

УДК 621.3.019, 681.51, 62.52, 622.73
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4306

Приближенное решение задачи оптимального резервирования сложной технологической системы измельчения руды

С.Ш. Баласаян[✉], Э.М. Геворгян

Капанский филиал Национального политехнического университета Армении, Армения, г. Капан

[✉]seyran@sunicom.net

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью повышения надежности и эффективности функционирования технологической системы измельчения руды путем поэлементного оптимального нагруженного резервирования ее элементов. *Цель:* обоснование необходимости повышения эффективности функционирования технологической системы измельчения руды путем оптимального резервирования и приближенное решение следующих задач: 1) максимизировать эффективность функционирования сложной системы измельчения руды путем поэлементного нагруженного резервирования при ограничении, наложенном на технико-экономический показатель системы; 2) минимизировать технико-экономический показатель системы измельчения руды при заданном значении показателя эффективности ее функционирования. *Объект:* технологическая система измельчения руды, рассмотренная как система со многими работоспособными состояниями (multi-state system), элементы которой обладают лишь двумя возможными состояниями. Рассматриваемая система зарезервирована способом поэлементного нагруженного резервирования. *Методы:* метод оценки эффективности функционирования систем со многими состояниями, метод неопределенных множителей Лагранжа. *Результат.* Получено приближенное значение показателя эффективности функционирования технологической системы измельчения руды со многими работоспособными состояниями, элементы которой обладают лишь двумя возможными состояниями. Рассмотрены задачи оптимального резервирования сложной технологической системы измельчения руды. Получены приближенные решения указанных задач методом неопределенных множителей Лагранжа, которые могут быть использованы при ориентировочных расчетах на этапе проектирования сложных технологических систем измельчения руды. Рассмотрена также задача оптимального резервирования, когда из m элементов сложной системы измельчения руды можно зарезервировать только n элементов. Учитывая определенные допущения для эффективности функционирования системы, зарезервированной способом поэлементного нагруженного резервирования, получено приближенное решение этой задачи.

Ключевые слова: надежность, эффективность функционирования, оптимальное резервирование, система измельчения руды, метод множителей Лагранжа

Для цитирования: Баласаян С.Ш., Геворгян Э.М. Приближенное решение задачи оптимального резервирования сложной технологической системы измельчения руды // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 5. – С. 59–65. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4306

UDC 621.3.019, 681.51, 62.52, 622.73
DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4306

Approximate solution of the problem of redundancy optimization of a complex technological ore grinding system

S.Sh. Balasanyan[✉], H.M. Gevorgyan

Kapan branch of the National Polytechnic University of Armenia, Kapan, Armenia

[✉]seyran@sunicom.net

Abstract. *Relevance.* The need to improve the reliability and efficiency of the technological ore grinding system by element-by-element optimal loaded redundancy of its elements. *Aim.* To substantiate the need to improve the efficiency of the ore grinding technological system functioning by optimal redundancy; to find out an approximate solution of the following prob-

lems: 1) to maximize the efficiency of the ore grinding complex system functioning by element-by-element loaded redundancy limited, superimposed on the technical and economic indicator of the system; 2) to minimize technical economic indicator of the ore grinding system at the set value of the efficiency indicator of its functioning. **Object.** Ore grinding technological system, considered as a system with many operable states (multi-state system), the elements of which have only two possible states. The system under consideration is reserved by the element-by-element loaded redundancy method. **Methods.** Method for evaluating the efficiency of functioning of the systems with many states, the method of indefinite Lagrange multipliers. **Results.** The authors have obtained an approximate value of the performance indicator of the ore grinding technological system with many workable states, the elements of which have only two possible states. The paper considers the problems of optimal redundancy of the ore grinding complex technological system. Approximate solutions of these problems are obtained by the method of indefinite Lagrange multipliers, which can be used in rough calculations at the stage of designing complex technological systems for grinding ore. The problem of optimal redundancy is also considered, when it is possible to reserve only m elements from the n elements of ore grinding complex system. Taking into account certain assumptions for the efficiency of the system functioning, reserved by the element-by-element loaded redundancy method, an approximate solution of this problem is obtained.

Keywords: reliability, functioning efficiency, optimal redundancy, ore grinding system, Lagrange multiplier method

For citation: Balasanyan S.Sh., Gevorgyan H.M. Approximate solution of the problem of redundancy optimization of a complex technological ore grinding system. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 5, pp. 59–65. DOI: 10.18799/24131830/2024/5/4306

Введение

Благодаря структурной и функциональной избыточности сложные технологические системы обладают многими работоспособными состояниями. В отличие от бинарных систем, обладающих лишь двумя возможными состояниями (работоспособным и неработоспособным), для таких систем (*multi-state systems*) [1–4] практически невозможно определить общепринятое понятие отказа. Поэтому для систем со многими состояниями вместо надежности вводится понятие технической эффективности, оценка которой производится с помощью специально выбранных показателей эффективности, учитывающих последствие влияния отказов элементов системы на качество ее функционирования.

Методологической основой существующих методов оценки и исследования эффективности функционирования сложных систем со многими состояниями служит концепция системного подхода. Эта концепция в данном случае проявляется в том, что показатель эффективности рассматривается как функционал от процесса функционирования системы.

В рамках указанного подхода оценка эффективности функционирования сложных систем основывается на использовании модели процесса изменения работоспособности элементов системы. Ее сущность заключается в следующем. Формально каждый элемент E_i^0 ($i = \overline{1, n}$) системы в любой момент времени может находиться в одном из возможных состояний $y_i^0 \in Y_i^0$, каждое из которых характеризуется определенным уровнем работоспособности. Совокупность состояний элементов $y^0(t) = (y_1^0(t), y_2^0(t), \dots, y_n^0(t))$ в произвольный момент времени однозначно определяет состояние системы.

С течением времени под влиянием внешних и внутренних случайных факторов элементы системы переходят из одного состояния в другое. В результате происходит последовательная смена состояний системы в целом.

Случайный n -мерный процесс $Y^0(t) = \{y^0(t)\}$ рассматривается как формализованный процесс изменения работоспособности элементов системы и описывает ее поведение во времени. Каждой реализации $y^0(t)$ процесса $Y^0(t)$ соответствует определенная траектория в пространстве состояний системы

$Y^0 = \prod_{i=1}^n Y_i^0$. Если обозначить через $P_{y^0}(t, t+\theta)$ вероятность того, что формализованный процесс $Y^0(t)$ в интервале времени $[t, t+\theta]$ имел реализацию $y^0(t, t+\theta) \in Y^0(t, t+\theta)$, а через $\varepsilon_{y^0}(t, \theta)$ – условный показатель эффективности функционирования системы для этой реализации, то показатель эффективности функционирования системы может быть определен как математическое ожидание условного показателя $\varepsilon_{y^0}(t, \theta)$:

$$E(t, \theta) = \int_{Y^0(t, t+\theta)} \varepsilon_{y^0}(t, \theta) dP_{y^0}(t, t+\theta). \quad (1)$$

Несмотря на кажущуюся простоту записи, соотношение (1) малоприспособно для расчетов из-за чрезмерной трудности определения $\varepsilon_0(t, \theta)$, $P_{y^0}(t, t+\theta)$ и может быть использовано лишь для оценки эффективности функционирования систем с небольшим числом состояний. Сравнительно хорошо разработаны аналитические методы оценки эффективности функционирования систем с небольшим числом состояний. Сравнительно хорошо разработаны аналитические методы оценки эффективности функционирования систем с небольшим числом состояний. Особенности этих систем позволили получить достаточно компактные расчетные формулы для оценки эффективности их функционирования.

Постановка задачи

Измельчение руды является важнейшим технологическим процессом рудоподготовки, непосредственно предшествующим конечному процессу флотации руды и в значительной мере предопределяющим его эффективность [5–8]. Как показывает опыт эксплуатации обогатительных фабрик, эффективность флотации заметно снижается в результате ухудшения выходных характеристик технологической системы измельчения руды (ТСИР) вследствие отказов ее оборудования [9–11]. В связи с этим вопросы обеспечения надежности и эффективности функционирования ТСИР приобретают особую важность. Одним из возможных способов повышения эффективности функционирования ТСИР является резервирование. При проектировании сложных технологических систем измельчения с использованием резервирования возникают задачи оптимального резервирования [12–21]. Сущность этих задач заключается в определении чисел x_i , $i = \overline{1, n}$ элементов i -го типа, максимизирующих значение показателя эффективности функционирования технологической системы измельчения руды при ограничении, наложенном на технико-экономический показатель (стоимость, вес, объем и т. д.) системы, или минимизирующих технико-экономический показатель системы при заданном значении показателя эффективности функционирования системы.

Рассмотрим некоторую сложную технологическую систему измельчения руды, состоящую из n нерезервированных элементов. Допустим, что каждый элемент может находиться только в двух возможных состояниях: в состоянии работоспособности и в состоянии отказа. Эта система имеет конечное число несовместимых состояний:

- S_0 – состояние системы, когда все элементы работоспособны;
- S_i – состояние системы, когда отказал только i -й элемент ($i = \overline{1, n}$);
- $S_{i,j}$ – состояние системы, когда отказали только i -й и j -й элементы ($i < j$; $i, j = \overline{1, n}$);
- $S_{i,j,\dots,m}$ – состояние системы, когда отказала совокупность только i, j, \dots, m элементов ($i < j < \dots < m$; $i, j, \dots, m = \overline{1, n}$);
- $S_{1,2,\dots,n}$ – состояние системы, когда отказали все элементы системы.

Пусть вероятность состояний $S_0, S_i, S_{i,j}, S_{i,j,\dots,m}, S_{1,2,\dots,n}$ и показатели эффективности функционирования системы для этих состояний соответственно равны $P_0, P_i, P_{i,j}, P_{i,j,\dots,m}, P_{1,2,\dots,n}, \varepsilon_0, \varepsilon_i, \varepsilon_{i,j}, \varepsilon_{i,j,\dots,m}, \varepsilon_{1,2,\dots,n}$. Тогда эффективность функционирования системы определится как математическое ожидание показателя эффективности $\tilde{\varepsilon}$ по формуле

$$\varepsilon = M[\tilde{\varepsilon}] = \varepsilon_0 P_0 + \sum_{i=1}^n \varepsilon_i P_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^n \varepsilon_{i,j} P_{i,j} + \dots + \sum_{\substack{i,j,\dots,m=1 \\ i < j < \dots < m}}^n \varepsilon_{i,j,\dots,m} P_{i,j,\dots,m} + \varepsilon_{1,2,\dots,n} P_{1,2,\dots,n}. \quad (2)$$

Предположим, что отказы элементов системы взаимно независимы. Тогда можно написать

$$P_0 = \prod_{k=1}^n (1 - q_k),$$

$$P_i = q_i \cdot \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (1 - q_k),$$

$$P_{i,j} = q_i q_j \cdot \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i,j}}^n (1 - q_k),$$

$$P_{i,j,\dots,m} = q_i q_j \dots q_m \cdot \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i,j,\dots,m}}^n (1 - q_k),$$

$$P_{1,2,\dots,n} = \prod_{k=1}^n q_k,$$

где q_i – вероятность отказа i -го элемента.

Требуется найти решение следующих задач:

- 1) максимизировать эффективность функционирования сложной системы измельчения руды путем поэлементного нагруженного резервирования при ограничении, наложенном на технико-экономический показатель системы;
- 2) минимизировать технико-экономический показатель системы измельчения руды при заданном значении показателя эффективности ее функционирования.

При поэлементном нагруженном резервировании вероятности состояний системы определяются следующими выражениями:

$$P_0 = \prod_{k=1}^n (1 - q_k^{x_k}),$$

$$P_i = q_i^{x_i} \cdot \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (1 - q_k^{x_k}),$$

$$P_{i,j} = q_i^{x_i} q_j^{x_j} \cdot \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i,j}}^n (1 - q_k^{x_k}),$$

$$P_{i,j,\dots,m} = q_i^{x_i} q_j^{x_j} \dots q_m^{x_m} \cdot \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i,j,\dots,m}}^n (1 - q_k^{x_k}),$$

$$P_{1,2,\dots,n} = \prod_{k=1}^n q_k^{x_k},$$

где x_i – общее число элементов i -го типа.

Для случая высоконадежной системы, т. е. когда выполняется условие $q_i^{x_i} \ll 1/n$, вместо (2) можно записать приближенно

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \sum_{i=1}^n q_i^{x_i} (\varepsilon_0 - \varepsilon_i).$$

Тогда могут быть сформулированы две следующие задачи, соотносящиеся с задачами 1 и 2, указанными выше в постановке:

$$1) \max \Phi(x_1, \dots, x_n) = \max_{x_i} \left(\varepsilon_0 - \sum_{i=1}^n q_i^{x_i} (\varepsilon_0 - \varepsilon_i) \right)$$

при условии, что

$$\sum_{i=1}^n d_i x_i = D^*; i = \overline{1, n};$$

$$2) \min \Phi(x_1, \dots, x_n) = \min_{x_i} \sum_{i=1}^n d_i x_i$$

при условии, что

$$\varepsilon_0 = \sum_{i=1}^n q_i^{x_i} (\varepsilon_0 - \varepsilon_i) = \varepsilon^*; i = \overline{1, n},$$

где d_i – технико-экономический показатель одного элемента i -го типа; D^* – технико-экономический показатель системы; ε^* – заданное значение показателя эффективности функционирования системы.

Метод решения

Поставленные двойственные задачи оптимального резервирования можно решить различными методами (метод динамического программирования, градиентные методы, генетические алгоритмы оптимизации [1, 11, 13, 14, 16, 18, 21] и т. п.), каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Однако все эти методы требуют применения вычислительной техники. В данной статье поставленные задачи решаются аналитическим методом, который позволяет обеспечить простоту решения и возможность ее всестороннего анализа.

Если рассмотреть $\Phi(\cdot)$ как непрерывную функцию от x , то поставленные задачи первоначально можно решить с помощью неопределенных множителей Лагранжа и, получив истинные решения x для каждого элемента, округлить их до ближайших целых чисел. Если необходимы более точные значения x_i , то для их определения нужно исследовать ближайшие к x_i слева и справа (не меньше единицы) целые числа $[x_i]$ и $[x_i+1]$, из них выбрать те, при которых $\Phi(x_1, \dots, x_n)$ имеет наибольшее значение в задаче 1 и наименьшее значение в задаче 2.

Решение задачи 1 сводится к решению следующей системы уравнений с $n+1$ неизвестными:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\varepsilon_0 - \sum_{i=1}^n q_i^{x_i} (\varepsilon_0 - \varepsilon_i) - \lambda \left(\sum_{i=1}^n d_i x_i - D^* \right) \right) = 0, \\ \sum_{i=1}^n d_i x_i = D^*. \end{cases} \quad (3)$$

Решение (3) имеет вид

$$x_i = -(1/\ln q_i) \cdot \left(1 / \sum_{i=1}^n a_i \left(D^* - \sum_{i=1}^n a_i \ln(\varepsilon_0 - \varepsilon_i / a_i) \right) + \ln(\varepsilon_0 - \varepsilon_i / a_i) \right),$$

где

$$a_i = -(d_i / \ln q_i), i = \overline{1, n}.$$

Для решения задачи 2 составим систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\sum_{i=1}^n d_i x_i + \lambda \cdot \left(\varepsilon_0 - \sum_{i=1}^n q_i^{x_i} (\varepsilon_0 - \varepsilon_i) - \varepsilon^* \right) \right) = 0, \\ \varepsilon_0 - \sum_{i=1}^n q_i^{x_i} (\varepsilon_0 - \varepsilon_i) = \varepsilon^*; i = \overline{1, n}. \end{cases} \quad (4)$$

Решая (4), получим

$$x_i = 1 / \left(-\ln q_i \left(\ln((\varepsilon_0 - \varepsilon_i) / a_i) - \ln \left(\varepsilon_0 - \varepsilon^* / \sum_{i=1}^n a_i \right) \right) \right).$$

Если показатель эффективности функционирования системы имеет денежное выражение, то можно поставить следующую задачу, являющуюся частным случаем задачи 1:

$$\max_{x_i} \left(\varepsilon_0 - \sum_{i=1}^n q_i^{x_i} (\varepsilon_0 - \varepsilon_i) - \sum_{i=1}^n c_i x_i \right), \quad (5)$$

где c_i – стоимость одного элемента i -го типа.

Дифференцируя соотношение (5) по x_i и приравнявая его к нулю, находим

$$x_i = -(1/\ln q_i) \cdot \ln((\varepsilon_0 - \varepsilon_i) / a_i),$$

где через a_i обозначено выражение $(-c_i/\ln q_i)$.

На практике часто возникает задача оптимального резервирования, когда из m элементов сложной системы измельчения руды можно зарезервировать только n элементов. Учитывая сделанные допущения для эффективности функционирования системы, зарезервированной способом поэлементного нагруженного резервирования, приближенно получим

$$\varepsilon_m = \prod_{j=n+1}^m (1 - q_j) \times \left(\varepsilon_0 - \sum_{i=1}^n q_i^{x_i} (\varepsilon_0 - \varepsilon_i) + \left(1 - \sum_{i=1}^n q_i^{x_i} \right) \cdot \sum_{k=n+1}^m \varepsilon_k q_k \prod_{\substack{j=n+1 \\ j \neq k}}^m (1 - q_j) \right). \quad (6)$$

Требуется решить задачи типа 1 и 2, сформулированные для данного случая, т. е. когда эффективность определяется выражением (6). Решив эти за-

дачи таким же образом, что и задачи 1 и 2, соответственно получим

$$x_i = -(1/\ln q_i) \times \\
 \times \left(1/\sum_{i=1}^n a_i \cdot \left(D^* - \sum_{i=1}^n a_i \ln \left(\varepsilon_{0m} - \varepsilon_i \prod_{j=n+1}^m (1 - q_j) \right) / a_i \right) \right) + \\
 + \ln \left(\varepsilon_{0m} - \varepsilon_i \prod_{j=n+1}^m (1 - q_j) / a_i \right), \\
 x_i = -(1/\ln q_i) \cdot \left(\ln \left(\left(\varepsilon_0 - \varepsilon_i \prod_{j=n+1}^m (1 - q_j) \right) / a_i \right) - \right. \\
 \left. - \ln \left(\left(\varepsilon_0 - \varepsilon_m^* \right) / \sum_{i=1}^n a_i \right) \right),$$

где

$$\varepsilon_{0m} = \varepsilon_0 \prod_{j=n+1}^m (1 - q_j) + \sum_{k=n+1}^m \varepsilon_k q_k \cdot \prod_{\substack{j=n+1 \\ j \neq k}}^m (1 - q_j).$$

Заключение

Технологическая система измельчения руды рассмотрена как сложная система, обладающая многими работоспособными состояниями (*multi-state system*).

Получено приближенное значение показателя эффективности функционирования этой системы, элементы которой обладают лишь двумя возможными состояниями. С использованием приближенного значения показателя эффективности функционирования технологической системы измельчения руды методом неопределенных множителей Лагранжа получены приближенные решения задачи оптимального резервирования системы.

Следует отметить, что округление значений $x_i, i = \overline{1, n}$ до ближайших целых чисел существенно не влияет на точность решения, поскольку сами по себе $d_i, \varepsilon_0, \varepsilon_i$ также являются величинами более или менее приближенными. Поэтому полученные результаты могут быть с успехом использованы при ориентировочных расчетах.

При решении рассмотренных задач методом динамического программирования полученные решения можно использовать в качестве опорного. Область поиска при этом значительно сужается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lisnianski A., Levitin G. Multi-state system reliability. Assessment, optimization and applications. – Singapore: World Scientific, 2003. – 358 p.
2. Баласанян С.Ш. Метод стратифицированной формализации сложных технологических систем со многими состояниями // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 1. – С. 6–18.
3. Баласанян С.Ш. Стратифицированное моделирование сложных технологических систем. – Saarbrücken: Академическое издательство «Ламберт», 2016. – 385 с.
4. Баласанян С.Ш., Геворгян Э.М. Компьютерная модель принятия решений по реконфигурации структуры технологической системы измельчения руды // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 39–50.
5. Авдохин В.М. Основы обогащения полезных ископаемых. Т. 1. Обогачительные процессы. – М.: Изд-во «Горная книга», 2014. – 417 с.
6. King R.P. Modeling and simulation of mineral processing systems. 2nd ed. – Boston: Butterworth–Heinemann, 2015. – 416 p.
7. Castro S., Lopez-Valdivieso A., Laskowski J.S. Review of the flotation of molybdenite // International Journal of Mineral Processing. – 2016. – Vol. 148. – P. 48–58.
8. Jovanovic I., Miljanovic I. Contemporary advanced control techniques for flotation plants with mechanical flotation cells – a review // Minerals Engineering. – 2015. – Vol. 70. – P. 228–249.
9. Карепов В.А., Безверхая Е.В., Чесноков В.Т. Надежность горных машин и оборудования. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2012. – 134 с.
10. Баласанян С.Ш., Геворгян Э.М. Имитационная модель процесса изменения работоспособности измельчительного оборудования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 2. – С. 21–34.
11. Kim Heungseob, Kim Pansoo. Reliability redundancy allocation problem considering optimal redundancy strategy using parallel genetic algorithm // Reliability Engineering and System Safety. – 2017. – Vol. 159 (C). – P. 153–160.
12. Zhigang Tian, Ming J. Zuo, Hongzhong Huang. Reliability-redundancy allocation for multi-state series-parallel systems // IEEE Transactions on Reliability. – 2008. – Vol 57. – Iss. 2. – P. 303–310.
13. Chatwattanasiri N., Coit D.W., Wattanapongsakorn N. System redundancy optimization with uncertain stress-based component reliability: minimization of regret // Reliability Engineering and System Safety. – 2016. – Vol. 154 (C). – P. 73–83.
14. Coit D.W., Zio E. The evolution of system reliability optimization // Reliability Engineering and System Safety. – 2019. – Vol. 192 (C). – P. 153–160.
15. Mu-Xia Sun, Yan-Fu Li, Enrico Zio. On the optimal redundancy allocation for multi-state series-parallel systems under epistemic uncertainty // Reliability Engineering & System Safety. – 2019. – Vol. 192. – P. 48–58.
16. Jianchun Zhang, Lei Li, Zhiwei Chen. Strength-redundancy allocation problem using artificial bee colony algorithm for multi-state systems // Reliability Engineering & System Safety. – 2021. – Vol. 209. – P. 163–170.
17. Hanxiao Zhang, Muxia Sun, Yan-Fu Li. Reliability-redundancy allocation problem in multi-state flow network: Minimal cut-based approximation scheme // Reliability Engineering & System Safety. – 2022. – Vol. 225. – P. 163–173.

18. Yan-Fu Li, Hanxiao Zhang. The methods for exactly solving redundancy allocation optimization for multi-state series-parallel systems // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2022. – Vol. 221. – P. 156–165.
19. Reliability analysis of complex multi-state system with common cause failure based on evidential networks / J. Mi, Y.-F. Li, W. Peng, H.-Z. Huang // *Reliability Engineering and System Safety*. – 2018. – Vol. 174. – № 6. – P. 71–81.
20. Huang Taijun, Chen Guobing, Yang Zichun. Multi-state system reliability calculation considering probabilistic common cause failure // *Chinese Journal of Ship Research*. – 2019. – Vol. 14 (S1). – P. 17–22.
21. Reliability Analysis of a Complex Multistate System Based on a Cloud Bayesian Network / Jin-Zhang Jia, Zhuang Li, Peng Jia, Zhi-Guo Yang // *Shock and Vibration*. – 2021. – Vol. 2021. – P. 1–27.

Сведения об авторах

Сейран Шамирович Баласянян, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных технологий, информатики и автоматизированных систем Капанского филиала Национального политехнического университета Армении, Армения, 3307, г. Капан, ул. Багаберд, 28. seyran@sunicom.net
Эрмине Михайловна Геворгян, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий, информатики и автоматизированных систем Капанского филиала Национального политехнического университета Армении, Армения, 3307, г. Капан, ул. Багаберд, 28. hermine799@gmail.com

Поступила в редакцию: 28.06.2023

Поступила после рецензирования: 14.09.2023

Принята к публикации: 10.04.2024

REFERENCES

1. Lisnianski A., Levitin G. *Multi-state system reliability. Assessment, optimization and applications*. Singapore, World Scientific, 2003. 358 p.
2. Balasanyan S.Sh. A stratified method of formalization of multistate complex technological systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 1, pp. 6–18. (In Russ.)
3. Balasanyan S.Sh. *Stratified modeling of complex technological systems*. Saarbrucken, Germany, LAP Lambert Academic Publ., 2016. 385 p. (In Russ.)
4. Balasanyan S.Sh., Gevorgyan H.M. Computer model of decision making on reconfiguration of the ore grinding technological system structure. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no 1, pp. 39–50. (In Russ.)
5. Avdokhin V.M. *The fundamentals of mineral processing. Vol. 1. Mineral processing*. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2014. 417 p. (In Russ.)
6. King R.P. *Modeling and simulation of mineral processing systems*. 2nd ed. Boston, Butterworth-Heinemann, 2015. 416 p.
7. Castro S., Lopez-Valdivieso A., Laskowski J.S. Review of the flotation of molybdenite. *International Journal of Mineral Processing*, 2016, vol. 148, pp. 48–58.
8. Jovanovic I., Miljanovic I. Contemporary advanced control techniques for flotation plants with mechanical flotation cells – a review. *Minerals Engineering*, 2015, vol. 70, pp. 228–249.
9. Karepov V.A., Bezverkhaya E.V., Chesnokov V.T. *Reliability of mining machines and equipment*. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2012. 134 p. (In Russ.)
10. Balasanyan S.Sh., Gevorgyan H.M. Simulation model of changing working capacity of grinding equipment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 2, pp. 21–34. (In Russ.)
11. Kim Heungseob, Kim Pansoo. Reliability redundancy allocation problem considering optimal redundancy strategy using parallel genetic algorithm. *Reliability Engineering and System Safety*, 2017, vol. 159 (C), pp. 153–160.
12. Zhigang Tian, Ming J. Zuo, Hongzhong Huang. Reliability-redundancy allocation for multi-state series-parallel systems. *IEEE Transactions on Reliability*, 2008, vol 57, Iss. 2, pp. 303–310.
13. Chatwattanasiri N., Coit D.W., Wattanapongsakorn N. System redundancy optimization with uncertain stress-based component reliability: Minimization of regret. *Reliability Engineering and System Safety*, 2016, vol. 154 (C), pp. 73–83.
14. Coit D.W., Zio E. The evolution of system reliability optimization. *Reliability Engineering and System Safety*, 2019, vol. 192 (C), pp. 153–160.
15. Mu-Xia Sun, Yan-Fu Li, Enrico Zio. On the optimal redundancy allocation for multi-state series-parallel systems under epistemic uncertainty. *Reliability Engineering & System Safety*, 2019, vol. 192, pp. 48–58.
16. Jianchun Zhang, Lei Li, Zhiwei Chen. Strength-redundancy allocation problem using artificial bee colony algorithm for multi-state systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, vol. 209, pp. 163–170.
17. Hanxiao Zhang, Muxia Sun, Yan-Fu Li. Reliability-redundancy allocation problem in multi-state flow network: minimal cut-based approximation scheme. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, vol. 225, pp. 163–173.
18. Yan-Fu Li, Hanxiao Zhang. The methods for exactly solving redundancy allocation optimization for multi-state series-parallel systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, vol. 221, pp. 156–165.
19. Mi J., Li Y.-F., Peng W., Huang H.-Z. Reliability analysis of complex multi-state system with common cause failure based on evidential networks. *Reliability Engineering and System Safety*, 2018, vol. 174, no. 6, pp. 71–81.
20. Huang Taijun, Chen Guobing, Yang Zichun. Multi-state system reliability calculation considering probabilistic common cause failure. *Chinese Journal of Ship Research*, 2019, 14 (S1), pp. 17–22.
21. Jin-Zhang Jia, Zhuang Li, Peng Jia, Zhi-Guo Yang. Reliability analysis of a complex multistate system based on a cloud Bayesian network. *Shock and Vibration*, 2021, vol. 2021, pp. 1–27.

Information about the authors

Seyran Sh. Balasanyan, Dr. Sc., Professor, Head of Department of Information Technologies, Informatics and Automated Systems, Kapan branch of the National Polytechnic University of Armenia, 28, Baghaberd street, Kapan, 3307, Armenia. seyran@sunicom.net

Hermine M. Gevorgyan, Cand. Sc., Associate Professor, Kapan branch of the National Polytechnic University of Armenia, 28, Baghaberd street, Kapan, 3307, Armenia. hermine799@gmail.com

Received: 28.06.2023

Revised: 14.09.2023

Accepted: 10.04.2024