

УДК 622.73:519.718:581.51

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Баласянн Сейран Шамирович,

доктор технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе Капанского филиала Национального политехнического университета Армении, Армения, 3307, г. Капан, Багаберд, 28.
E-mail: seyran@sunicom.net

Геворгян Эрмине Михайловна,

преподаватель, соискатель кафедры информационных технологий, информатики и автоматизированных систем Капанского филиала Национального политехнического университета Армении, Армения, 3307, г. Капан, Багаберд, 28. E-mail: hermine79@rambler.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки имитационной модели процесса изменения работоспособности оборудования технологической системы измельчения руды, входящей в состав компьютерной модели, для оценки и анализа эффективности ее функционирования с учетом влияния показателей надежности оборудования.

Цель работы. Разработка имитационной модели процесса изменения работоспособности измельчительного оборудования, формализованного в виде случайного процесса возникновения отказов и восстановления оборудования, на основании статистических данных об отказах и восстановлениях измельчительного оборудования Зангезурского медно-молибденового комбината (ЗАО «ЗММК», Армения).

Методы исследования: теория надежности, методы прикладной статистики, метод имитационного моделирования.

Результаты. Предложена процедура формализации, позволяющая формально представить процесс изменения работоспособности измельчительного оборудования в виде случайного процесса возникновения отказов и восстановления отказавшего оборудования. Определен состав технологической системы измельчения руды ЗММК и на основании статистических данных об отказах и восстановлениях измельчительного оборудования идентифицированы законы распределения времени их работы между соседними отказами и времени восстановления. С использованием принципа особых состояний разработана имитационная модель процесса изменения работоспособности измельчительного оборудования, воспроизводящая на компьютере случайный процесс возникновения отказов и восстановления отказавшего оборудования технологической системы измельчения руды в соответствии с идентифицированными законами распределения времени работы между соседними отказами и времени восстановления отказавшего измельчительного оборудования. Благодаря применению модульного принципа и регистрового метода моделирования, разработанный моделирующий алгоритм обладает компактностью и определенной универсальностью. Это предоставляет возможность использовать разработанную имитационную модель в составе компьютерных моделей для оценки и исследования эффективности функционирования аналогичных систем измельчения руды. Оценена адекватность разработанной модели с применением методов валидации и верификации по отношению как к исходным статистическим данным, отдельным компонентам, так и к имитационной модели в целом. Разработанная имитационная модель была использована в составе компьютерной модели для оценки и анализа эффективности функционирования технологической системы измельчения руды ЗММК и модели для стохастического управления процессом флотации руды с учетом влияния надежности измельчительного оборудования.

Ключевые слова:

Измельчение руды, измельчительное оборудование, случайный процесс, надежность, отказ, восстановление, имитационная модель, адекватность, валидация, верификация.

Введение

Практический опыт эксплуатации горно-обогатительных предприятий показывает, что надежность измельчительного оборудования существенно влияет на качество функционирования технологической системы измельчения руды (ТСИР) [1–3], следовательно, и на эффективность конечного процесса обогащения руд [4–7]. В связи с этим возникает необходимость исследования эффективности функционирования ТСИР с учетом надежности ее оборудования методом компьютерного моделирования, включающего решение следующих прикладных задач:

- оценка степени снижения эффективности функционирования ТСИР вследствие ненадежности ее элементов;

- оценка влияния ненадежности отдельных элементов ТСИР на эффективность ее функционирования;
- выбор наилучшего варианта резервирования грунтовых насосов;
- выбор наилучшей конфигурации структуры резервных связей между измельчительными агрегатами ТСИР;
- определение оптимального количества ремонтных бригад и оптимальной дисциплины восстановления отказавшего оборудования.

Компьютерная модель, ориентированная на исследование эффективности функционирования ТСИР с учетом надежности ее оборудования, включает следующие модели [8]: имитационную модель процесса изменения работоспособности

- идентификация законов распределения времени работы между отказами и времени восстановления элементов;
- разработка моделирующего алгоритма процесса изменения работоспособности элементов и его программная реализация;
- оценка адекватности разработанной имитационной модели.

Краткое содержательное описание ТСИР ЗММК

Технологическая система измельчения руды ЗММК (рис. 1) состоит из 21 мельницы шарового измельчения, 3 мельниц самоизмельчения, 6 двуспиральных классификаторов типа 2КСН-2,4, 10 односпиральных классификаторов типа КСН-2,0, 11 блоков гидроциклонов – 750 мм, 12 восьмидюймовых грунтовых насосов типа ГраК 350/40, 10 двенадцатидюймовых грунтовых насосов типа ГраК 1600/50, 24 систем смазки.

Цикл шарового измельчения включает одну шаровую мельницу 1-й стадии типа МШР 3200×3100, 2 шаровые мельницы 2-й стадии типа МШР 3200×3100 стандартного размера и 18 удлиненных шаровых мельниц типа МШР 3200×3800. Шаровые мельницы работают по схеме двухстадийного измельчения при сопряжении мельниц 1:1 и 2:1. Цикл самоизмельчения руды включает 3 мельницы самоизмельчения типа ММС 70–73, работающие по схеме сопряжения 1:1 с шаровыми мельницами.

Все мельницы 1-й стадии работают с замкнутой циклом со спиральными классификаторами, т. е. пески классификаторов возвращаются в мельницы 1-й стадии как циркулирующая нагрузка. Слив классификаторов и разгрузка мельниц 2-й стадии объединяются и поступают в зумпфы грунтовых насосов гидроциклонов 2-й стадии измельчения.

Шаровые мельницы 2-й стадии работают по замкнутой схеме с грунтовым насосом и батареей гидроциклонов, причем некоторые мельницы 2-й стадии измельчения одновременно подпитываются рудой из бункеров дробленой руды, что позволяет им при отказе или ремонте мельниц 1-й стадии работать в одностадийном режиме (1:0).

В измельчительных комплексах (ИК), работающих по схеме сопряжения 2:1, установлены грунтовые 12-дюймовые насосы, зарезервированные методом замещения 8-дюймовыми насосами, обеспечивающими работу ИК по схеме сопряжения 1:1 при отказе основного насоса. В ИК, работающих по схеме сопряжения 1:1, установлены грунтовые 8-дюймовые насосы, зарезервированные однотипными насосами методом замещения.

Формализация процесса изменения работоспособности элементов ТСИР

Для построения компьютерной модели процесса изменения работоспособности оборудования ТСИР прежде всего необходимо определить состав системы, т. е. выделить ее элементы.

При исследовании эффективности функционирования системы в качестве элементов, как правило, рекомендуется рассматривать конструктивно независимые ее части, обладающие функциональной целостностью. Выбор степени детализации при разбиении системы на элементы в основном обуславливается характером решаемых задач и возможностью получения статистических данных о надежности выделенных элементов.

Учитывая вышесказанное, а также исходя из целей моделирования и особенностей ТСИР, в качестве ее элементов выделены:

- шаровые мельницы;
- системы смазки мельниц;
- двуспиральные классификаторы;
- грунтовые насосы;
- мельницы самоизмельчения;
- односпиральные классификаторы;
- гидроциклоны;
- питатели;
- транспортеры.

Заметим, что выделение элементов системы измельчения на данном этапе носит предварительный характер. Окончательный состав элементов ТСИР был определен после обработки статистических данных об отказах и восстановлениях элементов.

С целью формализации процесса изменения работоспособности элементов ТСИР для них выделяются следующие состояния, отличающиеся между собой с точки зрения надежности:

- 1) для мельниц, классификаторов, систем смазки, гидроциклонов, питателей, транспортеров: состояние «1» – работоспособное; состояние «0» – неработоспособное (отказ), когда элемент восстанавливается; состояние «2» – неработоспособное, когда элемент находится в очереди на восстановление;
- 2) для 12-дюймовых грунтовых насосов типа ГраК 1600/50: состояние «1» – работоспособное; состояние «0» – неработоспособное;
- 3) для 8-дюймовых грунтовых насосов типа ГраК 350/40: состояние «1» – работоспособное, когда элемент функционирует; состояние «0» – неработоспособное, когда элемент восстанавливается; состояние «2» – работоспособное, когда элемент находится в резерве.

При выделении возможных состояний грунтовых насосов сделано допущение о независимости их восстановления, основанное на статистических данных (при 200 восстановлениях очередь наблюдалась лишь в трех случаях). Восстановление остального оборудования производится при помощи двух бригад. При этом соблюдается дисциплина «раньше пришел – раньше обслужен».

Итак, формально каждый элемент E_i^0 ($i = \overline{1, n}$) ТСИР в любой момент времени $t \in T^0$ может находиться в одном из возможных состояний $z_i(t) \in Z_i = \{0, 1, 2, \dots, k_i\}$. С течением времени под влиянием внешних и внутренних случайных факторов элементы системы переходят из одного состояния

в другое. Последовательная смена состояний $z_i(t)$ каждого элемента E_i^0 системы рассматривается как формализованный исходный процесс изменения его работоспособности. Упорядоченная совокупность состояний элементов $z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t)$ в любой момент времени t однозначно определяет состояние системы $z_i(t) \in Z$ как «точку» пространства

$$Z = \prod_{i=1}^n Z_i \text{ с координатами } z_1, z_2, \dots, z_n. \text{ В результате}$$

переходов элементов системы из одного состояния в другое происходит изменение состояний $z_i(t)$ системы в целом. Случайный n -мерный процесс $z(t) = \{z_i(t)\}$ с дискретным пространством Z и с непрерывным временем рассматривается как формализованный исходный процесс изменения работоспособности элементов ТСИР. При предположении о независимости отказов элементов системы этот процесс можно считать заданным, если известны функции распределения $G_i(\tau_p), F_i(\tau_B)$ ($i = \overline{1, n}$) соответственно времени работы между отказами τ_p и времени восстановления τ_B , количество ремонтных бригад l и дисциплина обслуживания d . Тогда процесс $Z(t)$ формально можно описать оператором

$$z(t) = Q(t, \{G_i(\tau_p), F_i(\tau_B) : i = \overline{1, n}\}, l, d). \quad (1)$$

При заданных $G_i(\tau_p), F_i(\tau_B)$ ($i = \overline{1, n}$), l и d оператор Q реализует отображение $T^0 \rightarrow Z$ с областью определения T^0 и областью значений в пространстве Z .

Следует отметить, что с точки зрения влияния работоспособности элементов на эффективность функционирования ТСИР некоторые из рассмотренных состояний элементов практически не отличаются друг от друга. Выделение этих состояний необходимо лишь для обеспечения имитации процесса $z(t)$. В связи с этим после имитации процесса $z(t)$ целесообразно из исходных состояний элементов перейти к укрупненным состояниям $y_i^0 \in \{0, 1\}$.

Формально укрупнение состояний каждого элемента можно описать однозначным оператором

$$y_i^0(t) = W_i(z_i(t))$$

с областью определения Z_i и областью значений $Y_i^0 = \{0, 1\}$.

Операторы W_i для грунтовых насосов типа ГрАК 350/40 имеют вид

$$y_i^0(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } z_i(t) \neq 0, \\ 0, & \text{если } z_i(t) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Для остальных элементов операторы W_i имеют следующий вид:

$$y_i^0(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } Z_i(t) = 1, \\ 0, & \text{если } Z_i(t) \neq 1. \end{cases} \quad (3)$$

В результате укрупнения состояний исходного процесса $Z(t)$ получается формализованный укрупненный процесс $Y^0(t)$ изменения работоспособности элементов ТСИР, который формально можно описать однозначным оператором

$$y^0(t) = W(z(t)), \quad (4)$$

где W представляет собой совокупность операторов W_i ($i = \overline{1, n}$) с областью определения Z и областью

значений в пространстве $Y^0 = \prod_{i=1}^n Y_i^0 = \{0, 1\}^n$.

Учитывая (1), соотношение (4) можно записать в следующем виде:

$$y^0(t) = H^0(t, \{G_i(\tau_p), F_i(\tau_B) : i = \overline{1, n}\}, l, d), \quad (5)$$

где $H^0 = W \circ Q$ – последовательная композиция операторов W и Q .

При заданных функциях $G_i(\tau_p), F_i(\tau_B)$ ($i = \overline{1, n}$), количестве ремонтных бригад l и дисциплине обслуживания d случайный оператор H^0 реализует отображение $T^0 \rightarrow Y^0$.

Соотношение (5) представляет собой математическую модель процесса изменения работоспособности элементов системы измельчения.

Таким образом, имитация процесса $Y^0(t)$ сводится к имитации процессов $Z_i(t)$ ($i = \overline{1, n}$) с учетом взаимодействия между ними и их последующему укрупнению в соответствии с соотношениями (2) и (3).

Идентификация законов распределения времени работы между отказами и времени восстановления измельчительного оборудования

В настоящее время отсутствуют работы, посвященные идентификации функций распределения вероятностей $G_i(\tau_p)$ и $F_i(\tau_B)$ измельчительного оборудования [1–3, 7]. Поэтому для их выявления использовались статистические данные об отказах и восстановлениях измельчительного оборудования ЗММК, собранные за трехлетний период эксплуатации ТСИР. Заметим, что суммарное число отказов гидроциклонов, питателей и транспортеров оказалось недостаточным не только для выявления функций распределения, но даже для проверки гипотезы об однородности выборок. Поэтому эти элементы были исключены из состава модели ТСИР как высоконадежные.

Согласие эмпирических и теоретических распределений проверялось с использованием критерия χ^2 Пирсона [9, 10]. При этом в качестве гипотетических распределений были рассмотрены экспоненциальное, логарифмически-нормальное распределения, распределения Вейбулла и Релея [9, 11, 12].

В результате идентификации выявлены аналитические выражения для функций плотности распределения времени работы между отказами $g_i(\tau_p)$ и времени восстановления $f_i(\tau_a)$ нижеприведенного измельчительного оборудования:

1) мельница 1-й стадии типа МШР 3200×3800:

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \cdot e^{-\hat{\lambda} \cdot \tau_p} = 1,925 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-1,925 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_a) = \frac{k \cdot \tau_a^{k-1}}{\hat{\alpha}} \cdot e^{-\frac{\tau_a^k}{\hat{\alpha}}} = 0,469 \cdot \tau_a^{-0,3} \cdot e^{-0,67 \cdot \tau_a^{0,7}},$$

2) мельница 2-й стадии типа МШР 3200×3800:

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \cdot e^{-\hat{\lambda} \cdot \tau_p} = 2,45 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-2,45 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_\sigma) = \frac{k \cdot \tau_\sigma^{k-1}}{\alpha} \cdot e^{-\frac{\tau_\sigma}{\alpha}} = 0,4956 \cdot \tau_\sigma^{-0,4} \cdot e^{-0,826 \cdot \tau_\sigma^{0,6}},$$

3) мельница 1-й стадии типа МШР 3200×3100:

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \cdot e^{-\hat{\lambda} \cdot \tau_p} = 1,785 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-1,785 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_\sigma) = \frac{k \cdot \tau_\sigma^{k-1}}{\alpha} \cdot e^{-\frac{\tau_\sigma}{\alpha}} = 0,492 \cdot \tau_\sigma^{-0,4} \cdot e^{-0,82 \cdot \tau_\sigma^{0,6}},$$

4) мельница 2-й стадии типа МШР 3200×3100:

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \cdot e^{-\hat{\lambda} \cdot \tau_p} = 2,05 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-2,05 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_\sigma) = \frac{k \cdot \tau_\sigma^{k-1}}{\alpha} \cdot e^{-\frac{\tau_\sigma}{\alpha}} = 0,48 \cdot \tau_\sigma^{-0,4} \cdot e^{-0,798 \cdot \tau_\sigma^{0,6}},$$

5) классификатор типа 2КСН-2,4:

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \cdot e^{-\hat{\lambda} \cdot \tau_p} = 4,4 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-4,4 \cdot 10^{-3} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_\sigma) = \frac{e^{-(\lg \tau_\sigma - \hat{\mu})^2 / 2\hat{\sigma}^2}}{\hat{\sigma} \sqrt{2\pi} \cdot \tau_\sigma} = \frac{e^{-(\lg \tau_\sigma - 0,14)^2 / 0,46}}{0,48 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_\sigma},$$

6) система смазки мельниц:

$$g_i(\tau_p) = \hat{\lambda} \cdot e^{-\hat{\lambda} \cdot \tau_p} = 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-2,6 \cdot 10^{-3} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_\sigma) = \frac{e^{-(\lg \tau_\sigma - \hat{\mu})^2 / 2\hat{\sigma}^2}}{\hat{\sigma} \sqrt{2\pi} \cdot \tau_\sigma} = \frac{e^{-(\lg \tau_\sigma - 0,12)^2 / 0,52}}{0,52 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_\sigma},$$

7) грунтовой насос типа ГрАК 350/40:

$$g_i(\tau_p) = \frac{\tau_p}{\hat{\sigma}^2} \cdot e^{-\frac{\tau_p}{2\hat{\sigma}^2}} = \frac{\tau_p}{4225} \cdot e^{-\frac{\tau_p}{8450}},$$

$$f_i(\tau_\sigma) = \frac{e^{-(\lg \tau_\sigma - \hat{\mu})^2 / 2\hat{\sigma}^2}}{\hat{\sigma} \sqrt{2\pi} \cdot \tau_\sigma} = \frac{e^{-(\lg \tau_\sigma - 0,292)^2 / 0,174}}{0,295 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_\sigma},$$

8) грунтовой насос типа ГрАК 1600/50:

$$g_i(\tau_p) = \frac{\tau_p}{\hat{\sigma}^2} \cdot e^{-\frac{\tau_p}{2\hat{\sigma}^2}} = \frac{\tau_p}{3150} \cdot e^{-\frac{\tau_p}{6300}},$$

$$f_i(\tau_\sigma) = \frac{e^{-(\lg \tau_\sigma - \hat{\mu})^2 / 2\hat{\sigma}^2}}{\hat{\sigma} \sqrt{2\pi} \cdot \tau_\sigma} = \frac{e^{-(\lg \tau_\sigma - 0,4555)^2 / 0,196}}{0,313 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_\sigma},$$

9) мельница самоизмельчения типа ММС-70–23:

$$g_i(\tau_p) = 1,81 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-1,81 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_\sigma) = 0,44 \cdot \tau_\sigma^{-0,3} \cdot e^{-0,63 \cdot \tau_\sigma^{0,7}},$$

10) односпиральный классификатор типа КСН-2,0:

$$g_i(\tau_p) = 5,2 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-5,2 \cdot 10^{-3} \cdot \tau_p},$$

$$f_i(\tau_\sigma) = \frac{e^{-(\lg \tau_\sigma - 0,18)^2 / 0,5}}{0,52 \sqrt{2\pi} \cdot \tau_\sigma}.$$

Разработка моделирующего алгоритма процесса изменения работоспособности элементов ТСИР

Согласно проведенной формализации, имитация процесса изменения работоспособности элементов ТСИР $Y^0(t)$ сводится к имитации случайных процессов возникновения отказов и восстановления отдельных элементов в соответствии с заданными функциями распределения $G_i(\tau_p)$ и $F_i(\tau_B)$ с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени [7]. При этом особую роль играет механизм задания времени (или механизм регламентации событий), который координирует действия элементов системы путем установления строгой очередности системных событий и обеспечивает продвижение во времени. Учитывая дискретный характер моделируемого процесса, при построении его моделирующего алгоритма в качестве метода обеспечения регламентации событий в процессе имитации выбран метод задания времени до следующего шага (принцип особых состояний δz) [13–17].

Разработка моделирующего алгоритма осуществлена с использованием принципа особых состояний, модульного принципа и регистрового метода [13–20].

Исходя из сходства логической структуры и последовательности протекания во времени процессов отказов и восстановлений элементов, в системе выделены следующие группы элементов:

- 1) мельницы, классификаторы и системы смазки;
- 2) грунтовые насосы, зарезервированные однотипными насосами, входящие в состав ИК₄...ИК₉, А₁₃ (ГН₉, ГНР₉, ГН₂₄, ГНР₂₄, ГН₂₀, ГНР₂₀, ГН₂₃, ГНР₂₃, ГН₁₂, ГНР₁₂, ГН₁₄, ГНР₁₄);
- 3) грунтовые насосы, зарезервированные насосами меньшей производительности, входящие в состав ИК₂, ИК₃, ИК₁₀, А₁ (ГН₆, ГНР₆, ГН₇, ГНР₇, ГН₁₁, ГНР₁₁, ГН₅, ГНР₅).

Выделение указанных групп элементов позволяет построить моделирующий алгоритм и его программную реализацию по модульному принципу, благодаря чему обеспечиваются гибкость и компактность имитационной модели.

Укрупненная блок-схема моделирующего алгоритма процесса изменения работоспособности элементов ТСИР приведена на рис. 2. Прежде чем рассматривать ее работу, остановимся на тех массивах информации, которые необходимы для обеспечения имитации.

Регистр Тсостояний $z_i(t)$ ($i = \overline{1, n}$) и моментов их изменения. В этом регистре для каждого k -го элемента системы в зависимости от ее состояния хранится:

- момент ближайшего отказа t_0^k (со знаком «+»), если элемент работоспособен и функционирует;
- момент окончания восстановления t_B^k (со знаком «-»), если элемент восстанавливается;

- бесконечность, если элемент находится в очереди на восстановление или в резерве.

Указанный способ имитации состояний элементов позволяет сэкономить компьютерную память и сократить количество операторов имитационной программы.

Регистр $T_{от}$. Предназначен для хранения моментов отказов элементов, находящихся в очереди на восстановление.

Регистр S укрупненных состояний элементов $y_i^0(t)(i=\overline{1,n})$. Здесь для каждого элемента системы в зависимости от его состояния хранится «0», если элемент не функционирует (находится в резерве, в очереди на восстановление или восстанавливается), и «1», если элемент функционирует.

Кроме указанных выше регистров, для обеспечения имитации процесса восстановления элементов 1-й группы необходимо предусмотреть две ячейки памяти, где соответственно будут храниться число отказавших элементов (n_1) и число свободных бригад (n_2).

В процессе имитации в результате перехода системы из одного состояния в другое содержимые регистров T , $T_{от}$, S и ячеек n_1 , n_2 обновляются – вместо старых значений записываются новые.

Всем элементам системы и соответствующим им ячейкам указанных регистров присваиваются порядковые номера следующим образом (табл. 1): 1...64 – элементам 1-й группы, 65...78 – элементам 2-й группы, 79...86 – элементам 3-й группы. Причём чётные номера $k > 65$ присваиваются резервным грунтовыми насосам и соответствующим им ячейкам.

Работа моделирующего алгоритма сводится к следующему. Блок 1 (рис. 3) производит запись начальных значений в регистрах $T_{от}$, S , в ячейках n_1 ,

Таблица. Обозначения и порядковые номера элементов ТСИР
Table. Designations and serial numbers of OGTS elements

№ элем. в ИМ Element in simulation model	Обозн. элем. на схеме Element symbol on the diagram	№ элем. в ИМ Element in simulation model	Обозн. элем. на схеме Element symbol on the diagram	№ элем. в ИМ Element in simulation model	Обозн. элем. на схеме Element symbol on the diagram	№ элем. в ИМ Element in simulation model	Обозн. элем. на схеме Element symbol on the diagram	№ элем. в ИМ Element in simulation model	Обозн. элем. на схеме Element symbol on the diagram
1	M ₁	7	M ₈	13	M ₂₂	19	M ₂₀	25	КД ₁
2	M ₅	8	M ₁₀	14	M ₇	20	M ₂₃	26	КД ₂
3	M ₆	9	M ₁₃	15	M ₉	21	M ₂₄	27	КД ₃
4	M ₂	10	M ₁₆	16	M ₁₁	22	MC ₁	28	КД ₄
5	M ₃	11	M ₁₇	17	M ₁₂	23	MC ₂	29	КД ₈
6	M ₄	12	M ₂₁	18	M ₁₄	24	MC ₃	30	КД ₁₀
31	КО ₂	37	КО ₁₆	43	СС ₃	49	СС ₉	55	СС ₁₆
32	КО ₃	38	КО ₁₇	44	СС ₄	50	СС ₁₀	56	СС ₁₇
33	КО ₉	39	КО ₂₁	45	СС ₅	51	СС ₁₁	57	СС ₂₀
34	КО ₁	40	КО ₂₂	46	СС ₆	52	СС ₁₂	58	СС ₂₁
35	КО ₁₂	41	СС ₁	47	СС ₇	53	СС ₁₃	59	СС ₂₂
36	КО ₁₄	42	СС ₂	48	СС ₈	54	СС ₁₄	60	СС ₂₃
61	CC ₂₄	67	ГН ₂₀	73	ГН ₁₂	79	ГН ₅	85	ГН ₁₁
62	CC ₂₅	68	ГНР ₂₀	74	ГНР ₁₂	80	ГНР ₅	86	ГНР ₁₁
63	CC ₂₆	69	ГН ₂₃	75	ГН ₁₄	81	ГН ₆	–	–
64	CC ₂₇	70	ГНР ₂₃	76	ГНР ₁₄	82	ГНР ₆	–	–
65	ГН ₁₃	71	ГН ₉	77	ГН ₂₄	83	ГН ₇	–	–
66	ГНР ₁₃	72	ГНР ₉	78	ГНР ₂₄	84	ГНР ₇	–	–



Рис. 2. Укрупненная блок-схема имитационной модели процесса изменения работоспособности элементов ТСИР

Fig. 2. The integrated block diagram of the simulation model of the change in working capacity of OGTS elements

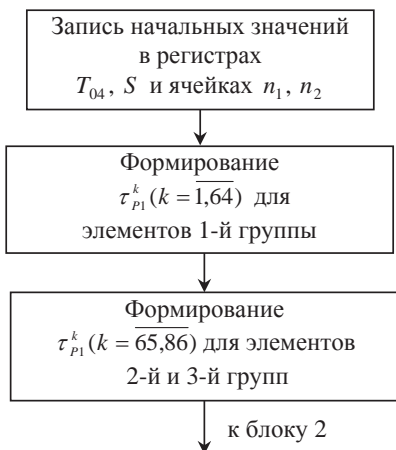


Рис. 3. Структура блока 1

Fig. 3. The structure of unit 1

n_2 и в соответствии с заданными функциями распределения $G_i(\tau_i)$ ($i=1,86$) формирует моменты первых отказов основных элементов. Значения первых моментов отказов записываются в регистре T , который является составной частью блока управления. Блок управления (рис. 4) определяет ближайший момент t_j изменения состояния системы, запоминает номер элемента k_{\min} с наименьшим значением t_j , устанавливает характер совершенного события ($t_j > 0$ – отказ, $t_j < 0$ – восстановление) и пе-

редает управление соответствующему блоку моделирующего алгоритма.

Процесс отказов и восстановления элементов каждой группы имитируется соответствующим единственным блоком, включающим два модуля. При отказе какого-либо элемента системы вступает в действие один из модулей $3^6, 4^6, 5^6$, который имитирует процесс восстановления отказавшего элемента, т. е. формирует момент окончания его восстановления t_B^k и определяет новое состояние $z_i(y_i^0)$. В случае окончания восстановления отказавшего элемента управление передается одному из модулей $3^a, 4^a, 5^a$, который для него формирует момент ближайшего отказа t_0^k и определяет новое состояние $z_i(y_i^0)$. После функционирования любого из указанных модулей управление снова передается блоку управления.

Определение последовательности системных событий (регламентация), происходящих в процессе имитации, состоит в выборе из регистра T наименьшего момента времени t^{\min} , распознавании свершенного события и передаче управления соответствующему модулю.

Адрес модуля и его настройка на очередной элемент в процессе имитации определяются номером элемента с наименьшим моментом t^{\min} и характером перехода в новое состояние.

Рассмотрим работу модулей блоков 3, 4, 5, блок-схемы которых представлены на рис. 5–10.

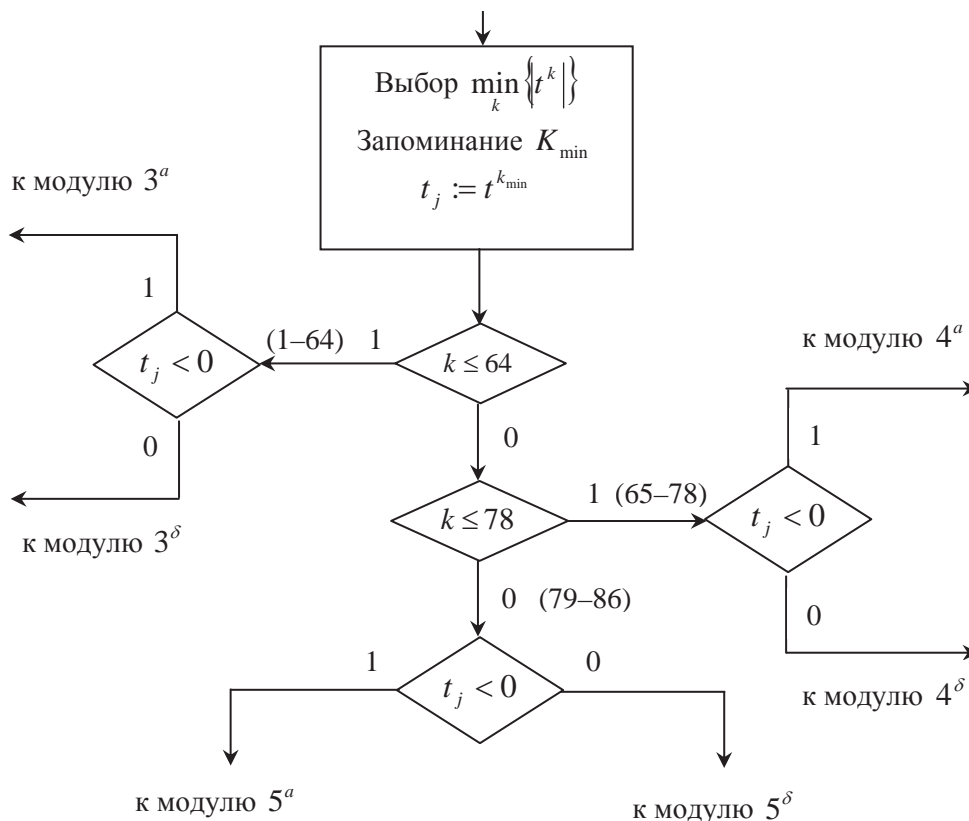


Рис. 4. Структура блока управления

Fig. 4. The structure of the control unit

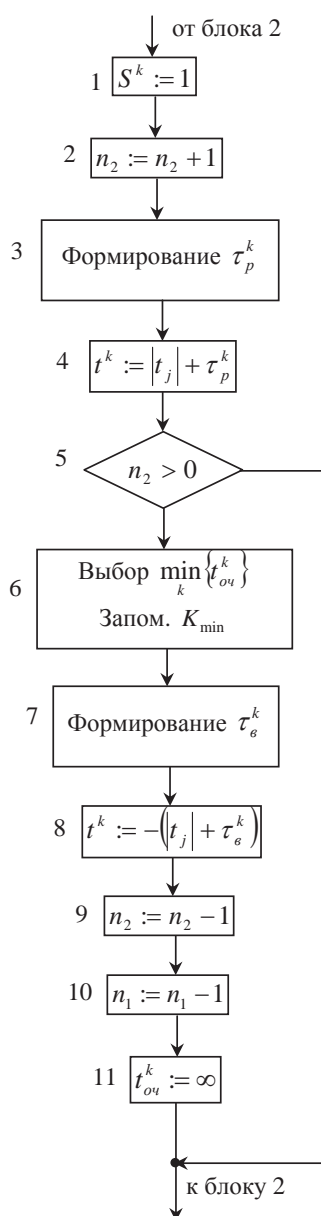


Рис. 5. Блок-схема модуля 3^5

Fig. 5. The block diagram of module 3^5

Модуль 3^6 , который вступает в действие при отказе элементов 1-й группы ($k \leq 64$), функционирует следующим образом. Оператор 1 фиксирует состояние отказавшего элемента, засылая «0» в соответствующую ячейку регистра S . Затем оператор 2 проверяет выполнение условия $n_2 > 0$ (наличие свободных ремонтных бригад). При отсутствии свободных бригад отказавший элемент ставится в очередь (операторы 3, 4), вследствие чего содержимое ячейки n_1 (число отказавших элементов) увеличивается на единицу. При наличии свободных бригад ($n_2 > 0$) оператор 6 для отказавшего элемента формирует случайный интервал времени восстановления τ_B^k согласно $F_k(\tau_B)$, а оператор 7 определяет момент окончания восстановления t_B^k и с отрицатель-

ным знаком засылает его в регистр T . Поскольку одна ремонтная бригада выделялась для ремонта отказавшего элемента, оператор 8 на единицу уменьшает содержимое ячейки n_2 , где хранится число свободных бригад. Затем опять вступает в действие блок управления.

По окончании восстановления какого-либо элемента 1-й группы вступает в действие модуль 3^a , который функционирует следующим образом. Оператор 1 фиксирует состояние восстановленного элемента, а оператор 2 прибавляет число свободных бригад на единицу, имитируя освобождение бригады. Затем оператор 3 для восстановленного элемента формирует очередной случайный интервал времени работы τ_p^k , на основании чего оператор 4 определяет момент следующего отказа $t_0^k = t_j + \tau_p^k$ и записывает в регистре T . При наличии отказавших элементов, ожидавших восстановления (этот факт устанавливается оператором 5), оператор 6 определяет номер элемента, который отказал раньше всех, затем операторы 7 и 8 для него формируют момент окончания восстановления $t_B^k = |t_j| + \tau_B^k$, который с отрицательным знаком засылается в регистр T . После этого операторы 9 и 10 изменяют число отказавших элементов и свободных бригад, а оператор 11 фиксирует выход из очереди восстановленного элемента. При отсутствии очереди управление от оператора 5 непосредственно передается блоку 2.

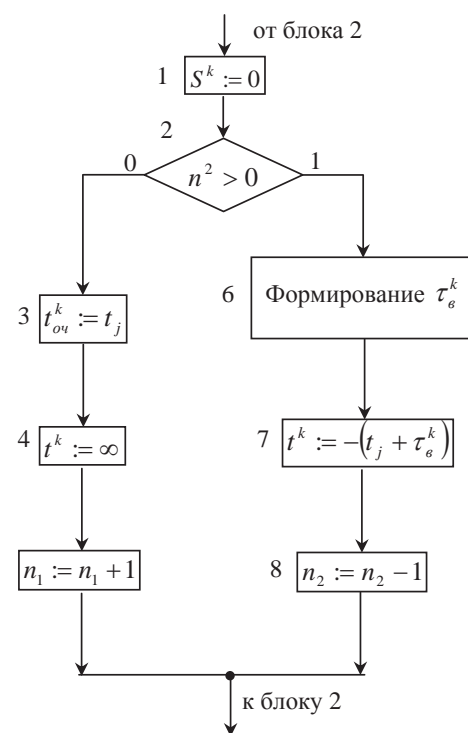


Рис. 6. Блок-схема модуля 3^6

Fig. 6. The block diagram of module 3^6

Теперь перейдем к описанию работы блока 4. Модуль 4^6 , предназначенный для имитации процесса восстановления элементов 2-й группы, функ-

ционирует следующим образом. При отказе k -го элемента ($65 \leq k \leq 78$) оператор 1 фиксирует его состояние, засылая «0» в регистр S . Затем оператор 2 для отказавшего элемента в соответствии с $F_k(\tau_p)$ формирует случайный интервал времени восстановления τ_p^k . Далее оператор 3 определяет момент окончания восстановления для k -го элемента $t_B^k = t_j + \tau_p^k$ и с отрицательным знаком засылает в k -ю ячейку регистра T . Если отказавший элемент является основным (это условие проверяется оператором 4), то оператор 8 проверяет, впервые ли отказал k -й элемент. При первом отказе k -го элемента операторы 9 и 10 формируют момент возникновения первого отказа для $(k+1)$ -го резервного элемента, а оператор 11 изменяет его состояние (имитируется первое включение резервного насоса). Если основной насос отказывает не впервые, то оператор 7 проверяет состояние резервного насоса и в случае работоспособности передает управление оператору 11, который имитирует его включение. В случае неработоспособности резервного насоса управление непосредственно передается блоку 2. Заметим, что если основной насос отказывает не впервые, то момент отказа резервного насоса формируется модулем 4^а. Если при отказе k -го резервного насоса основной $(k-1)$ -й находится в работоспособном состоянии (это условие проверяет оператор 5), то оператор 6 имитирует его включение вместо резервного. В противном случае управление передается блоку 2.

Работа модуля 4^а заключается в следующем. По окончании восстановления k -го основного насоса в случае работоспособности резервного насоса для него определяется момент отказа $t_0^k = |t_j| + \tau_p^k$ и засылается в k -ю ячейку регистра (операторы 1, 2, 7, 8). В случае неработоспособности резервного насоса оператор 5 для основного определяет момент отказа и засылает в регистр T , а оператор 6 фиксирует его состояние. В случае окончания восстановления резервного насоса оператор 3 проверяет состояние основного насоса. Если он работоспособен, то оператор 4 определяет момент отказа для резервного насоса $t_0^k = t^{k+1} + \tau_p^k$ и засылает в регистр T . В противном случае вступают в действие операторы 5, 6, которые имитируют включение резервного насоса вместо основного.

Модуль 5^б работает следующим образом. При отказе k -го элемента ($79 \leq k \leq 86$) оператор фиксирует его состояние. Затем операторы 2, 3 для него формируют момент окончания восстановления $t_B^k = t_j + \tau_p^k$ и с отрицательным знаком засылают в регистр T . Если отказавший насос является основным (оператор 4), то оператор 5 проверяет состояние $(k+1)$ -го резервного. В случае работоспособности резервного насоса имитируется его включение вместо отказавшего. При этом операторы 6, 7 для резервного насоса формируют момент отказа и засылают в $(k+1)$ -ю ячейку регистра T , а оператор 8 изменяет его состояние. Если в момент отказа основного элемента резервный находится в неработоспособном состоянии, то оператор 5 управление

передает блоку 2. По окончании восстановления любого элемента 3-й группы ($79 \leq k \leq 86$) вступает в действие модуль 5^а. После формирования оператором 1 очередного случайного интервала времени работы τ_p^k для восстановленного элемента оператор проверяет, является ли он основным. Если восстанавливается основной насос, то операторы 7–11 имитируют его включение вместо резервного. Если же восстановленный насос является резервным, то оператор 3 проверяет состояние $(k-1)$ -го основного насоса. В случае неисправности основного насоса операторы 4 и 5 имитируют включение вместо него резервного. В противном случае восстановленный насос ставится в резерв (оператор 6).

Таким образом, в процессе имитации последовательно формируются случайные моменты времени t_j и бинарный вектор укрупненных состояний ТСИР $y^0(t_j)$.

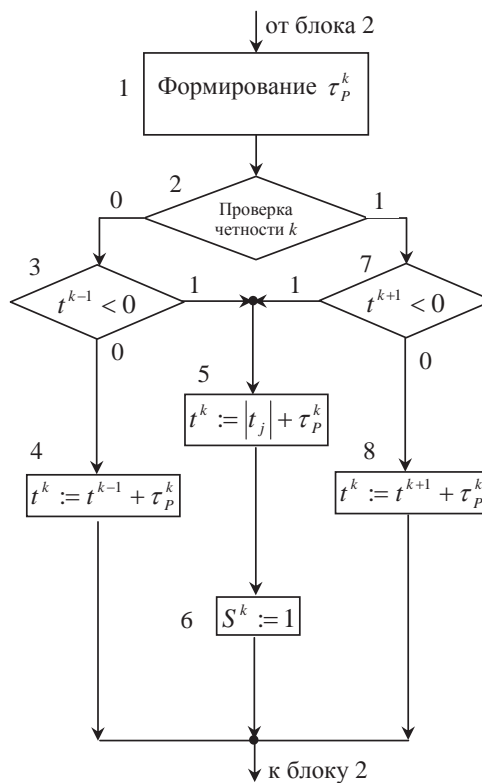


Рис. 7. Блок-схема модуля 4^а

Fig. 7. The block diagram of module 4^a

Формирование в процессе имитации случайных интервалов времени работы и времени восстановления элементов основывается на генерации и преобразовании случайных чисел r_i , равномерно распределенных в интервале $(0,1)$. С использованием этого способа разработаны алгоритмы формирования случайных интервалов времени работы τ_p^k и времени восстановления τ_B^k для элементов каждой группы. При этом для формирования возможных значений случайного интервала времени τ с заданным законом распределения использовались следующие формулы, предложенные в [13–19]:

- при экспоненциальном распределении –

$$\tau = -\frac{1}{\lambda} \ln r;$$
- при распределении Вейбулла – $\tau = \frac{1}{\alpha} \sqrt{-\ln r};$
- при распределении Релея – $\tau = \sigma \sqrt{-2 \ln r};$
- при логарифмически-нормальном распределении –

$$\tau = \exp((\mu + \sigma V) / \lg e);$$

где $V = \sum_{i=1}^{12} r_i - 6$ – нормально распределенная случайная величина с параметрами (0,1).

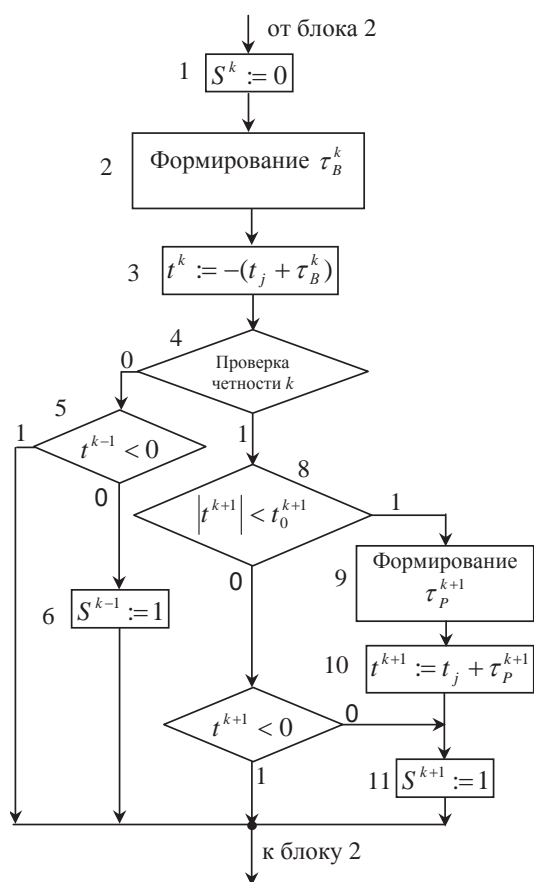


Рис. 8. Блок-схема модуля 4^б

Fig. 8. The block diagram of module 4^b

Разработанная имитационная модель процесса изменения работоспособности оборудования ТСИР реализована на языке C++ и в среде LabVIEW на компьютере Pentium i7. С целью проверки адекватности модели использовались известные методы валидации и верификации [15–20] по отношению как к исходным статистическим данным, компонентам модели, так и к имитационной модели в целом, включая проверку статистических гипотез с применением критериев Стьюдента, Крускала–Уоллиса, Пирсона [9–12].

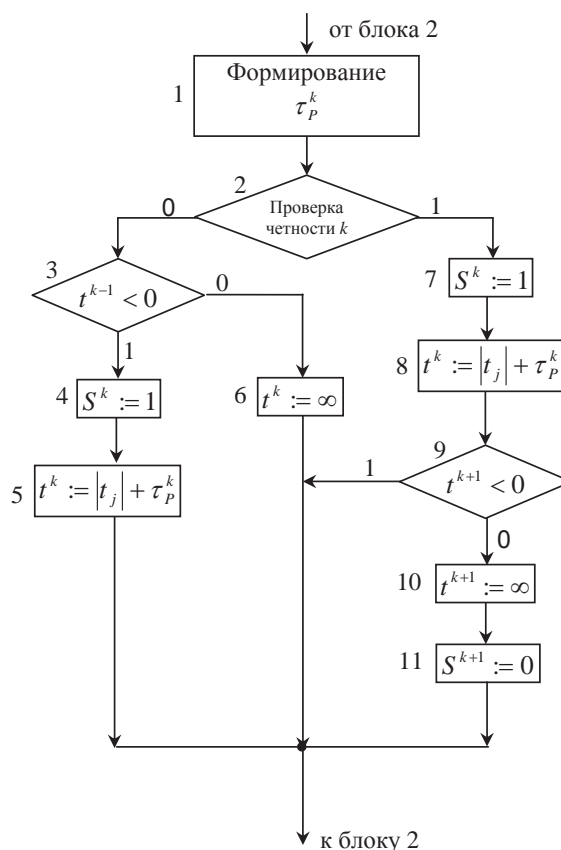


Рис. 9. Блок-схема модуля 5^б

Fig. 9. The block diagram of module 5^b

Дискретно-событийный характер и модульная структура имитационной модели позволили легко применить один из наиболее мощных методов верификации – трассировку. При использовании этого метода, после возникновения каждого системного события, характеристики состояния моделируемой системы выводились на экран и сравнивались с результатами теоретических вычислений.

Разработанная имитационная модель была использована в составе компьютерной модели для оценки и анализа эффективности функционирования ТСИР ЗММК [8] и компьютерной модели для стохастического управления процессом флотации руды с учетом влияния надежности измельчительного оборудования [6].

Заключение

Предложенная процедура формализации процесса изменения работоспособности оборудования ТСИР позволяет осуществить его имитацию путем имитации элементарных случайных процессов возникновения отказов и восстановления отдельных элементов с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени.

На основании статистических данных об эксплуатационной надежности измельчительного

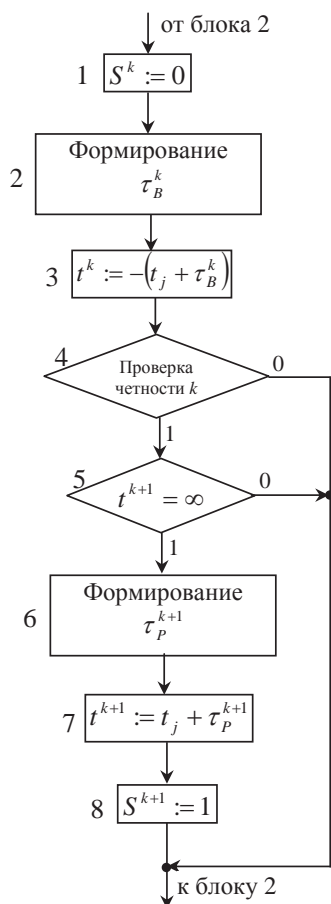


Рис. 10. Блок-схема модуля 5⁶

Fig. 10. The block diagram of module 5⁶

оборудования, полученных за трехлетний период эксплуатации ТСИР ЗММК, методом идентификации построены адекватные математические моде-

ли процессов возникновения отказов и восстановления ее оборудования.

Применение модульного принципа и регистравого метода моделирования позволило обеспечить универсальность разработанной имитационной модели, что предоставляет возможность использовать ее в составе компьютерных моделей для исследования эффективности функционирования аналогичных систем измельчения руды.

С использованием статистических критериев, а также методов валидации и верификации установлены адекватность и пригодность разработанной имитационной модели для практического пользования.

Использование разработанной имитационной модели в составе компьютерной модели для исследования эффективности функционирования ТСИР ЗММК показало, что модель адекватна и практически пригодна для решения следующих прикладных задач:

- оценка степени снижения эффективности функционирования ТСИР вследствие отказов ее оборудования;
- оценка коэффициентов важности измельчительного оборудования;
- выбор наилучшего варианта резервирования грунтовых насосов;
- определение наилучшей структуры резервных связей между измельчительными агрегатами;
- определение оптимального количества ремонтных бригад и рациональной дисциплины восстановления отказавшего оборудования.

Применение разработанной имитационной модели в составе компьютерной модели управления технологическим процессом флотации медно-молибденовых руд ЗММК позволило учитывать влияние отказов измельчительного оборудования и тем самым повысить точность управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курбатова О.А., Ксендзенко Л.С., Николайчук Д.Н. Надежность горных машин: учебное пособие. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2005. – 119 с.
2. Карепов В.А., Безверхая Е.В., Чесноков В.Т. Надежность горных машин и оборудования: учебное пособие. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2012. – 134 с.
3. Боярских Г.А. Надежность горных машин и оборудования. – Екатеринбург: УГТУ, 2009. – 116 с.
4. Морозов В.В., Толчаев В.П., Улитенко К.Я., Ганбаатар З., Дэлгэрбат Л. Разработка и применение АСУ процессами обогащения полезных ископаемых. – М.: Изд. дом «Руда и металлы», 2013. – 512 с.
5. Авдохин В.М. Основы обогащения полезных ископаемых. Том 1. Обогащительные процессы. – М.: Изд-во «Горная книга», 2014. – 417 с.
6. Баласанян С.Ш., Симонян С.О., Геворгян Э.М. Компьютерная модель для стохастического управления технологическим процессом флотации руды с учетом надежности измельчительного оборудования // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 5. – С. 50–57.
7. Баласанян С.Ш. Компьютерная модель процесса возникновения отказов и восстановления оборудования системы измельчения руды // Цветные металлы. – 2012. – № 7. – С. 82–86.
8. Баласанян С.Ш. Стратифицированная модель для оценки и анализа эффективности функционирования сложных технологических систем со многими состояниями // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 5. – С. 25–30.
9. Statistical Reliability Engineering / B. Gnedenko, I. Ushakov, I.V. Pavlov, S. Chakravanty. – Hoboken (New Jersey): Wiley, 1999. – 528 p.
10. Вентцель Е. Теория вероятностей: учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 2002. – 575 с.
11. Ushakov I. Handbook of Reliability Engineering. – Hoboken (New Jersey): Wiley, 1994. – 704 p.
12. Ushakov I. Probabilistic Reliability Models. – Hoboken (New Jersey): Wiley, 2012. – 248 p.
13. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. – М.: Мир, 1978. – 418 с.
14. Fishman G. Discrete-Event Simulation Modeling, Programming, and Analysis. – London: Springer, 2001. – 537 p.

15. Averill M. Law, W. David Kelton Simulation Modeling and Analysis. – Boston: McGraw–Hill, 2007. – 768 p.
16. Zio E. The Monte Carlo Simulation Method for System Reliability and Risk Analysis. – London: Springer, 2013. – 198 p.
17. Simulation Methods for Reliability and Availability of Complex Systems / J. Faulin, A.A. Juan, S. Martorella, J.-E. Ramires-Markes. – London: Springer, 2010. – 315 p.
18. Myers A. Complex System Reliability. Multichannel Systems with Imperfect Fault Coverage. – London: Springer, 2010. – 240 p.
19. Cantot P., Luzeaux D. Simulation and Modeling of Systems of Systems. – Bagnaux, France: DGA/UMTER, 2011. – 400 p.
20. Rubinstein R., Kroese D. Simulation and the Monte Carlo Method. – Hoboken (New Jersey): Wiley, 2008. – 372 p.

Поступила 09.12.2015 г.

UDC 622.73:519.718:581.51

SIMULATION MODEL OF CHANGING WORKING CAPACITY OF GRINDING EQUIPMENT

Seyran Sh. Balasanyan,

Dr. Sc., Ass. Prof., deputy director on research works at Kapan branch
of «National polytechnic university of Armenia»,
Armenia, 3307, Kapan, Baghaberd Str., 28, E-mail: seyran@sunicom.net

Hermine M. Gevorgyan,

teacher, competitor of the Chair «Information technologies, computer science
and automated systems» at Kapan branch of «National polytechnic university
of Armenia», Armenia, 3307, Kapan, Baghaberd Str., 28,
E-mail: hermine79@rambler.ru

The relevance of the discussed issue is caused by the necessity to develop the simulation model of equipment working capacity change in ore grinding technological systems (OGTS), which is the part of a computer model, for evaluation and analysis of its functioning efficiency considering the influence of equipment reliability indicators.

The main aim of the study is to develop a simulation model of the ore grinding equipment working capacity change, formalized in the form of a random process of failures and recoveries, based on statistical data on failures and recoveries of grinding equipment of Zan-gezur copper molybdenum center («ZCMC» JSC, Armenia).

The methods used in the study: theory of reliability, applied statistics, method of simulation modeling.

The results. The authors have proposed the procedure of formalization, which allows formally introducing the change in working capacity of ore grinding equipment in the form of a random process of failures and recoveries. The composition of OGTS ZCMC was determined and the laws of working time distribution between neighboring failures and recovery time of grinding equipment were identified on the basis of statistical data on failures and recoveries of grinding equipment. Using the principle of special states the author developed the simulation model of the change in working capacity of ore grinding equipment. This model reproduces on the computer a random process of failures and recoveries of the failed equipment of OGTS in accordance with the identified distribution laws of the working time between neighboring failures and recovery time of the failed grinding equipment. Owing to the application of the modular principle and the register-based modeling method the developed modeling algorithm has compactness and certain versatility. This provides the ability to use the developed simulation model as part of computer models for evaluation and study the functioning efficiency of similar ore grinding systems. The authors estimated the adequacy of the model using the validation and verification methods with respect to the source statistical data, individual components, and simulation model in the whole. The developed simulation model was used in the computer model for evaluation and analysis of functioning efficiency of OGTS ZCMC and in the model for stochastic control of ore flotation considering the influence of indicators of equipment reliability.

Key words:

Ore grinding, grinding equipment, random process, reliability, failure, recovery, simulation model, adequacy, validation, verification.

REFERENCES

1. Kurbatova O.A., Ksendzenko L.S., Nikolaychuk D.N. *Nadezhnost gornykh mashin* [Reliability of mining machines]. Vladivostok, DVSTU Publ., 2005. 119 p.
2. Karepov V.A., Bezverkhaya E.V., Chesnokov V.T. *Nadezhnost gornykh mashin i oborudovaniya* [Reliability of mining machines and equipment]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2012. 134 p.
3. Boyarskikh G.A. *Nadezhnost gornykh mashin i oborudovaniya* [Reliability of mining machines and equipment]. Ekaterinburg, UGTU Publ., 2009. 116 p.
4. Morozov V.V., Topchaev V.P., Ulitenko K.Ya., Ganbaatar Z., Delgerbat L. *Razrabotka i primeneniye avtomatizirovannykh sistem upravleniya protsessami obogashcheniya poleznykh iskopaemykh* [The development and application of automated control process of mineral processing]. Moscow, Ruda i Metally Publ., 2013. 512 p.
5. Avdokhin V.M. *Osnovy obogashcheniya poleznykh iskopaemykh. T. 1. Obogatitelnye protsessy* [The fundamentals of mineral processing. Vol. 1. Mineral processing]. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2014. 417 p.
6. Balasanyan S.Sh., Simonyan S.O., Gevorgyan H.M. *Kompyuternaya model dlya stokhasticheskogo upravleniya tekhnologicheskimi protsessom flotatsii rudy s uchetom nadezhnosti izmelchitel'nogo oborudovaniya* [Computer model for stochastic control of ore flotation considering grinding equipment reliability]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 5, pp. 50–57.
7. Balasanyan S.Sh. *Kompyuternaya model protsessov vozniknoveniya otkazov i vosstanovleniya oborudovaniya sistemy izmelcheniya rudy* [A computer model of the failure and recovery processes of ore grinding system equipment]. *Tsvetnye metally*, 2012, no. 7, pp. 82–86.
8. Balasanyan S.Sh. *Stratifikatsionnaya model dlya otsenki i analiza effektivnosti funktsionirovaniya slozhnykh tekhnologicheskikh sistem so mnogimi sostoyaniyami* [A stratified model for evaluation and analysis of the functioning effectiveness of multi-state complex technological systems]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 5, pp. 25–30.
9. Gnedenko B., Ushakov I., Pavlov I., Chakravanty S. *Statistical Reliability Engineering*. Hoboken (New Jersey), Wiley, 1999. 528 p.
10. Ventsel E.S. *Teoriya veroyatnostey* [The probability theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2002. 575 p.
11. Ushakov I. *Handbook of Reliability Engineering*. Hoboken (New Jersey), Wiley, 1994. 704 p.
12. Ushakov I. *Probabilistic Reliability Models*. Hoboken (New Jersey), Wiley, 2012. 248 p.
13. Shannon R. *Imitatsionnoye modelirovaniye sistem – iskusstvo i nauka* [Simulation systems – the art and science]. Moscow, Mir Publ., 1978. 418 p.
14. Fishman G. *Discrete-Event Simulation Modeling, Programming, and Analysis*. London, Springer, 2001. 537 p.

15. Averill M. Law, W. David Kelton *Simulation Modeling and Analysis*. Boston, McGraw–Hill, 2007. 768 p.
16. Zio E. *The Monte Carlo Simulation Method for System Reliability and Risk Analysis*. London, Springer, 2013. 198 p.
17. Faulin J., Juan A.A., Martorella S., Ramires-Markes J.-E. *Simulation Methods for Reliability and Availability of Complex Systems*. London, Springer 2010. 315 p.
18. Myers A. *Complex System Reliability. Multichannel Systems with Imperfect Fault Coverage*. London, Springer, 2010. 240 p.
19. Cantot P., Luzeaux D. *Simulation and Modeling of Systems of Systems*. Bagnaux, France, DGA/UMTER, 2011. 400 p.
20. Rubinstein R., Kroese D. *Simulation and the Monte Carlo Method*. Hoboken (New Jersey), Wiley, 2008. 372 p.

Received: 9 December 2015.