остальных частей конвейера.

При заданной вероятности безотказной работы каждого элемента общая вероятность безотказной работы

$$P_{общ}(t)=P_{пр}(t)P_{кон}(t), \qquad (1)$$

где $P_{пр}(t)$ и $P_{кон}(t)$ – вероятности безотказной работы каждого из элементов в течение времени t.

Если известны коэффициенты готовности каждого из структурных элементов $K_{пр}$ и $K_{кон}$, то коэффициент готовности всего конвейера

$$K_{общ}=\frac{1}{\frac{1}{K_{пр}}+\frac{1}{K_{кон}}-1}=\frac{K_{пр}K_{кон}}{K_{пр}+K_{кон}-K_{пр}K_{кон}}. \qquad (2)$$

Очевидно, что в соответствии с уравнением (1) с увеличением числа приводов МЛЛК существенно падает его коэффициент готовности.

В существующих методиках расчета МЛЛК для повышения его надежности предусматривается в общее число приводов включать один дополнительный – резервный [1]. Очевидно, что введение дополнительного привода автоматически обеспечивает резерв прочности грузонесущей ленты конвейера и мощности электродвигателей его приводов.

МЛЛК с дополнительным промежуточным приводом при оценке его надежности можно рассматривать как конвейер с резервируемой системой приводов, при которой отказ одного или нескольких приводов не приводит к отказу всего конвейера. В существующей литературе отсутствует анализ и оценка надежности МЛЛК с резервируемыми приводами, равно как и обоснование их числа для конкретного многоприводного конвейера.

Предложенное выше расчленение МЛЛК на два структурных элемента позволяет проанализировать и дать оценку надежности конвейера на основе анализа резервируемой системы его приводов.

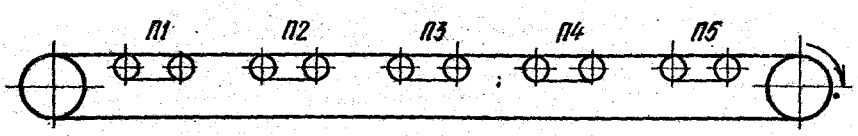


Рис.1. Структурная схема многоприводного ленточного конвейера

Многоприводные конвейеры обычно оснащаются несколькими приводами, располагаемыми вдоль става таким образом, чтобы нагрузка на приводы была одинаковой (рис.I). Это дает возможность комплектовать конвейер одинаковыми приводами. Каждый из приводов представляет собой достаточно сложную конструкцию, состоящую из значительного числа элементов, взаимодействующих последовательно, у которой отказ любого из элементов приводит к отказу привода. Это дает основание считать, что наработка до отказа каждого привода распределена экспоненциально с интенсивностью отказов λ. Будем считать, что конструкция приводов такова, что при выходе из строя любого привода немедленно может быть начато его восстановление. При этом конвейер находится в состоянии нормальной работы или в состоянии отказа. Если в процессе восстановления одного из приводов произойдет отказ еще одного или нескольких приводов, то это повлечет или не повлечет (в зависимости от характера резервирования) отказ всего конвейера. Вместе с тем восстановление второго отказавшего привода начнется только после восстановления первого и т.д., т.е. считается, что восстановление полностью ограничено. Считается также, что время восстановления распределено экспоненциально с интенсивностью восстановления μ.

Таким образом, при расчете надежности конвейера рассматривается экспоненциальная модель.

Если конвейер имеет n резервных приводов, то отказ конвейера в целом произойдет при отказе $n+1$ промежуточных приводов. При этом возможны два варианта: I) последовательность расположения отказавших приводов не влияет на работоспособность конвейера в целом; 2) последовательность расположения отказавших приводов существенно влияет на работоспособность конвейера в целом.

Рассмотрим характер резервирования приводов, приводящий к тому или иному случаю.

I. Отсутствует резерв по суммарной мощности приводов или по коэффициенту запаса прочности ленты. В этом случае отказ любого привода приведет к перераспределению нагрузки отказавшего привода между остальными приводами и, следовательно, к их перегрузке. Характер распределения нагрузки между промежуточными приводами при отказе любых приводов может быть определен по методике [3]. По этой же методике может быть определено максимальное натяжение грузонесущей ленты в точке наб гания ее на привод. Очевидно, что при равномерном расположении всех приводов вдоль трассы конвейера отказ одного из приводов приведет к возрастанию примерно в два раза максимального натя-

жения грузонесущей ленты в точке набегания ее на привод, установленный вслед за отказавшим. Примерно в два раза окажется уменьшенным и запас прочности грузонесущей ленты на этом участке вследствие ее перетяжки. На последующих участках, ведомых приводами, степень перетяжки грузонесущей ленты будет уменьшаться в направлении ее движения.

При отсутствии резерва мощности электродвигателей и прочности ленты отказ любого из промежуточных приводов естественно приведет к отказу всего конвейера.

2. Имеется запас мощности, равный по величине мощности одного, двух или n приводов, а также такой запас прочности тягового органа или возможность его снижения на период восстановления, при котором отказ одного, двух или n приводов не приводит к отказу многоприводного конвейера. Отказ конвейера произойдет только при отказе $n+1$ приводов, произвольно расположенных вдоль трассы.

3. Имеется запас мощности (как в случае 2) и такой запас прочности ленты, что допускается отказ последовательно расположенных одного, двух и т.д. приводов. Отказ конвейера произойдет только при отказе $n+1$ приводов при условии, что эти приводы расположены обязательно последовательно, при этом отказ последовательно расположенных приводов может происходить в любой очередности.

Определим показатели надежности конвейера для рассматриваемых случаев.

I. Конвейер имеет общее число приводов N, число рабочих приводов K, число резервных приводов n. В рассматриваемом случае, когда отказ любого привода приводит к отказу всего конвейера, $K=N$.

Обозначим: H_0 – состояние системы, в которой все приводы исправны; H_1 – состояние системы с одним неисправным приводом; λ, μ – соответственно интенсивности отказов и восстановления каждого привода.

Граф состояний и соответствующие системы дифференциальных уравнений в этом случае имеют вид:

при состоянии H_1 поглощающем

$$H_0 \xrightarrow{K\lambda} H_1,$$

$$P_0'(t) = -K\lambda P_0(t), \quad P_1'(t) = K\lambda P_0(t); \tag{3}$$

при состоянии H_1 отражающем

$$H_0 \underset{\mu}{\overset{K\lambda}{\rightleftarrows}} H_1,$$

$$P_0'(t) = -K\lambda P_0(t) + \mu P_1(t), \quad P_1'(t) = K\lambda P_0(t) - \mu P_1(t). \tag{4}$$

Решим соответствующие системы дифференциальных уравнений при начальных условиях $t = 0$, $P_0(t) = 1$, $P_1(t) = 0$.

При состоянии H_1 поглощающем следует, что вероятность безотказной работы конвейера в течение времени t

$$P_0(t) = e^{-K\lambda t}; \tag{5}$$

вероятность отказа конвейера в течение времени t

$$P_1(t) = 1 - e^{-K\lambda t} \tag{6}$$

Из уравнений для состояния H_1 отражающего при начальных условиях $t_0 = 0$, $P_0(t) = 1$, $P_1(t) = 0$ получаем вероятность нахождения конвейера в момент времени t в исправном состоянии

$$P_0(t) = \frac{K\lambda}{\mu + K\lambda} \cdot e^{-(\mu + K\lambda)t} + \frac{\mu}{\mu + K\lambda}.$$

Обозначив

$$\frac{K\lambda}{\mu + K\lambda} = K_0, \quad \frac{\mu}{\mu + K\lambda} = K_\Gamma,$$

получим

$$P_0(t) = K_0 e^{-(\mu + n\lambda)t} + K_\Gamma. \tag{7}$$

Вероятность нахождения конвейера в момент времени t в состоянии простоя

$$P_1(t) = \frac{K\lambda}{\mu + K\lambda} - \frac{K\lambda}{\mu + K\lambda} e^{-(\mu + K\lambda)t} = K_0\left(1 - e^{-(\mu + K\lambda)t}\right). \tag{8}$$

Коэффициент готовности конвейера получается из формулы (7) при

$$K_\Gamma = \frac{\mu}{\mu + K\lambda}. \tag{9}$$

Соответственно, коэффициент простоя получается из формулы (8) при $t \to \infty$:

$$K_0 = \frac{K\lambda}{\mu + K\lambda}. \tag{10}$$

2. Конвейер имеет N приводов. Принимаемое число исправных приводов, произвольно расположенных вдоль трассы, при которых конвейер находится в работоспособном состоянии, K; максимальное число отказавших приводов, при котором конвейер сохраняет работоспособное состояние, $И = N - K$. Обозначим состояние систем с i отказавшим приводами через H_i. Естественно, что $0 \leq i \leq n+1$. Граф переходов для такого конвейера при состоянии H_{n+1} поглощающем имеет вид

$$H_0 \xleftarrow{\frac{\lambda N}{\mu}} H_1 \xleftarrow{\frac{\lambda(N-1)}{\mu}} H_2 \xleftarrow{\frac{\lambda(N-2)}{\mu}} \cdots \xleftarrow{\frac{\lambda(N-K)}{\mu}} H_{n+1}.$$

Соответствующая данному графу состояний система дифференциальных уравнений

$$P_0'(t) = -\lambda N P_0(t) + \mu P_1(t);$$

$$P_1'(t) = \lambda N P_0(t) - [\lambda(N-1)+\mu] P_1(t) + \mu P_2(t);$$

$$P_2'(t) = \lambda(N-1) P_1(t) - [\lambda(N-2)+\mu] P_2(t) + \mu P_3(t); \qquad (11)$$

$$P_n'(t) = \lambda(N+K+1) P_{n-1}(t) - [\lambda(N-n)+\mu] P_n(t);$$

$$P_{n+1}'(t) = \lambda(N+K) P_n(t).$$

Граф состояний системы для состояния H_{n+1} отражающего имеет вид

$$H_0 \xrightarrow{\lambda H} H_1 \underset{\mu}{\xrightarrow{\lambda(N-1)}} H_2 \underset{\mu}{\xrightarrow{\lambda(N-2)}} \dots \underset{\mu}{\xrightarrow{\lambda(N-n)}} H_{n+1}.$$

Соответствующая данному графу система дифференциальных уравнений будет отличаться от предыдущей системы только двумя последними уравнениями, которые примут вид

$$P_k'(t) = \lambda(N-n+1) P_{n-1}(t) - [\lambda(N-n)+\mu] P_n(t) + \mu P_{n+1}(t);$$
$$P_{n+1}'(t) = \lambda(N-n) P_n(t) - \mu P_{n+1}(t). \qquad (12)$$

Коэффициент готовности равен нестационарному коэффициенту готовности при $t \to \infty$

$$K_г = \frac{1}{1+\left(\frac{\theta_{n+1}}{\sum_{i=1}^{n} \theta_i}\right)}, \qquad (13)$$

где $\theta_i = \dfrac{\lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{i-1}}{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_i}$, $\theta_0 = 1$.

3. Конвейер имеет N приводов. Минимальное число исправных приводов, при котором конвейер сохраняет работоспособное состояние, K, при условии, что число последовательно расположенных отказавших приводов не превышает заданного их числа l. Конвейер неработоспособен, если число отказавших и последовательно расположенных приводов превышает заданное число l, даже если общее число отказавших приводов $l+1 \leq N-K$.

Графы переходов для данной системы полностью аналогичны графам для случая 2, однако в каждом состоянии системы H_e имеются случаи, когда система остается в работоспособном состоянии или попадает в неработоспособное состояние. Выделить различные состояния системы можно путем перебора вариантов. Рассмотрим конкретный случай, когда конвейер имеет пять приводов (см. рис.1), а неработоспособное состояние конвейера наступит при отказе двух приводов, расположенных последовательно.

Состоянию H_0 соответствует случай, когда все приводы исправны.

Состоянию H_1 соответствуют случаи, когда отказывает любой из приводов, т.е.

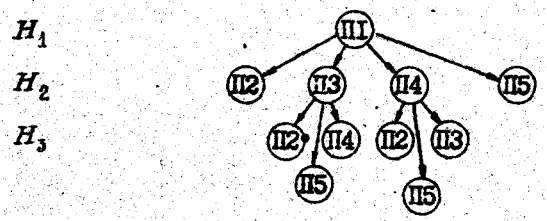
П1 П2 П3 П4 П5

Состояние H_1 является работоспособным состоянием.

Состоянию H_2 соответствует случай отказа любого из приводов, кроме отказавшего в состоянии H_1.

Например, при отказавшем приводе П1 конвейер находится в состоянии H_1 и переход в состояние H_2 может произойти при отказе приводов П2, П3, П4, П5.

Выделим на схеме, приведенной ниже, кружками случаи отказов, т.е. случаи, когда отказывают два последовательно расположенных привода,



Из схемы видно, что в состоянии H_2 только два случая (отказы П2 и П5) из четырех приводят к отказу конвейера. Так как отказы приводов являются равновероятными, то вероятность отказа в состоянии H_2 равна $0{,}5P_2(t)$ и, соответственно, вероятность безотказной работы также равна $0{,}5P_2(t)$.

Первым может отказать любой из приводов, но при этом в представленной схеме изменится только нумерация приводов и поэтому можно утверждать, что при многоприводном конвейере с пятью приводами отказ двух приводов приводит к отказу конвейера с вероятностью $0{,}5 \cdot P_2(t)$, где $P_2(t)$ – вероятность попадания системы в состояние H_2.

Соответственно, отказ трех приводов всегда приводит к отказу конвейера и вероятность этого события равна $P_3(t)$.

Приведенные рассуждения справедливы как для состояния отказа отражающего, так и для состояния отказа поглощающего.

В соответствии с изложенным выше произведена численная оценка показателей надежности многоприводного ленточного конвейера с пятью промежуточными приводами, работающими в одинаковом режиме, для рассмотренных трех случаев.

При оценке надежности отношение интенсивности отказов к интенсивности восстановления каждого привода принято равным $1/\mu = 0{,}1$. Вероятность безотказной работы конвейера и вероятность его отказа в течение времени t при отсутствии резервных приводов определена соответственно по формулам (5) и (6). Вероятность безотказной работы конвейера с одним и двумя резервными приводами определена по уравнениям (12).

Коэффициенты готовности конвейеров для всех рассматриваемых случаев определены по формуле (13). Результаты расчета надежности конвейера приведены ниже:

Число резервных приводов	Вероятность безотказной работы $P(t)$	Коэффициент готовности приводной системы
0	$p_0^{(0)}(t) = e^{-0,5t}$	0,667
1	$p_0^{(1)}(t) = 1,0667\ e^{-0,1118t} - 0,0667\ e^{-1,6881t}$	0,882
2	$p_0^{(2)}(t) = 1,0864\ e^{-0,02756t} - 0,0867\ e^{-0,3650t} + 0,0003\ e^{-5,9800}$	0,966

Эти данные свидетельствуют о том, что при отсутствии резервных приводов коэффициент готовности МПЛК, равный 0,667, не превышает коэффициента готовности конвейерной линии, состоящей из каскада последовательно установленных конвейеров [I]. Установка одного резервного привода повышает коэффициент готовности до 0,882, т.е. весьма существенно. Установка двух резервных приводов повышает коэффициент готовности МПЛК до уровня коэффициеента готовности обычного конвейера.

Если отказ конвейера имеет место при отказе двух последовательно расположенных приводов, то вероятность безотказной работы приводной системы

$$p_0^{(1,2)} = \frac{p_0^{(1)} + p_0^{(2)}}{2}$$

и коэффициент готовности

$$K_г^{(1,2)} = \frac{0,882 + 0,966}{2} = 0,924.$$

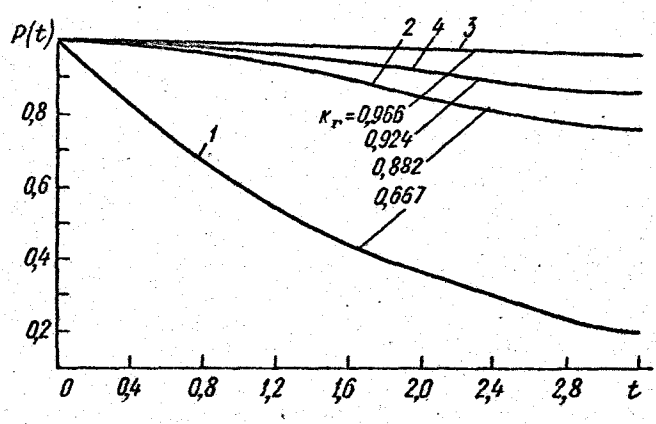


Рис.2. Графики вероятности безотказной работы многоприводного ленточного конвейера с пятью приводными блоками ($\lambda = 0,1$; $\mu = 1$) в зависимости от времени эксплуатации

1 – при отсутствии резервных приводных блоков; 2 – при одном резервном приводном блоке; 3 – при двух резервных приводных блоках; 4 – отказе двух последовательно установленных приводов

Графики функций $P^{(0)}$, $P_0^{(1)}$, $P_0^{(2)}$, $P_0^{(1,2)}$ представлены на рис.2.

Предложенная методика оценки надежности МПЛК использована при разработке исходных требований на разработку многоприводного ленточного конвейера с промежуточным вакуум-приводом длиной 3000 м, предназначенного для замены трех последовательно установленных конвейеров 1Л120 на калийном руднике АО "Уралкалий" [2].

Расчетный коэффициент готовности конвейерной линии из трех конвейеров составил 0,837 при коэффициенте готовности каждого конвейера 0,95. Коэффициент готовности МПЛК с пятью вакуум-приводами (один резервный), для которых коэффициент готовности каждого был принят 0,91, составил 0,85, что превышает коэффициент готовности конвейерной линии даже при столь низком принятом коэффициенте готовности вакуум-приводов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильев К.А., Марголин И.И. Основные направления совершенствования панельных конвейерных линий калийных рудников // Рациональные средства и системы механизации калийных рудников: Сб. науч. трудов / ВНИИГ. Л., 1984.

2. Исходные требования на разработку многоприводного ленточного конвейера длиной 3000 м для калийных рудников: Отчет о НИР / Ленинградский горный ин-т; Руководитель К.А.Васильев; № ГР 01860020322. Л., 1988.

3. Марголин И.И., Васильев К.А. Распределение нагрузки между приводами многоприводного ленточного конвейера // Зап. ЛГИ. 1987. Т. 110.