

УДК 669.02/.09:004.422.422:159.9.078

д.т.н. Вишневский Д. А.,
Бондарь Н. А.,
Гайдар А. И.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ, УТОМЛЯЕМОСТИ И ОШИБАЕМОСТИ ОПЕРАТОРА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ С УЧЕТОМ УПРАВЛЯЕМЫХ И НЕУПРАВЛЯЕМЫХ ФАКТОРОВ

Разработана модель взаимосвязи работоспособности, утомляемости и ошибаемости оператора с учетом управляемых и неуправляемых факторов; также разработана модель взаимосвязи работоспособности, утомляемости, ошибаемости оператора и вероятности отказа металлургического оборудования. Разработаны шкалы оценки факторов, влияющих на качественное изменение показателей работоспособности — X , утомляемости — Y и ошибаемости — Z в процессе работы оператора. Разработанные взаимосвязи работоспособности, утомляемости и ошибаемости в виде графа представлены в непрерывной форме в виде систем дифференциальных уравнений.

Ключевые слова: человеческий фактор, отказы машин, работоспособность, утомляемость, ошибаемость, отказ металлургического оборудования.

Человеческий фактор (ЧФ) оказывает значительное, а в иных случаях — и определяющее, влияние на создание аварийных ситуаций при эксплуатации металлургического оборудования, которое в большинстве случаев представляет собой сложные технические системы (СТС) [1–3].

СТС не могут нормально функционировать без такого важного звена, как человек. Согласно изученной литературе, около 40 % отказов различных технических систем прямо или косвенно связано с ЧФ, а 20 % — напрямую с человеком [4–6]. В этой связи актуально создание моделей оценки изменения надежности металлургического оборудования (детерминистских, статистических, вероятностных, имитационных и др.), в которых наряду с параметрами надежности технических узлов и систем, входящих в СТС, представлены показатели, связанные с ЧФ, влияющие на общую надежность системы.

При дальнейшем развитии подхода, сформулированного в [7], необходимо также учесть другие ограничивающие факторы, которые предлагаем разделить на две

группы: неуправляемые факторы внешней среды, например время суток и года, и управляемые факторы. В качестве последних в модели учитываются в виде соответствующих коэффициентов следующие факторы: психофизические факторы соответствия качеств работника требованиям профессии; состояние здоровья; рациональность конструкции рабочего места оператора; скорость изменения производства за счет инноваций; возраст и опытность оператора; санитарно-гигиенические и климатические условия работы; рациональность режима труда и отдыха работника и др.

Часть перечисленных факторов может быть введена в модель в виде динамических показателей психофизического состояния оператора, которые замеряются и поступают в модель в виде функций от времени. Все коэффициенты, используемые в модели для корректировки исходных параметров, также приведены к унифицированным шкалам (табл. 1).

На рисунке 1 отражено взаимовлияние показателей-переменных X , Y , Z , а также направление воздействия и точки приложе-

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

ния факторов организации внутренней среды производства и некоторых внешних факторов среды. Схема организована в виде ориентированного графа, где вершинами

являются показатели X, Y, Z, направление дуг указывает в сторону показателя, на который оказывается влияние, а знак дуги отражает прямую (+) или обратную (–) связь.

Таблица 1

Шкалы оценки факторов, влияющих на качественное изменение показателей работоспособности — X, утомляемости — Y и ошибаемости — Z в процессе работы оператора

Интервал всех значений фактора	Классы интервалов разбиения корректирующих коэффициентов для учета их в математической модели		
	Класс С	Класс В	Класс А
[0, 1]	[0, 0.3]	(0.3, 0.7]	(0.7, 1]
Факторы	Описание классов для данного фактора		
E1 — психофизические факторы соответствия качеств работника требованиям профессии	Плохо соответствует	Средняя степень соответствия	Хорошее соответствие
E2 — рациональное устройство рабочего места	Нерациональное	Рациональное	Рационально на высоком уровне
E3 — скорость изменения производства за счет инноваций	Очень быстро	Быстро	Умеренно
E4 — молодость работника, его физическая выносливость	Немолод, физически не подготовлен	Средняя степень соответствия	Молод, физически вынослив
E5 — опытность работника	Опыта нет или очень мало	Достаточно опытен	Очень опытен
E6 — образовательный уровень работника	Минимальное образование	Средняя степень соответствия	Образование по профилю
E7 — санитарно-климатические условия работы	Плохие	Нормальные	Хорошие
E8 — коэффициент сезона года	Плохо способствует нормальной работе	Средне способствует нормальной работе	Хорошо способствует нормальной работе
E9 — коэффициент времени суток	Плохо способствует нормальной работе	Средне способствует нормальной работе	Хорошо способствует нормальной работе
E10 — рациональные условия организации режима труда и отдыха	Плохо способствует нормальной работе	Средне способствует нормальной работе	Хорошо способствует нормальной работе
E11 — степень модернизации производства с уклоном в производственную безопасность	Низкая степень модернизации	Средняя степень модернизации	Высокая степень модернизации
E12 — внешние факторы среды, влияющие на работу оператора (атмосферное давление, солнечная активность и др.)	Плохо способствует нормальной работе	Средне способствует нормальной работе	Хорошо способствует нормальной работе

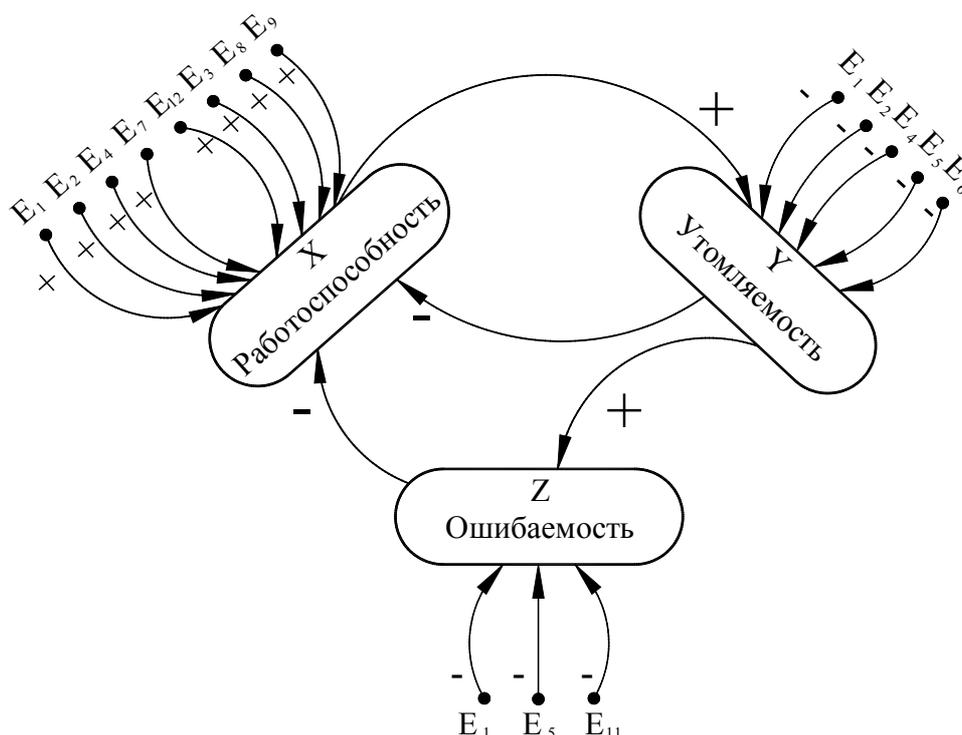


Рисунок 1 Граф связей функциональных характеристик оператора и влияющих факторов производства и внешней среды

Модель 3 соответствующая схеме рисунка 1, представлена в непрерывной форме в виде систем дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \tilde{a}_1 \frac{x}{d_1x + c_1} \cdot \left(1 - \frac{x}{\tilde{k}_1}\right) - \tilde{b}_1xy - \tilde{h}_1xz; \\ \frac{dy}{dt} = \tilde{a}_2 \frac{y}{d_2y + c_2} \cdot \left(1 - \frac{y}{\tilde{k}_2}\right) + \tilde{b}_2xy; \\ \frac{dz}{dt} = \tilde{a}_3 \frac{z}{d_3z + c_3} \cdot \left(1 - \frac{z}{\tilde{k}_3}\right) + \tilde{b}_3yz. \end{cases} \quad (1)$$

Начальные условия системы:

$$x_0 = x(0), y_0 = y(0), z_0 = z(0).$$

Параметры \tilde{a}_i , \tilde{b}_i , \tilde{k}_i , \tilde{h}_i являются скорректированными параметрами модели при помощи дополнительных коэффициентов, соответствующих текущему состоянию ограничивающих факторов (табл. 1); остальные коэффициенты системы (1) равны соответствующим коэффициентам системы (2):

$$x_0 = x(0), y_0 = y(0), z_0 = z(0). \quad (2)$$

Общий вид перехода от параметров a_i , b_i , k_i , h_i к скорректированным представлен формулами (3–5).

$$\begin{aligned} \tilde{a}_i &= f_{a_i}(a_i, e_1, \dots, e_{12}); \\ \tilde{b}_i &= f_{b_i}(b_i, e_1, \dots, e_{12}); \\ \tilde{k}_i &= f_{k_i}(k_i, e_1, \dots, e_{12}); \\ \tilde{h}_i &= f_{h_i}(h_i, e_1, \dots, e_{12}), \\ i &= 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (3)$$

Модель является основной для анализа функциональных характеристик человека-оператора и влияющих на них факторов, а также для предварительной оценки и подбора оптимальных управляемых параметров производства, которые обеспечивали бы безопасность оператора и надежную работу управляемых им систем.

Система (1) представляет собой логико-математическую часть модели. Для нахождения ее решения используются подходы

имитационного моделирования с применением соответствующего программного обеспечения.

По классификации задач, решаемых имитационными моделями, модель относится к классу «Системная динамика». В настоящее время для решения задач системной динамики используются такие программные пакеты, как VenSim, iSink, PowerSim, AnyLogic и др. [8].

В данной работе имитационное моделирование выполняется с помощью инструмента AnyLogic, который, являясь разработкой отечественных программистов, имеет все средства для создания и реализации в его среде имитационной модели, анализа модели на чувствительность к изменению параметров, устойчивость решения и визуализации результатов моделирования [8, 9].

Модель взаимосвязи работоспособности, утомляемости, ошибаемости оператора и вероятности отказа металлургического оборудования (модель 4) является объединением моделей 1 и 2 [7]. Наиболее проблемной частью при объединении моделей является связывание ошибаемости оператора (показатель X) и вероятностей ошибочных действий оператора $P_{ч1}, P_{ч2}, \dots, P_{чn}$.

Запишем вероятности ошибочных действий оператора в виде вектора:

$$\bar{P}_ч = \{P_{ч1}, P_{ч2}, \dots, P_{чn}\}. \quad (4)$$

Модель 1 оперирует с вектором вероятностей $\bar{P}_ч$, а в модели 2 понятие ошибаемости оператора используется безотносительно вида ошибочного действия [7].

Очевидно, что обе величины (вероятность ошибочного действия и показатель ошибаемости оператора) обусловлены одной причиной — ошибкой человека (ЧФ), имеют одинаковое направление, даже имеют одинаковые шкалы измерения [0, 1], однако по происхождению разные. Вероятность ошибочного действия оператора определяется, как правило, статистически с использованием аппарата математической

статистики, а показатель ошибаемости — на основании качественных представлений, зависит от времени работы оператора и находится из решения системы уравнений (2).

Очевидно, что показатель ошибаемости может быть разным для разных действий оператора, поэтому введем вектор ошибаемости, компоненты которого соответствуют разным видам ошибок:

$$\bar{Z}(t) = \{z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t)\},$$

где нумерация координат соответствует принятой в модели 1 для вероятностей из группы «Человеческий фактор» [7].

Логично предположить, что векторы $\bar{P}_ч$ и \bar{Z} связаны положительной корреляционной зависимостью линейной или криволинейной формы. Для выявления такой зависимости для вектора \bar{Z} берутся компоненты, усредненные за некоторый промежуток времени t или соответствующие начальным условиям z_{i0} модели 2 [7].

Тогда модель 2 можно расширить, используя вместо одного показателя Z вектор из n компонент \bar{Z} , начальные приближения для которых берутся из вектора вероятностей $\bar{P}_ч$, с корректировкой на коэффициент масштаба k_z . Таким образом, $\bar{Z} = k\bar{P}_ч$.

В результате модель 3 может быть представлена следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \tilde{a}_1 \frac{x}{d_1x + c_1} \cdot \left(1 - \frac{x}{\tilde{k}_1}\right) - \tilde{b}_1xy - \tilde{h}_1xz; \\ \frac{dy}{dt} = \tilde{a}_2 \frac{y}{d_2y + c_2} \cdot \left(1 - \frac{y}{\tilde{k}_2}\right) + \tilde{b}_2xy; \\ \frac{dz_1}{dt} = \tilde{a}_{31} \frac{z_1}{d_{31}z_1 + c_{31}} \cdot \left(1 - \frac{z_1}{\tilde{k}_{31}}\right) + \tilde{b}_{31}yz_1; \\ \frac{dz_2}{dt} = \tilde{a}_{32} \frac{z_2}{d_{31}z_2 + c_{32}} \cdot \left(1 - \frac{z_1}{\tilde{k}_{32}}\right) + \tilde{b}_{32}yz_2; \\ \dots \\ \frac{dz_n}{dt} = \tilde{a}_{3n} \frac{z_n}{d_{3n}z_n + c_{3n}} \cdot \left(1 - \frac{z_n}{\tilde{k}_{3n}}\right) + \tilde{b}_{3n}yz_n. \end{cases} \quad (5)$$

Начальные условия системы (5) имеют вид:

$$x_0 = x(0), y_0 = y(0), z_{10} = z_1(0), \dots, z_{n0} = z_n(0).$$

Оценка вероятности отказа металлургического оборудования с учетом технического фактора и человеческого фактора определяется по формуле

$$R = f(p_{c1}, p_{c2}, \dots, p_{cn}, p_{T1}, p_{T2}, \dots, p_{Tm}) \quad [7]$$

с учетом коррекции для вероятностей, соответствующих человеческому фактору, выполненной с использованием решений системы (5).

Выводы. Основная задача, решаемая данной моделью, — это прогноз динамики изменения факторов, влияющих на функ-

циональные характеристики оператора металлургического оборудования, в результате чего оператором может быть совершена ошибка, приводящая к выходу из строя всей системы. В качестве таких функциональных характеристик были выбраны факторы: работоспособность (X), утомляемость (Y) и ошибаемость (Z) оператора в течение рабочего дня.

В дальнейшей работе необходимо произвести расчет оценки влияния человеческого фактора в аварийной ситуации при эксплуатации пневмосистемы манипулятора и механизма подъема и поворота свода и электродов агрегата «печь-ковш» с учетом технических и человеческих факторов.

Библиографический список

1. Доброборский, Б. С. *Безопасность машин и человеческий фактор [Текст] : монография / под ред. С. А. Волкова. — СПб. : СПбГАСУ, 2011. — 111 с.*
2. Вишневский, Д. А. *Анализ влияния «человеческого фактора» на надежность металлургического оборудования [Текст] / Д. А. Вишневский, Б. А. Сахаров // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2018. — Вып. 12 (55). — С. 97–104.*
3. Руу, Р. *Human reliability analysis methods for probabilistic safety assessment [Text] / Pekka Ruu. — Espoo : Technical Research Centre of Finland (VTT), 2000. — 63 p.*
4. Вишневский, Д. А. *Влияние организационных факторов на надежность металлургического оборудования // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование : сб. науч. тр. 4-й междунар. молодеж. науч.-практ. конф. — Курск : Университетская книга, 2017. — Т. 1. — С. 146–149.*
5. *Зарубежный опыт проведения профессионального отбора // Охрана труда. Зарубежный опыт : экспресс-информация / ВНИИ охраны и экономики труда. — М., 2009. — Вып. 3. — С. 3–25.*
6. Сулейманов, М. Г. *Оценка надежности персонала при профессиональном отборе кадров в металлургии [Текст] / М. Г. Сулейманов, Л. Ш. Абдуллина // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. — 2014. — № 3. — С. 73–78.*
7. Вишневский, Д. А. *Математическое моделирование взаимосвязи работоспособности, утомляемости и ошибаемости человека-оператора при эксплуатации металлургических машин и агрегатов [Текст] / Д. А. Вишневский, А. Л. Сотников, Н. А. Бондарь // Инновационные перспективы Донбасса : материалы 7-й междунар. науч.-практ. конф. Т. 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. — Донецк : ГОУ ВПО «ДонНТУ», 2021. — С. 107–112.*
8. Куприяшкин, А. Г. *Основы моделирования систем [Текст] / А. Г. Куприяшкин ; Норильский индустр. ин-т. — Норильск : НИИ, 2015. — 135 с.*
9. Боев, В. Д. *Моделирование в среде AnyLogic [Текст] / В. Д. Боев. — М. : Юрайт, 2017. — 298 с.*

© Вишневский Д. А.

© Бондарь Н. А.

© Гайдар А. И.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТИ Харламовым Ю. А.,
д.т.н., проф., зав. каф. АТ ЛГУ им. В. Даля Замотой Т. Н.*

Статья поступила в редакцию 30.05.2022.

Doctor of Technical Sciences Vishnevskiy D. A., Bondar N. A., Gaidar A. I. (DonSTI, Alchevsk, LPR)
**MATHEMATICAL MODELING OF INTERRELATION BETWEEN THE OPERABILITY,
FATIGUE AND ERROR RATE OF THE METALLURGICAL INDUSTRY OPERATOR,
CONSIDERING THE CONTROLLED AND UNCONTROLLED FACTORS**

A model of interrelation between the operability, fatigue and operator's error rate has been developed, considering the controlled and uncontrolled factors, and a model of interrelation between the operability, fatigue, operator's error rate and the probability of failure of metallurgical equipment has also been developed. Scales of evaluation of factors affecting the qualitative change in performance indicators — X , fatigue — Y and error rate — Z during the operator's work have been developed, as well. The developed interrelation of operability, fatigue and error rate in a graph form are presented in continuous form as a differential equations systems.

Key words: *human factor, machine failures, operability, fatigue, error rate, metallurgical equipment failures.*