

УДК 621.313

*д.т.н. Сидоров В. А.,  
к.т.н. Ошовская Е. В.,  
Шамрай Ю. А.,  
Якимова А. В.  
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)*

## ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ ПРИ АНАЛИЗЕ РИСКА ОТКАЗОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Описана проблема получения достоверной информации для оценки риска как основного параметра, управляющего деятельностью ремонтной службы при реализации современной стратегии технического обслуживания и ремонта механического оборудования металлургических предприятий. Показаны пути повышения информативности при анализе рисков отказов на примере скипового подъёмника.*

*Ключевые слова: механическое оборудование, отказ, анализ рисков, техническое обслуживание, ремонт, скиповый подъёмник.*

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Современная стратегия технического обслуживания и ремонтов оборудования использует концепцию «приемлемого риска». Данная концепция в своей основе опирается на оценки рисков, применяемые для управления деятельностью ремонтных служб [1, 2, 3]. Чаще всего риск трактуется как произведение вероятности возникновения нежелательного события (отказ, авария) и вреда от его последствий. Группа стандартов по оценке рисков и надёжности технологического оборудования [4–10] предлагает рассматривать промышленный объект в аспектах качественного и количественного анализа возникновения отказов, используя статистическую информацию о надёжности отдельных элементов. При этом исходная информация представляется в виде известных значений вероятностей безотказной работы или интенсивностей отказов элементов, для нахождения которых в стандартах рекомендуется применять статистические методы.

Такой подход использован в работе [11] для оценки риска возникновения инцидентов и аварийных ситуаций в доменном производстве. На основе анализа статистических данных и применении теории массового обслуживания авторами иден-

тифицированы возникающие инциденты и аварийные ситуации, сопоставлены теоретические и эмпирические закономерности распределения периодичности появления инцидентов и длительности их ликвидации, рассчитаны вероятности возникновения инцидентов и аварийных ситуаций.

В работе [12] описана прикладная компьютерная программа для расчёта показателей надёжности металлургического оборудования и производственного риска в металлургической отрасли. Расчёты выполняются на основе математической модели, которая использует статистическую базу произошедших отказов, вызванных «техническими» (объективными) и «личностными» (субъективными) причинами.

**Постановка задачи.** Оценка рисков на основании статистических данных о зафиксированных отказах оборудования хорошо иллюстрирует прошедший период эксплуатации и технического обслуживания, но не позволяет получить достоверную информацию для выполнения ремонтной службой конкретных действий в данный момент времени.

В статье рассмотрены причины этой проблемы и предложены возможные пути повышения информативности при анализе рисков на примере элементов скипового подъёмника доменной печи.

**Изложение материала и его результаты.** Сложности, связанные с использованием вероятностного подхода при оценке рисков, вызваны следующими причинами.

Для металлургического оборудования, представляющего собой единичные, уникальные машины, функционирующие в переменных режимах нагружения и условиях окружающей среды, накопление достаточно большого количества статистических данных об отказах отдельных элементов требует длительного периода наблюдения. Достоверность устанавливаемых вероятностных характеристик проявления отказов и вычисляемых показателей безотказности, определяемая по малым выборкам статистических данных, будет невысока.

Увеличение количества данных об отказах однотипного оборудования возможно за счёт обмена сведениями между разными металлургическими предприятиями, однако в настоящее время эта практика практически отсутствует из-за современных требований о соблюдении коммерческой тайны, неразглашении информации об особенностях проявления и ликвидации отказов оборудования.

Кроме вероятности возникновения отказа или аварийной ситуации при оценке риска необходима информация о возможных потерях предприятия, вызванных их устранением. Уровень потерь также обусловлен многими факторами и может значительно различаться даже при устранении подобных отказов.

Затраты на ликвидацию внезапных отказов оборудования зависят от подготовленности ремонтной службы, длительности проведения ремонта и потерь производства из-за снижения объёма выпускаемой продукции. Если продолжительность ремонта может быть определена по нормативам проведения ремонтных работ, а потери производства найдены произведением времени простоя и среднего показателя производительности металлургического агрегата, то фактор подготовленности ремонтной службы оценить затруднительно. Данный фактор увеличивает время про-

стоя оборудования при ликвидации внезапного отказа из-за:

- отсутствия необходимых запасных частей и приспособлений;
- отсутствия чёткого регламента действий в критических ситуациях;
- отсутствия опыта и навыков ликвидации таких отказов.

Указанные причины усугубляются тенденциями сокращения объёмов неснижаемого запаса элементов оборудования, нарушением преемственности передачи опыта в ремонтных службах предприятий из-за текучести кадров. Кроме того, качество ремонта, связанного с устранением внезапного отказа и выполненного в сжатые сроки, приводит к его повторению через короткое время.

Большинство металлургических машин представляет собой восстанавливаемые динамические системы разноресурсных элементов, для которых в качестве целевой функции анализа рисков с последующим управлением деятельностью ремонтной службы можно предложить следующее условие. Деграция внутренних свойств (технического состояния) деталей  $C$  под влиянием внешних воздействий  $B$ , возникающих при выполнении производственной программы, должна компенсироваться проведением технического обслуживания и ремонта ( $TP$ ):

$$B \rightarrow C \leftarrow TP.$$

Несоблюдение данного требования приводит к появлению рисков внеплановых отказов и аварий.

Проведение текущих и капитальных ремонтов, связанных с заменой узлов и деталей, вызывает изменение исходного состояния деталей  $C$  и закономерностей развития повреждений, во многом определяемых качеством проводимых ремонтов. Замена деталей, выполненная после отказа, также формирует новые условия развития повреждений. Дополнительно меняется характер взаимного влияния узлов. Эти факторы позволяют выделить период между капитальными ремонтами оборудования как временной интервал для эффективного накопления ин-

формации об отказах при анализе рисков. Достоверность анализа обеспечивается одновременным рассмотрением данных о: производственной программе и внешних воздействиях, количестве установленных деталей, техническом обслуживании и проведённых ремонтах. Кроме того, для повышения информативности анализа рисков и выявления последствий отказов следует использовать имитационное моделирование поведения оборудования при возникновении и развитии различных повреждений деталей.

Некоторые аспекты такого подхода к оценке рисков далее рассмотрены на примере скипового подъёмника доменной печи, который можно считать типичной металлургической машиной, что позволяет распространить предлагаемый подход на всё механическое оборудование металлургических предприятий.

Скиповый подъёмник (рис. 1) является сложным объектом, в структуре которого сочетаются разноплановые с точки зрения развития отказов элементы: наклонный мост, скипы, канат, блоки, лебёдка. Решётчатый наклонный мост опирается на стенку скиповой ямы и на пилон. На наклонном мосту смонтированы площадки для направляющих блоков скиповых канатов и канатов лебёдок для маневрирования конусами. На нижнем поясе моста уложен рельсовый путь, который переходит в разгрузочные кривые. Верхняя часть моста, выполненная консольно, заканчивается над приёмной воронкой дополнительными разгрузочными рельсами.

Анализ информации о происшедших отказах и авариях, проведённый на основании работ [13, 14] и опыта эксплуатации скиповых подъёмников доменных печей металлургических предприятий Донбасса, позволил выделить типовые ситуации, вызвавшие значительные потери производства. Данные ситуации могут выступать в качестве задания для имитационного моделирования:

1. Посадка скипа на просыпь шихты в скиповой яме приводит к увеличению динамической составляющей в канате в начале подъёма.

2. Наезд скипа на упор, при этом инертность привода не позволяет эффективно защитить электромеханическую систему от перегрузки, что вызывает обрыв каната.

3. Остановка блоков в фиксированных положениях приводит к появлению дисбаланса, возникновению вибраций, ослаблению резьбовых соединений крепления и заканчивается усталостным разрушением оси блока.

4. Нарушения режимов смазывания подшипниковых узлов блоков, лебёдки и скипов под влиянием сезонных изменений температуры окружающей среды, вызывающие увеличение коэффициента трения и момента сопротивления, что приводит к изменению характера механического износа.

5. Абразивный износ канатов, их неравномерная вытяжка, приводящая к нарушению правильного функционирования рычажного выравнивающего устройства. В этом случае нагрузка от скипа воспринимается одним канатом, что наиболее часто приводит к сходу скипа с рельсов.

6. Длительная нагрузка от периодического температурного воздействия, возникающих при вращении блоков колебаний, вибрация при прохождении скипов приводят к ослаблению резьбовых соединений в решётчатой конструкции наклонного моста. В свою очередь, это становится причиной повышенных колебаний моста и вызывает разрушение его элементов.

Имитационная модель для каждой ситуации должна учитывать параметры, описывающие эксплуатационные воздействия на детали:

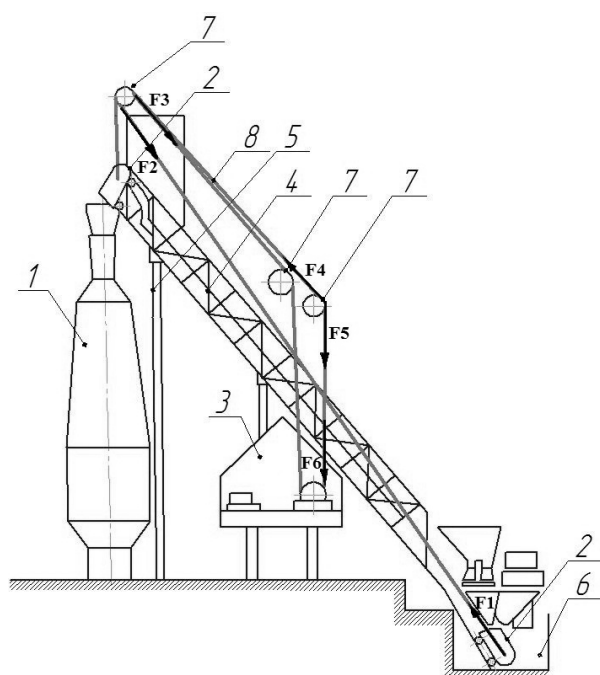
- силовое воздействие — статическое, динамическое, постоянное, переменное, периодическое и др.;

- частота вращения или скорость движения исполнительных органов;

- температурное воздействие — постоянное, переменное и др.;

- воздействие окружающей среды — коррозия, наличие абразива и др.;

- характер трения и вида механического износа как следствия.



Обозначения: 1 — доменная печь; 2 — сип;  
3 — машинный зал со сиповой лебедкой;  
4 — наклонный мост; 5 — колонны;  
6 — сиповая яма; 7 — блоки; 8 — канат

Рисунок 1 Сиповый подъемник

Например, для ситуации 4 указанные параметры можно представить в виде таблицы 1, в которой приводятся эксплуатационные воздействия на подшипники основных элементов сипового подъемника при выполнении одного цикла (подъем агломерата).

Данные параметры являются исходными для расчёта теоретической долговечности подшипников, являющегося основой имитационной модели, которая укажет на различный ресурс этих объектов. Модель также должна учитывать, что изменение взаимодействия элементов в процессе эксплуатации приводит к изменению значения действующих сил. Например, действие осевой нагрузки на сферические роликоподшипники приводит к перераспределению нагрузки и работе одного ряда роликов, что снижает ресурс подшипника в  $2^{3,3} = 9,85$  раза. Нарушение в распределении нагрузки между подшипниками скатов сипов может увеличить нагрузку на подшипник от  $F_1/4$  до  $F_1/2$ . Этот факт позволяет определить вероятность отказа подшипника по несущей способности и оценить возможный риск рассматриваемой ситуации.

Разработка имитационной модели обязательно включает этап проверки её адекватности, для выполнения которого можно использовать данные измерения или диагностирования на реальном объекте. Так, в случае модели для ситуации 6 проверку можно произвести с помощью результатов измерения виброскорости на металлоконструкции наклонного моста (табл. 2). Точки измерения вибрации приведены на рисунке 2.

Таблица 1

Эксплуатационные воздействия на подшипники сипового подъемника

Объект	Эксплуатационные воздействия				
	Нагрузка*, Н	Частота вращения, об/мин.	Температура, °С	Окружающая среда	Характер трения, вид износа
Подшипники лебёдки	$F_6/2$	$n_6$	$T_6$	Машинный зал	Трение качения, пластичная смазка, граничное трение, окислительный износ, абразивный износ и др.
Подшипники отклоняющего блока	$(F_4+F_5)/2$	$n_{6л1}$	$T_{6л1}$	Атмосфера доменного цеха	
Подшипники верхнего блока	$(F_2+F_3)/2$	$n_{6л2}$	$T_{6л2}$		
Подшипники сипа	$F_1/4$	$n_{ск}$	$T_{ск}$		

\* $F_i$  — усилие, возникающее в канате в соответствующей точке (рис. 1).

Таблица 2  
Среднеквадратичное значение (СКЗ)  
виброскорости

Точка измерения	СКЗ виброскорости, мм/с
41,0 м	3,8...5,3
17,5 м	3,8...5,1
8,4 м	11,0...13,3

Измерения проводились при наличии ослаблений резьбовых соединений между элементами металлоконструкций и уменьшении сечения балок из-за коррозии на участке разгона скипа (отметка 8,4 м). Влияние этих факторов проявилось в значениях виброскорости на отметке 8,4 м, которые в 2...3 раза превысили значения виброскорости на отметках 41 и 17,5 м.

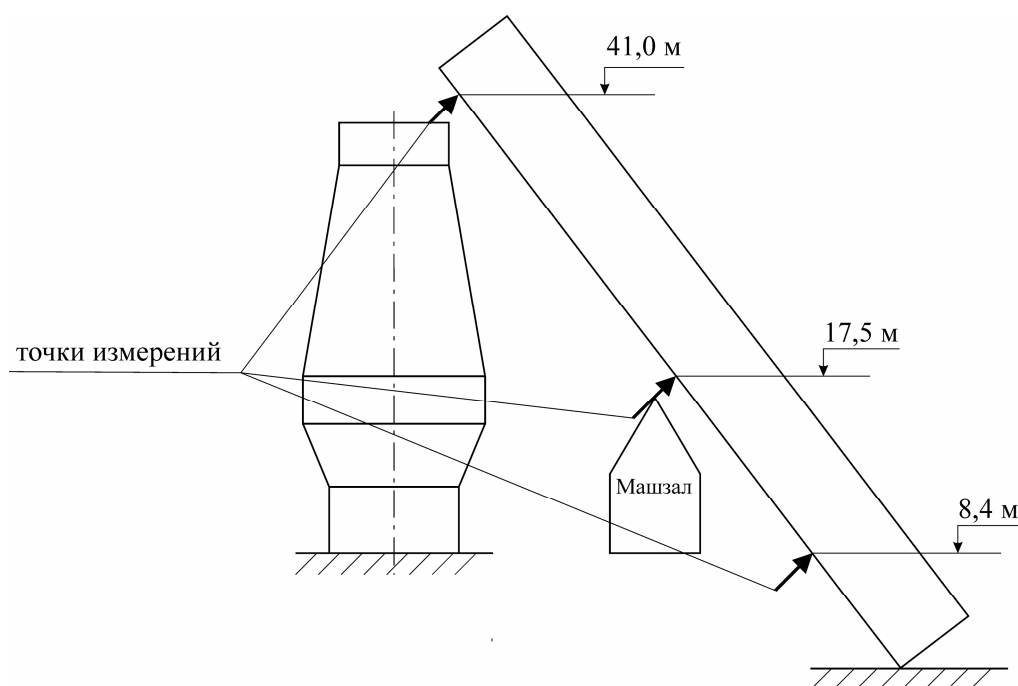


Рисунок 2 Расположение контрольных точек измерения вибрации

Таким образом, с помощью имитационного моделирования неисправностей оборудования представляется возможным получить оценки рисков вызываемых ими аварийных ситуаций.

Полученные расчётные значения рисков наряду с показателями надёжности, определёнными статистическими методами, диаграммами Парето, деревьями отказов, позволяют установить приоритеты между элементами оборудования и составляют первичную информацию для планирования их технического обслуживания и ремонтов. Для уточнения планируемых действий ремонтной службы следует проводить осмотры оборудования и контролировать наиболее информативные параметры, отражаю-

щие его работоспособность. Эту необходимость можно обосновать законом Хенриха, согласно которому на каждый несчастный случай на рабочем месте с тяжкими последствиями приходится 29 случаев получения лёгких травм и 300 потенциально опасных событий без последствий. Используя аналогии, можно продолжить: 3000 отказов и 30000 отклонений параметров от нормативных значений. То есть, благодаря раннему выявлению отклонений от работоспособного состояния при осмотрах имеется возможность снизить риски развития и реализации аварийных ситуаций.

Оперативными источниками информации о нарушениях в функционировании машин и риске возникновения аварийной

ситуации могут выступать токовые и частотные характеристики двигателей. На рисунке 3 приведён типичный вид этих параметров для двигателей скиповой лебёдки. Отклонения, замеченные при реализации определённого цикла подъёма скипа, служат основанием для проведения внепланового осмотра подъёмника.

В качестве факторов, обеспечивающих и отражающих работоспособность деталей и узлов машин, следует, в соответствии с [15], использовать: состояние неподвижных соединений, вид трения, взаимное расположение деталей, характер распределения сил, накопление усталостных повреждений. Для каждого из факторов, исходя из необходимости проведения ремонта, определены уровни: исправного состояния, малых отклонений, необходимости проведения ремонтных воздействий и предотказный. Уровни установлены по изменениям процессов износа и параметров взаимодействия элементов. Границы уровней разделяют границы естественно и патологического старения.

Для конкретного элемента оборудования на основании предложенной классификации формируется матрица снижения работоспособности (табл. 3), с помощью которой по результатам осмотров выполняется корректировка рассчитанной оценки риска.

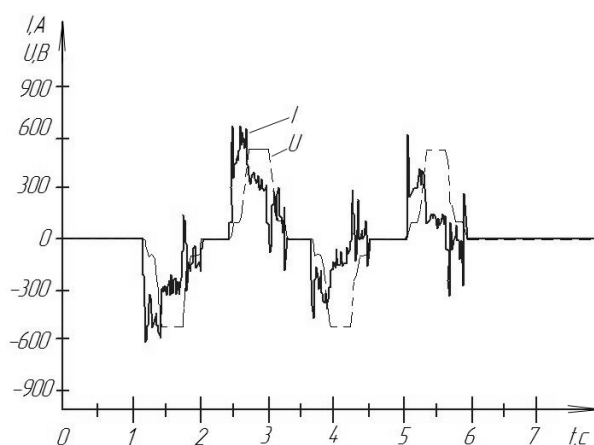


Рисунок 3 Пример токовой характеристики двигателя скиповой лебёдки при реализации цикла подъёма агломерата

Таблица 3

Матрица снижения работоспособности элемента оборудования (%)

Уровень состояния	Факторы работоспособности				
	Состояние неподвижных соединений	Вид трения	Характер распределения сил	Взаимное расположение деталей	Накопление усталостных повреждений
Исправное состояние	0	0	0	0	0
Малые отклонения	20	20	20	20	20
Проведение ремонтных воздействий	80	80	80	80	80
Предотказный	100	100	100	100	100

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Таким образом, для механического оборудования металлургических предприятий риск, связанный с отказами и аварийными ситуациями, предлагается рассматривать как возможный сценарий развития событий с известными последствиями.

Повышение информативности при анализе рисков, оценки которых опираются на статистические методы, достигается применением имитационного моделирования аварийных ситуаций и неисправных состояний оборудования, разработкой и реализацией разноуровневых карт осмотров с составлением матриц снижения работоспособности.

Получаемые данные следует использовать для определения приоритетности оборудования при планировании ремонтов.

## Библиографический список

1. Клюев, В. В. Подходы к построению систем оценки остаточного ресурса технических объектов [Текст] / В. В. Клюев, А. С. Фурсов, М. В. Филинов // Контроль. Диагностика. — 2007. — № 3. — С. 18–23.
2. Касьянов, Н. А. Исследование риск-ориентированного подхода в системе управления охраной труда (СУОТ) машиностроительного предприятия [Текст] / Н. А. Касьянов [и др.] // Вестник Кременчугского гос. политехн. ун-та. — 2009. — Вып. 4/2009 (57). Ч. 2. — С. 75–77.
3. Белодеденко, С. В. Методы количественного риск-анализа и безопасность механических систем [Текст] / С. В. Белодеденко, Г. Н. Биличенко // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2015. — № 7. — С. 2–9.
4. ГОСТ Р 51901-2002. Управление надёжностью. Анализ риска технологических систем [Текст]. — Введ. 2003-01-03. — Москва : Стандартинформ, 2003. — 24 с.
5. ГОСТ Р 51901.1-2002 (МЭК 60300-3-9:1995). Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем [Текст]. — Введ. 2009-01-04. — Москва : Стандартинформ, 2003. — 36 с.
6. ГОСТ Р 51901.5-2005 (МЭК 60300-3-1:2003). Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надёжности [Текст]. — Введ. 2005-01-02. — Москва : Стандартинформ, 2005. — 45 с.
7. ГОСТ Р 51901.11-2005 (МЭК 61882:2001). Менеджмент риска. Исследование опасности и работоспособности. Прикладное руководство [Текст]. — Введ. 2005-01-06. — Москва : Стандартинформ, 2005. — 42 с.
8. ГОСТ Р 51901.13-2005 (МЭК 61025:1990). Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей [Текст]. — Введ. 2005-01-06. — Москва : Стандартинформ, 2005. — 12 с.
9. ГОСТ Р 51901.14-2005 (МЭК 61078:1991). Менеджмент риска. Метод структурной схемы надёжности [Текст]. — Введ. 2005-01-07. — Москва : Стандартинформ, 2005. — 18 с.
10. ГОСТ Р 51901.15-2005 (МЭК 61165:1995). Менеджмент риска. Применение марковских процессов [Текст]. — Введ. 2005-01-06. — Москва : Стандартинформ, 2005. — 18 с.
11. Тубольцев, Л. Г. Вероятностная оценка риска возникновения аварийных ситуаций и инцидентов на примере доменного производства [Текст] / Л. Г. Тубольцев, Г. Н. Голубых, С. П. Суцев, В. В. Блишников // Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии : сборник науч. тр. — Днепрпетровск : ИЧМ НАН Украины, 2010. — Вып. 21. — С. 341–352.
12. Вишневский, Д. А. Компьютерная программа для расчёта надёжности оборудования и производственного риска в металлургической отрасли [Текст] / Д. А. Вишневский // Инновационные перспективы Донбасса. Т. 3 : Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. — Донецк : ДонНТУ, 2018. — С. 114–119.
13. Жеребин, Б. Н. Неполадки и аварии в работе доменных печей [Текст] / Б. Н. Жеребин, А. Е. Пареньков. — Новокузнецк, 2001. — 275 с.
14. Борисенко, В. Ф. Электромеханические системы транспортирующих механизмов [Текст] / В. Ф. Борисенко, А. А. Чепак, В. А. Сидоров и др.; под общ. ред. В. Ф. Борисенко. — Донецк : «Вебер» (Донецкое отделение), 2007. — 332 с.
15. Сидоров, В. А. Изменение работоспособности механического оборудования как восстанавливаемой системы [Текст] / В. А. Сидоров // Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики : материалы 17 межд. конф., 5–9 октября 2009 г., Ялта. — Киев : УИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ», 2009. — С. 21–23.

© Сидоров В. А.  
 © Ошовская Е. В.  
 © Шамрай Ю. А.  
 © Якимова А. В.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МОЗЧМ ДонНТУ Еронько С. П.,  
 к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяницким В. Н.

Статья поступила в редакцию 12.10.18.

**д.т.н. Сидоров В. А., к.т.н. Ошовська О. В., Шамрай Ю. О., Якімова А. В.** (ДонНТУ, м. Донецьк, ДНР)

**ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ ПРИ АНАЛІЗІ РИЗИКУ ВІДМОВ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ**

*Описано проблему отримання достовірної інформації для оцінювання ризику як основного параметра, що керує діяльністю ремонтної служби при реалізації сучасної стратегії технічного обслуговування і ремонту механічного обладнання металургійних підприємств. Показано шляхи підвищення інформативності при аналізі ризиків відмов на прикладі скіпового підйомника.*

**Ключові слова:** механічне обладнання, відмова, аналіз ризиків, технічне обслуговування, ремонт, скіповий підйомник.

**Doctor of Tech. Sc. Sidorov V. A., PhD Oshovskaya E. V., Shamray Yu. A., Yakimova A. V.** (DonNTU, Donetsk, DPR)

**INCREASE OF INFORMATIVITY IN THE RISK ANALYSIS OF FAILURES OF METALLURGICAL EQUIPMENT**

*The problem of obtaining the reliable information to assess the risk as the main control parameter of the repair service activity in the implementation of a modern strategy of the maintenance and repair of mechanical equipment of metallurgical enterprises is described. There have been shown the ways to increase the informativity while analyzing the risks of failure on the example of a skip hoist.*

**Key words:** mechanical equipment, failure, risk analysis, maintenance, repair, skip hoist.