

УДК 004.942

В.А. Емельянов

Севастопольский институт банковского дела, Украина

## ФРАГМЕНТИРОВАННАЯ МАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ФУТЕРОВАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Предложена новая марковская модель эксплуатации футерованного оборудования, которая базируется на фрагментировании и учете профилактического режима эксплуатации данного оборудования. Разработана и решена система уравнений для предлагаемой фрагментированной модели эксплуатации футерованного оборудования. Показаны сравнительные результаты изменения функции готовности ФО в базовой модели их эксплуатации и новой фрагментированной модели эксплуатации.*

**Ключевые слова:** марковский граф, функция готовности, системы диагностики, футерованное оборудование.

### Введение

В металлургическом производстве широко используются футерованные объекты и оборудование (ФО) для перевозки и разливки жидких металлов. Такими объектами являются: передвижные миксеры, чугуновозы, сталеразливочные ковши и др. Они представляют собой отдельную группу объектов диагностики, содержащих огнеупорный компонент – футеровку, предназначенную для защиты корпуса объектов от действия высоких температур содержащихся в них жидких металлов (более 1000°C). При эксплуатации таких объектов уделяется значительное внимание состоянию их футеровки, поскольку этот фактор может быть причиной их разрушения, что влечет большие материальные затраты и человеческие жертвы, о чем свидетельствуют данные из источников [1 – 5].

Во многих случаях аварии связаны с повреждением внутренней футеровки ковша и расплавлением его стенок. Как отмечается в работах [1 – 2], прогар сталеразливочного ковша является частой аварией, вследствие превышения его эксплуатационного ресурса, нарушения технологии подготовки, применения некачественных огнеупоров и неадекватной диагностики и режимов эксплуатации.

**Постановка задачи.** На практике в металлургическом производстве эксплуатация данной группы футерованного оборудования осуществляется на основе нормативного количества допустимых заливок жидкого металла. Мониторинг и диагностика состояния футеровки заключается во внешнем осмотре футеровки технологом и в случае необходимости торкретировании футеровки.

Исходя из анализа источников [6 – 10], можно сделать вывод о том, что данное металлургическое оборудование практически не подвергается диагностике и мониторингу объективными методами кон-

троля, что уменьшает достоверность диагностики такого оборудования и увеличивает риск аварий при эксплуатации ФО. Следовательно, актуальным является разработка новой модели эксплуатации футерованных объектов, позволяющей повысить эффективность определения их уровня готовности.

### Марковская модель эксплуатации футерованного оборудования

На основании проведенного анализа источников [8 – 10], классическую схему эксплуатации ФО представим в виде множества состояний, в которых пребывает ФО:

$$S = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7\}, \quad (1)$$

где  $s_1$  – ФО исправен и/или находится в режиме перевозки жидкого металла;

$s_2$  – оценка эксплуатационного ресурса;

$s_3$  – ФО поврежден или разрушен, и не подлежит эксплуатации;

$s_4$  – плановая диагностика состояния ФО;

$s_5$  – ремонт вспомогательного оборудования ФО;

$s_6$  – полный ремонт (замена) футеровки;

$s_7$  – торкретирование футеровки.

Однако такая схема имеет существенные недостатки, из-за которых происходит разрушение ФО. Недостатки заключаются в том, что при такой эксплуатации (данном наборе состояний), ФО отправляется на техническую диагностику только после израсходования ресурса номинальных значений параметров эксплуатации ФО (как правило, таким параметром является количество номинально допустимых заливок жидкого металла в ФО). Проблема состоит в том, что после замены футеровки ФО не выдерживает номинальное количество заливок, вследствие чего при несвоевременном обнаружении перегара футеровки и корпуса происходит разрушение ФО.

Для решения данной задачи предлагается построить модель эксплуатации ФО с введением 2 дополнительных состояний, что позволит проводить профилактическую проверку состояния ФО без вывода его из эксплуатации.

Построим марковскую модель эксплуатации ФО (рис. 1). После предварительного исследования в классический граф состояний ФО (сплошная линия на рис. 1) были добавлены состояния (пунктир-

ная линия на рис. 1):  $s_{11}$  – состояние профилактической диагностики изменений футеровки ФО;  $s_{12}$  – состояние прогнозирования изменений футеровки ФО. Два новых состояния характеризуют режим профилактического обслуживания ФО без вывода его из эксплуатации. Таким образом, получаем новое множество состояний ФО:

$$S' = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7, s_{11}, s_{12}\}. \quad (2)$$

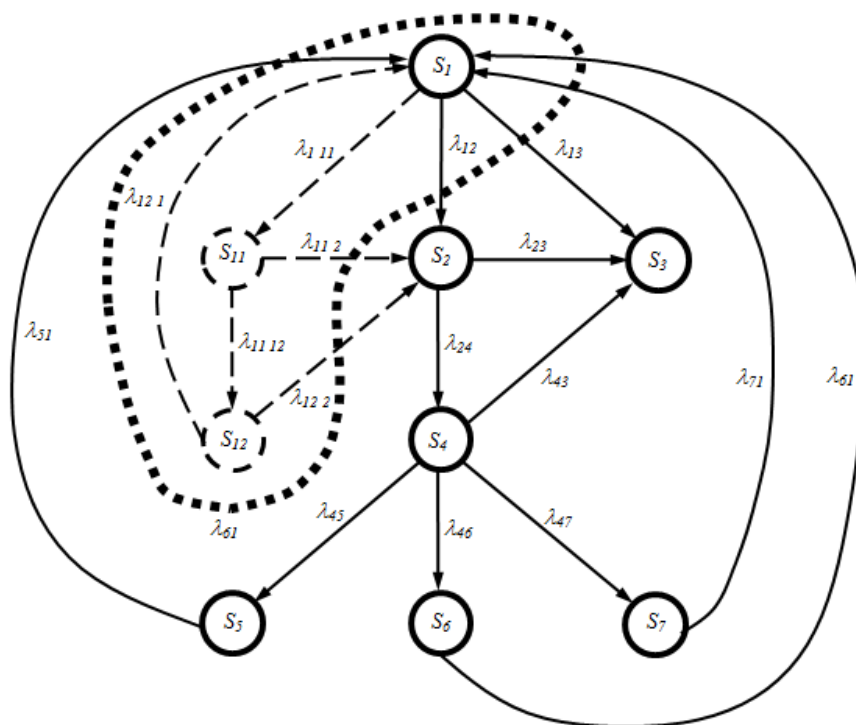


Рис. 1. Марковские графы эксплуатации ФО  
(базовый – сплошная линия, фрагментированный – пунктирная)

Составим системы дифференциальных уравнений Колмогорова для исходной модели эксплуатации ФО (4) и модифицированного марковского графа с учетом состояний  $s_{11}$ ,  $s_{12}$  (5).

Интенсивность перехода рассчитывается следующим образом:

$$\lambda_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i \Delta t_i}, \quad (3)$$

где  $n_i$  – статистические данные о числе ФО, находящихся в  $i$ -м состоянии;

$n_{ij}$  – число ФО, перешедших из  $i$ -го состояния в  $j$ -е за фиксированный период  $\Delta t_i$ .

При этом для моделирования промежутки  $\Delta t_i$  должны быть одной размерности, но не обязательно одинаковыми.

В зависимости от  $\lambda_{ij}$  величины  $P_i(t)$  в течение времени могут увеличиваться или уменьшаться, кроме величины  $P_3(t)$ , которая может только увеличиваться, т.к. состояние  $S_3$  является поглощающим и характеризующим разрушение ФО, вследствие

перегорания его футеровки и корпуса без возможности восстановления.

$$\begin{cases} \frac{dP_{S_1}(t)}{dt} = -(\lambda_{12} + \lambda_{13})P_{S_1}(t) + \lambda_{51}P_{S_4}(t) + \lambda_{61}P_{S_6}(t) + \lambda_{71}P_{S_7}(t); \\ \frac{dP_{S_2}(t)}{dt} = -(\lambda_{23} + \lambda_{24})P_{S_2}(t) + \lambda_{12}P_{S_1}(t); \\ \frac{dP_{S_3}(t)}{dt} = \lambda_{12}P_{S_1}(t) + \lambda_{13}P_{S_2}(t) + \lambda_{43}P_{S_4}(t); \\ \frac{dP_{S_4}(t)}{dt} = -(\lambda_{43} + \lambda_{45} + \lambda_{46} + \lambda_{47})P_{S_4}(t) + \lambda_{24}P_{S_2}(t); \\ \frac{dP_{S_5}(t)}{dt} = -\lambda_{51}P_{S_5}(t) + \lambda_{45}P_{S_4}(t); \\ \frac{dP_{S_6}(t)}{dt} = -\lambda_{61}P_{S_6}(t) + \lambda_{46}P_{S_4}(t); \\ \frac{dP_{S_7}(t)}{dt} = -\lambda_{71}P_{S_7}(t) + \lambda_{47}P_{S_4}(t), \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases}
\frac{dP_{S_1}(t)}{dt} = -(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{111})P_{S_1}(t) + \lambda_{51}P_{S_4}(t) + \\
+ \lambda_{61}P_{S_6}(t) + \lambda_{71}P_{S_7}(t) + \lambda_{121}P_{S_{12}}(t); \\
\frac{dP_{S_2}(t)}{dt} = -(\lambda_{23} + \lambda_{24})P_{S_2}(t) + \lambda_{12}P_{S_1}(t) + \\
+ \lambda_{112}P_{S_{11}}(t) + \lambda_{122}P_{S_{12}}(t); \\
\frac{dP_{S_3}(t)}{dt} = \lambda_{12}P_{S_1}(t) + \lambda_{13}P_{S_2}(t) + \\
+ \lambda_{43}P_{S_4}(t); \\
\frac{dP_{S_4}(t)}{dt} = -(\lambda_{43} + \lambda_{45} + \lambda_{46} + \lambda_{47})P_{S_4}(t) + \\
+ \lambda_{24}P_{S_2}(t); \\
\frac{dP_{S_5}(t)}{dt} = -\lambda_{51}P_{S_5}(t) + \lambda_{45}P_{S_4}(t); \\
\frac{dP_{S_6}(t)}{dt} = -\lambda_{61}P_{S_6}(t) + \lambda_{46}P_{S_4}(t); \\
\frac{dP_{S_7}(t)}{dt} = -\lambda_{71}P_{S_7}(t) + \lambda_{47}P_{S_4}(t); \\
\frac{dP_{S_{11}}(t)}{dt} = -(\lambda_{112} + \lambda_{1112})P_{S_{11}}(t) + \\
+ \lambda_{111}P_{S_1}(t); \\
\frac{dP_{S_{12}}(t)}{dt} = -(\lambda_{121} + \lambda_{122})P_{S_{12}}(t) + \\
+ \lambda_{1112}P_{S_{11}}(t),
\end{cases} \quad (5)$$

Найдем корни, решив систему уравнений (5) в среде математического моделирования MathCAD, используя встроенные функции Given и Find(). Для сравнения базовой и фрагментированных моделей эксплуатации ФО, также решим систему (4).

$$\begin{cases}
-(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{111})P_{S_1} + \lambda_{51}P_{S_4} + \lambda_{61}P_{S_6} + \\
+ \lambda_{71}P_{S_7} + \lambda_{121}P_{S_{12}} = 0; \\
-(\lambda_{23} + \lambda_{24})P_{S_2} + \lambda_{12}P_{S_1} + \lambda_{112}P_{S_{11}} + \\
+ \lambda_{122}P_{S_{12}} = 0; \\
\lambda_{12}P_{S_1} + \lambda_{13}P_{S_2} + \lambda_{43}P_{S_4} = 0; \\
-(\lambda_{43} + \lambda_{45} + \lambda_{46} + \lambda_{47})P_{S_4} + \lambda_{24}P_{S_2} = 0; \\
-\lambda_{51}P_{S_5} + \lambda_{45}P_{S_4} = 0; \\
-\lambda_{61}P_{S_6} + \lambda_{46}P_{S_4} = 0; \\
-\lambda_{71}P_{S_7} + \lambda_{47}P_{S_4} = 0; \\
-(\lambda_{112} + \lambda_{1112})P_{S_{11}} + \lambda_{111}P_{S_1} = 0; \\
-(\lambda_{121} + \lambda_{122})P_{S_{12}} + \lambda_{1112}P_{S_{11}} = 0; \\
P_{S_1} + P_{S_2} + P_{S_3} + P_{S_4} + P_{S_5} + P_{S_6} + P_{S_7} + \\
+ P_{S_{11}} + P_{S_{12}} = 1,
\end{cases} \quad (6)$$

Нахождение корней для фрагментированного марковского графа:

$$\begin{aligned}
&\text{Find}(P_{S_1}, P_{S_2}, P_{S_3}, P_{S_4}, P_{S_5}, P_{S_6}, P_{S_7}, P_{S_{11}}, P_{S_{12}}) = \\
&= \begin{pmatrix} 0,681 \\ 0,010 \\ 0,007 \\ 0,025 \\ 0,001 \\ 0,082 \\ 0,003 \\ 0,096 \\ 0,095 \end{pmatrix}. \quad (7)
\end{aligned}$$

Нахождение корней для базового графа:

$$\begin{aligned}
&\text{Find}(P_{S_1}', P_{S_2}', P_{S_3}', P_{S_4}', P_{S_5}', P_{S_6}', P_{S_7}') = \\
&= \begin{pmatrix} 0,593 \\ 0,010 \\ 0,076 \\ 0,189 \\ 0,001 \\ 0,127 \\ 0,004 \end{pmatrix}. \quad (8)
\end{aligned}$$

Вероятность  $P_{S_1}'$  отображает стационарный коэффициент готовности ФО, исправного и находящегося в дежурном состоянии. Сумма вероятностей  $P_{S_1} + P_{S_{11}} + P_{S_{12}}$  характеризует коэффициент готовности, учитывающий фрагментирование состояние  $S_1$ .

Тогда функция готовности имеет вид:

$$K_{\Gamma}(t) := P_{S_1}(t) + P_{S_{11}}(t) + P_{S_{12}}(t). \quad (9)$$

В работе исследована зависимость функции готовности ФО от времени при различных значениях интенсивностей  $\lambda_{ij}$ . Полученные результаты представлены на рис. 2.

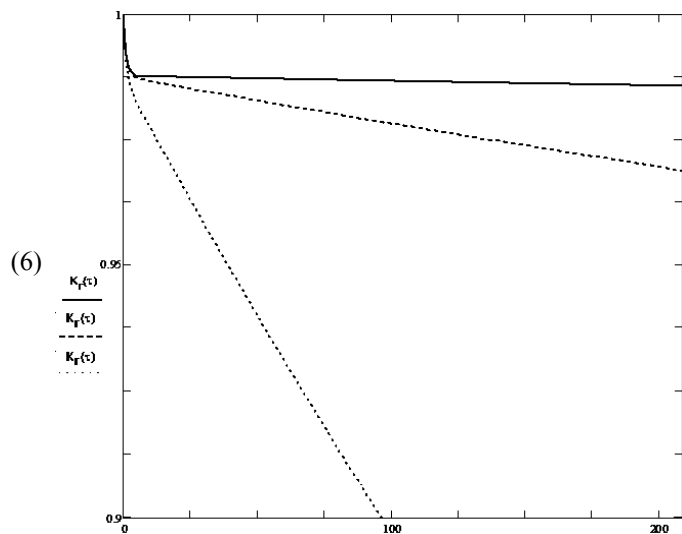


Рис. 2. Графики изменения коэффициента готовности ФО при различных значениях интенсивности

При построении марковской модели готовности используются статистические данные эксплуатации ФО на Алчевском металлургическом комбинате, отражающие реальные значения интенсивностей перехода из состояния в состояние.

В работе проведено сравнение результатов исследования готовности ФО в базовой модели их эксплуатации и новой фрагментированной модели эксплуатации. Данный результат проиллюстрирован графиками зависимостей функций готовности от достоверности контроля для двух указанных случаев на рис. 3.

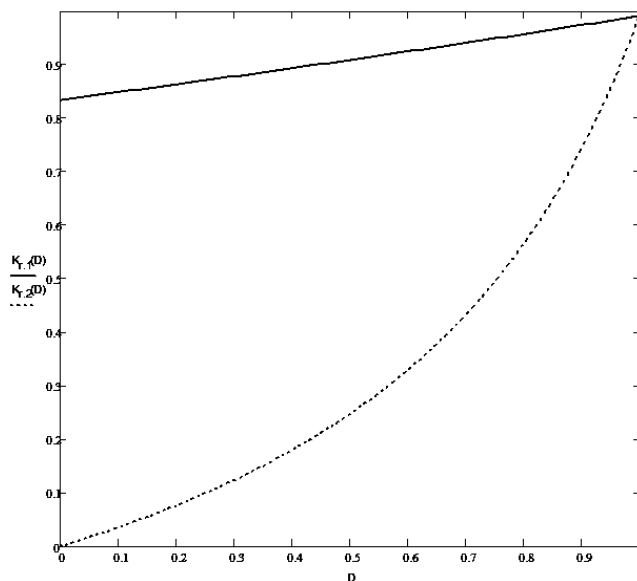


Рис. 3. Сравнение функций готовности варианта 1 (фрагментированная модель) и варианта 2 (базовая модель) в зависимости от достоверности контроля

## Выводы

Таким образом, в данной работе развиты марковские модели эксплуатации ФО в части фрагментирования графов состояний и учета дополнительных видов диагностики, что позволяет осуществлять техническую диагностику ФО без вывода его из эксплуатации, а также повысить готовность использования ФО.

## ФРАГМЕНТОВАНА МАРКІВСЬКА МОДЕЛЬ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ФУТЕРОВАНОГО ОБЛАДНАННЯ

В.О. Смельянов

Запропоновано нову Марківську модель експлуатації футерованого обладнання, яка базується на фрагментації і обліку профілактичного режиму експлуатації цього обладнання. Вирішена система рівнянь для запропонованої фрагментованої моделі експлуатації футерованого обладнання. Показані порівняльні результати зміни функції готовності футерованого обладнання у базовій моделі його експлуатації і нової фрагментованої моделі експлуатації.

**Ключові слова:** Марківський граф, функція готовності, системи діагностики, футероване обладнання.

## FRAGMENTED MARK MODEL FOR EXPLOITATION OF THE LINING EQUIPMENT SYSTEMS

V.A. Iemelianov

The new model of the lining equipment exploitation, which is based on fragmentation and account of the prophylactic mode of exploitation, is offered. The equalizations system is solved for the offered fragmented model of the lining equipment exploitation. The comparative results of function readiness changes are shown in the base model of their exploitation and new fragmented model of exploitation.

**Keywords:** Mark model, readiness function, diagnostic systems, lining equipment.

## Список литературы

1. Тубольцев Л.Г. Анализ риска аварий и определение возможного материального ущерба на металлургическом предприятии / Л.Г. Тубольцев, Г.Н. Голубых, Н.И. Падун // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. науч. тр.* – Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2006. – Вип. 12. – С. 407-420.
2. Акинин Н.И. Анализ причин аварий и травматизма на опасных производственных объектах / Н.И. Акинин // *Металлург.* – 2004. – №10. – С. 23-25.
3. Северсталь обещает к пятнице ликвидировать последствия аварии в конвертерном цехе [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.metalinfo.ru/ru/news/6296>.
4. Обзор аварий и инцидентов в металлургической отрасли [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.markmet.ru/tehnika-bezopasnosti-v-metallurgii/obzor-krupneishikh-avarii-v-metallurgicheskoi-otrasli>.
5. Число жертв аварии на металлургическом заводе в Китае достигло 11 [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://ria.ru/world/20111005/450066044.html>.
6. Гусев Ю.В. Математическая модель процесса транспортирования чугуна в конвертерный цех / Ю.В. Гусев, Д.Ю. Гусев // *Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. пр.* – Мариуполь, 2008. – №18. – С. 230-232.
7. Бойченко Б.М. Конвертерное производство стали / Б.М. Бойченко, В.Б. Охотский, П.С. Харлашин. – Днепропетровск: РИА «Дніпро-ВАЛ», 2006. – 454 с.
8. Martino M. Refractory Lining for Oxygen Converters: Recent Experiences in this Field / M. Martino, M. Fenu, A. Anfoso // *Proceedings of 5-th European Steelmaking Conference, 26-28 June, 2006, Aachen, Germany.* – Dusseldorf: Steel Institute VDEh, 2006. – P. 229-233.
9. Головки В. Мониторить «здоровье» футеровки конвертеров будут лазерные сканеры / В. Головки // *Металлург.* – Кривой Рог, 2011. – №34. – С. 2-3.
10. Опыт эксплуатации периклазоуглеродистых футеровок конвертеров / О.Б. Воронина, С.Н. Ушаков, И.М. Захаров и др. – *Сталь.* – 2009. – № 10. – С. 28-29.

Поступила в редколлегию 10.10.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.С. Харченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Харьков.