

ОЦЕНКА УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ТРАНСПОРТИРОВКИ ГИДРОСМЕСИ

Ватлина А.М., Коржев А.А.

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург

Ключевые слова: гидротранспорт, надежность, концентрация, пульпа, резервирование, грунтовый насос, система гидротранспорта.

Аннотация. Рассмотрен вопрос о причинах отказов технологического оборудования при транспортировке пульпы на горно-обогатительных комбинатах. Определено, что необходимо применять различные методы, позволяющие повысить надежность систем гидротранспорта и грунтовых насосов, входящих в эти системы. Описаны методы, которыми следует пользоваться при разработке режимов работы систем гидротранспорта. Определены показатели надежности, влияющие на условия эксплуатации систем на основании известных теоретических сведений. Приведен пример графа, включающего в себя параметры, влияющие на интенсивность отказов по времени. Представлена система линейных дифференциальных уравнений, которую можно использовать при прогнозировании вероятности отказов систем гидротранспорта. Сформулировано предположение, об интенсивности отказов постоянна во времени. Приведена формула для решения системы уравнений для расчета вероятности безотказной работы системы гидротранспорта.

EVALUATING THE RELIABILITY OF THE SLURRY TRANSPORT SYSTEM

Vatlina A.M., Korzhev A.A.

Saint-Petersburg mining university, Saint-Petersburg

Keywords: hydraulic transport, reliability, concentration, pulp, redundancy, ground pump, hydraulic transport system.

Abstract. The question of the causes of failures of technological equipment during the transportation of pulp at mining and processing plants is considered. It is determined that it is necessary to apply various methods to improve the reliability of hydraulic transport systems and ground pumps included in these systems. The methods that should be used in the development of modes of operation of hydraulic transport systems are described. Reliability indicators affecting the operating conditions of the systems are determined on the basis of known theoretical information. An example of a graph is given that includes parameters that affect the failure rate over time. A system of linear differential equations is presented, which can be used to predict the probability of failures of hydraulic transport systems. The assumption is formulated that the failure rate is constant over time. The formula for solving a system of equations for calculating the probability of trouble-free operation of the hydraulic transport system is given.

Введение. На горно-обогатительных предприятиях для транспортировки полезных ископаемых используются системы гидротранспорта, включающие в себя грунтовые насосы [1-3]. Данные системы могут использоваться при транспортировании гидросмеси в составе закладочных комплексов. Системы гидротранспорта должны отвечать требованию надежности, то есть сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, от которых требуется выполнение определенных функций при заданных условиях эксплуатации. Так же нужно стремиться к системам, в которых нет сложного технического обслуживания, а в случае выхода оборудования из строя, есть возможность быстро отремонтировать либо заменить нерабочий узел. Долгий ремонт, простой оборудования, невозможность отремонтировать важный узел оперативно – все эти факторы влияют на энергетические затраты и приносят убытки предприятиям, поэтому важно знать, насколько рассчитан ресурс оборудования, предположительные сроки ремонта или полной замены.

Рассмотрим укрупненно затраты на техническое обслуживание пульповодов на примере существующей системы гидротранспорта хвостов Качканарского ГОКа в эксплуатации. В непрерывной работе на ГОКе находится четыре нитки пульповодов, эквивалентных средней протяженности трубы 5600м, каждая, в том числе протяженность участка магистрального и

распределительного пульповода составляет – 2000м и 3600м соответственно, в каждой трубе пульповода.

Технологическая цепочка гидротранспорта протяженностью 5600м находится в работе – 8688 ч в год.

Для стабильной и безаварийной работы системы гидротранспорта хвостов обогащения необходимо ежегодно восполнять потери в весе трубопровода, приходящегося на гидроабразивный износ.

Интенсивность гидроабразивного изнашивания стальной трубы, при гидротранспорте хвостов, по данным замеров службы эксплуатации хвостового хозяйства составляет 1,5 мм за 1000 ч работы пульповода.

Таким образом, за годичный период работы, толщина износа стенки стального пульповода составит порядка 13 мм, следовательно, вес метра погонного изнашиваемой части пульповода за год составляет – 322.84кг (322.84-масса метра погонного стальной трубы DN1020x13мм).

При средней протяженности одной технологической цепочки гидротранспорта – 5600м, средняя масса изнашиваемой части магистрального и распределительного трубопровода составит 646т и 1162т соответственно.

Так как, в постоянной работе находится четыре нитки пульповодов, следовательно, суммарный вес изнашиваемой части магистральных и распределительных пульповодов за год эксплуатации составляет 2584т и 4648т соответственно.

Расчетные годовые потери веса магистральных пульповодов в размере 2584т в год соответствуют пульповоду 6.52км.

Расчетные годовые потери веса распределительных пульповодов в размере 4648т в год эквивалентны пульповоду 11.73км.

Таким образом, для надежной работы системы гидротранспорта необходимо осуществить закупку 18.25км стальных труб.

Объем перекладки распределительных пульповодов в среднем составляет порядка 30 км в год. Таким образом, суммарный объем перекладки пульповодов 36.52 км

При стоимости переукладки пульповодов 1500 руб. за метр погонный суммарные затраты на техническое обслуживание пульповодов составят более 350 10⁶ руб. в год [4]. Таким образом, вопрос надежности трубопроводных систем закладочных комплексов является весьма актуальным.

Для минимальных эксплуатационных и энергетических затрат требуется минимизация возможных отказов такой системы, что возможно, например, применением резервирования элементов системы. Для прогнозирования наработки между отказами важно учитывать влияющие на систему факторы для наиболее точного прогноза. В связи с этим актуальной задачей является оценка уровня влияния последних на безотказность гидротранспортной системы, формализовать их учет в аналитических выражениях для оперативной оценки уровня работоспособности системы [5-8].

Теоретические исследования. В системах гидравлического транспорта, применяемых в горной промышленности, имеют место быть ресурсные, постепенные отказы технологического оборудования, имеющие высокую интенсивность [9, 10]:

- 1) гидроабразивный износ внутренних поверхностей насосов и оборудования;
- 2) коррозия рабочих элементов;
- 3) усталостный износ элементов, подвергаемых знакопеременным нагрузкам;
- 4) прочие виды выхода из строя насосных установок (в частности отказы электрооборудования).

Ответственное положение гидротранспортных систем в технологическом процессе переработки полезного ископаемого (отказ системы гидротранспорта часто приводит к остановке всего технологического цикла) вынуждает использовать разнообразные методы, повышающие надежность работы гидротранспортных систем и насосных установок. Не рассматривая пользу от диагностики оборудования [11], подходы, применяемые при

конструировании и проектировании оборудования систем гидротранспорта, остановимся только на широко используемом в практике формировании систем горно-обогатительного оборудования, в частности способе обеспечения надежности объекта за счет использования дополнительных средств или возможностей сверх минимально необходимых для выполнения требуемых функций – резервирование.

При разработке рабочих режимов работы систем гидротранспорта применяется как резервирование без восстановления, так и резервирование с восстановлением. При резервировании без восстановления отказ любого элемента приводит к отказу всей системы; при резервировании с восстановлением – при котором восстановление отказавших основных или резервных элементов технически возможно без нарушения работоспособности гидротранспортной системы в целом и предусмотрено эксплуатационной документацией. Как известно из теории надежности, второй способ резервирования обеспечивает более высокую надежность всей системы или установки при условии, что переключающие элементы (в данном случае задвижки) обеспечивают высокий уровень надежности [12]. В процессе эксплуатации любых систем, а особенно тех, для которых важна непрерывная безотказная работа необходимо применять резервирование с восстановлением, при котором не нарушается работоспособность объекта.

Гидротранспортные установки характеризуются тремя режимами работы в отношении задействования общего резервирования:

- 1) ненагруженный резерв (резервная линия включается после отказа основной);
- 2) облегченный резерв (одна из резервных линий работает с меньшей производительностью);
- 3) нагруженный резерв (обе линии основная и резервная работают в одном режиме и периодически могут отключаться).

Как известно, резервирование позволяет создать из малонадежных элементов высоконадежную систему, однако вероятность безотказности работы будет всегда меньше единицы. В связи с этим возникает задача определения показателей надежности резервируемой гидротранспортной системы.

Предположим, что система состоит из n_1 рабочих элементов (насосов, трубопроводов, запорной арматуры и т.д.) и n_2 резервных элементов: $N=n_1+n_2$. Предполагается, что каждый отказавший элемент практически сразу же после отказа обнаруживается и заменяется резервным из имеющихся n_2 резервных. Отказ системы произойдет тогда, когда число исправных элементов станет меньше n_1 , т.е. откажет n_2+1 элемент. При отказе одна из имеющихся m ремонтных бригад приступает к ремонту отказавшего оборудования. Если отказано более m элементов, то возникнет очередь на ожидание ремонта. Будем считать, что все ремонтные бригады одинаковы, стабильны по составу и обеспечивают восстановление со средним временем восстановления T_0 . Многочисленные наблюдения показывают, что время восстановления имеет обычно логарифмически-нормальное распределение. Но при условии, что среднее время восстановления значительно меньше средней наработки на отказ, можно считать, что время восстановления имеет экспоненциальное распределение. Элементы гидротранспортной системы конструктивно сложны и состоят из значительного числа деталей. Это дает основание считать, что интенсивность отказов постоянна во времени и равно $\lambda=(T_{cp})^{-1}$ при установлении режима работы.

Обозначим через H_i состояние системы с i отказавшими элементами. Тогда граф переходов системы из одного состояния в другое (состояние H_{n_2+1} – отражающее) будет иметь вид:

$$\begin{array}{ccccccc}
 H_0 & \xrightarrow{n_1\lambda} & H_1 & \xrightarrow{n_1\lambda} & H_2 \dots & H_{n_2} & \xrightarrow{n_1\lambda} & H_{n_2+1}, \\
 & \xleftarrow{\mu} & & \xleftarrow{2\mu} & & \xleftarrow{m\mu} & &
 \end{array} \quad (1)$$

где μ – интенсивность восстановления.

Если принять, что состояние H_{n_2+1} – поглощающее, то фрагмент графа, включающий состояние H_{n_2+n} и H_{n_2+1} будет иметь вид:

$$\begin{array}{ccccccc}
 H_0 & \xrightarrow{n_1\lambda} & H_1 & \xrightarrow{n_1\lambda} & H_2 \dots & H_{n_2} & \xrightarrow{n_1\lambda} & H_{n_2+1} & \xrightarrow{2\lambda} & H_{N-1} & \xrightarrow{\lambda} & H_N.
 \\
 & \xleftarrow{\mu} & & \xleftarrow{2\mu} & & \xleftarrow{m\mu} & & \xleftarrow{m\mu} & & & &
 \end{array} \quad (2)$$

Остальные части графа не будут отличаться от состояния (1). Для графа переходов (1) можно написать систему линейных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned}
 P'_0(t) &= n_1\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \\
 P'_1(t) &= n_1\lambda P_0(t) - (n_1\lambda + \mu)P_1(t) + 2\mu P_2(t); \\
 P'_2(t) &= n_1\lambda P_0(t) - (n_1\lambda + 2\mu)P_2(t) + 3\mu P_3(t); \\
 &\dots \\
 P'_{n_2}(t) &= n_1\lambda P_{n_2-1}(t) - (n_1\lambda + m\mu)P_{n_2}(t) + m\mu P_{n_2+1}(t); \\
 P'_{n_2+1}(t) &= n_1\lambda P_{n_2}(t) - m\mu P_{n_2+1}(t);
 \end{aligned}$$

где λ – интенсивность отказов, μ – интенсивность восстановления.

Если состояние H_{n_2+1} – поглощающее, то система дифференциальных уравнений будет отличаться от предыдущей только двумя последними уравнениями, которые имеют вид:

$$\begin{aligned}
 P'_n(t) &= n_2\lambda P_{n_2-1}(t) - (n_1\lambda + m\mu)P_n(t), \\
 P'_{n_2+1}(t) &= n_1\lambda P_{n_2}(t).
 \end{aligned}$$

Если используется система уравнений для случая, когда состояние H_{n_2+1} – отражающее, то в результате решения получатся вероятности $P_i(t)$ пребывания системы в некотором состоянии H_i , а сумма вероятностей состояний $H_0, H_1, \dots, H_{n_2}$ есть вероятность безотказной работы системы.

При использовании системы, когда состояние H_{n_2+1} – поглощающее, сумма указанных вероятностей есть коэффициент готовности системы.

Начальные условия для системы дифференциальных уравнений при $t=0$ есть вероятности нахождения гидротранспортной установки в каждом из состояний. Естественно, что сумма этих вероятностей равна единице. Если установка начинает работать полностью исправной, т.е. началу работы соответствует состояние H_0 , то

$$P_0 = 1; P_1 = P_2 = P_3 = \dots = P_{n_2+1} = 0..$$

Из свойства линейных дифференциальных уравнений следует, что при $t \rightarrow \infty$ все вероятности P_i стремятся к некоторым установившимся значениям и, следовательно, при достаточно большом времени t производные $P'_i(t) \rightarrow 0$ и система дифференциальных уравнений превращается в алгебраическую систему. При состоянии H_{n_2+1} – отражающем

$$\begin{aligned}
 n_1\lambda P_0 &= \mu P_1; \\
 (n_1\lambda + \mu)P_1 &= n_1\lambda P_0 + 2\mu P_2; \\
 (n_1\lambda + 2\mu)P_2 &= n_1\lambda P_1 + 3\mu P_3; \\
 &\dots \\
 (n_1\lambda + m\mu)P_{n_2} &= n_1\lambda P_{n_2-1} + m\mu P_{n_2+1}; \\
 m\mu P_{n_2+1} &= n_1\lambda P_{n_2}.
 \end{aligned}$$

При состоянии H_{n_2+1} – поглощающем изменения коснутся только двух последних уравнений, которые будут иметь вид:

$$(n_1\lambda + m\mu)P_{n_2} = n_2\lambda P_{n_2-1};$$

$$\sum_{i=0}^{n_2+1} P_i = 1.$$

Решение приведенных уравнений (система алгебраических уравнений) будет следующим:

$$P_i = \frac{\theta_i}{\sum_{K=0}^N \theta_K},$$

$$\text{где } \theta_i = \frac{\lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{i-1}}{\mu_1 \mu_2 \dots \mu_i}.$$

Индексы при λ и μ соответствуют индексу состояния, от которого направлены соответствующие переходы из одного состояния в другое.

Выводы. В результате проведенных теоретических исследований, получены уравнения, которые можно применять при расчете надежности систем гидротранспорта на горно-обогатительных предприятиях при транспортировке гидросмеси в составе закладочных комплексов. Определены показатели надежности резервируемой гидротранспортной системы, учитывающей рабочие и резервные элементы (насосы, запорная арматура и т.д.), ремонтные бригады, среднее время восстановления после ремонта. Данные параметры включены в уравнения для оценки надежности системы, на основании которых возможно получить информацию о вероятности отказов. Это важно для наиболее эффективного использования систем гидротранспорта для закладочного комплекса, для снижения эксплуатационных и энергетических затрат.

Список литературы

1. Александров В.И., Собота И. Вибродиагностика технического состояния грунтовых насосов // Записки Горного института. 2016. – Т. 218. – С. 242-250.
2. Уразаков К.Р., Топольников А.С. Комплексный показатель надежности насосного оборудования // Нефтяное хозяйство. – 2009. – № 1. – С. 78-81.
3. ГОСТ Р 27.013-2019 (МЭК 62308:2006) Надежность в технике. Методы оценки показателей безотказности. – М.: Стандартинформ, 2019. – 46 с.
4. Александров В.И., Васильева М.А. Гидротранспорт сгущенных хвостов обогащения железной руды на Качканарском ГОКе по результатам опытно-промышленных испытаний системы гидротранспорта // Записки Горного института. – 2018. – Т. 233. – С. 471-479.
5. Пермяков В.Б., Анферов В.Н., Кузнецов С.М., Васильев С.И. Оценка надежности работы гидротранспортных систем // Системы. Методы. Технологии. – 2013. – № 3 (19). – С. 25-34.
6. Анферов В.Н., Кузнецов С.М., Васильев С.И. Имитационная модель оценки организационно-технологической надежности работы стреловых кранов // Известия вузов. Строительство. – 2013. – №1. – С. 70-78.
7. Анушенков А.Н. Производство закладочных работ. На примере Таштагольского подземного рудника: учеб. пособие. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2016. – 136 с.
8. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ. – М.: Либроком, 2013. – 584 с.
9. Капустин Д.А., Сентяй Р.Н., Швыров В.В., Орешкин М.В., Ермак В.П. Факторы влияющие на надежность работы гидротранспортной системы // Вестник Луганского национального университета им. В. Даля. – 2019. – №11(29). – С. 67-70.
10. Жуматаев А.К., Олжабаев Р.О. Повышение надежности оборудования // Наука и техника Казахстана. – 2010. – №2. – С. 52-54.
11. Bolshunova O.M., Kamyshian A.M., Bolshunov A.V. Diagnostics of career dump truck traction induction motors technical condition using wavelet analysis // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2016, no. 1, pp. 1-4.
12. Бекаев А.А., Максимов Ю.В., Строков П.И., Мусакова Т.В., Папонов А.В. Повышение функциональной надежности гидропривода грузоподъемных устройств // Известия МГТУ МАМИ. – 2014, №2. – с. 8-13.

References

1. Aleksandrov V.I., Sobota I. Vibrodiagnostics of the technical state slurry pumps // Journal of Mining Institute. 2016, vol.218, pp. 242.
2. Urazakov K.R., Topol'nikov A.S. The Complex Index of Reliability for Pumping Equipment // Oil Industry. 2009, no. 1, pp. 78-81.
3. IEC 62308:2006, Equipm ent reliability. Reliability assessment methods, MOD.

4. Aleksandrov V.I., Vasilyeva M.A. Hydrotransport of thickened tailings of iron ore beneficiation at Kachkanarsky GOK based on the results of pilot tests of the hydrotransport system // Journal of Mining Institute. 2018, vol. 233, pp. 471-479.
5. Permyakov V.B., Anferov V.N., Kuznetsov S.M., Vasil'yev S.I. Assessment of hydrotransport systems reliable performance // Systems. Methods. Technologies. 2013, no. 3 (19), pp. 25-34.
6. Anferov V.N., Kuznetsov S.M., Vasilev S.I. Imitating model of an estimation of organizational-technological reliability of work cranes // News of higher educational institutions. Construction. 2013, no. 1, pp. 70-78.
7. Anushenkov A.N. Production of laying works. On the example of the Tashtagol underground mine: study guide. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2016. – 136 p.
8. Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solov'ev A.D. Mathematical Methods in the Theory of Reliability. Main Characteristics of Reliability and Their Statistical Analysis. – M.: Librokom Publ., 2013. – 584 p.
9. Kapustin D.A., Sentyai R.N., Shvyrov V.V., Oreskin M.V., Ermak V.P. Factors influencing the reliability operation of a hydraulic transport system // Bulletin of Vladimir Dahl Luhansk National University state university. 2019, no. 11(29), pp. 67-70.
10. Zhumataev A.K., Olzhabaev R.O. Improving the reliability of equipment // Science and Technology of Kazakhstan. 2010, no. 2, pp. 52-54.
11. Bolshunova O.M., Kamyshian A.M., Bolshunov A.V. Diagnostics of career dump truck traction induction motors technical condition using wavelet analysis // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2016, no. 1, pp. 1-4.
12. Bekaev A.A., Maximov Yu.V., Stokov P.I., Musakova T.V., Paponov A.V Increase of functional reliability of hydraulic actuator of load-lifting devices // News of the Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI). 2014, no. 2, pp. 8-13.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Коржев Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент	Korzhev Alexander Alexandrovich – candidate of technical sciences, associate professor
Ватлина Анна Михайловна – аспирант	Vatlina Anna Mikhailovna – postgraduate student
vatlina.anka@yandex.ru	

Получена 08.06.2022