

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2021-24-41-46>

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА НА БЕЗОТКАЗНОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ЦЕХОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Вишнеvский Д.А., Сотников А.Л.

Ключевые слова: безотказность оборудования, человеческий фактор, дерево отказов, отказ всей системы, чувствительность модели, металлургическое оборудование, сложная техническая система.

Аннотация. Представлена математическая модель вероятности отказа сложной технической системы механического оборудования управляемой человеком-оператором, которая состоит из двух частей: первая из которых соответствует основным техническим узлам оборудования (отказ которых может привести к отказу всего устройства), вторая характеризует оператора (точнее, его действия или бездействие, приводящие к созданию аварийной ситуации).

Также предложена оценка чувствительности модели при различных вариантах изменения входных параметров: изменение показателей на 1% в пределах доверительного интервала, при этом показатели изменяются как по одному, так и по группам, включая изменения всех показателей одновременно. Данной процедуре можно подвергнуть все входные вероятности как группы технических факторов, так и группы человеческих факторов.

MATHEMATICAL MODELING FOR HUMAN FACTOR INFLUENCE ON THE EQUIPMENT RELIABILITY IN THE MACHINE BUILDING SHOPS OF METALLURGICAL ENTERPRISES

Vishnevskiy D.A., Sotnikov A.L.

Keywords: equipment reliability, human factor, fault tree, failure of the entire system, model's sensitivity, metallurgical equipment, complex engineering system.

Abstract. A mathematical model of failure probability for a complex man-controlled technical system of mechanical equipment is presented, which consists of two parts: the first one related to the main technical units of the equipment (which failure can result in the entire device failure), the second one relates to the operator (specifically, his actions or idleness resulting in an emergency situation).

The model sensitivity assessment is proposed as well for various input parameters changing options: 1% indicators change within the confidence interval, while the indicators change both individually and in groups, including changes in all indicators at the same time. All input probabilities for both the group of technical factors and the group of human factors can be subjected to this procedure.

Человеческий фактор (ЧФ) оказывает значительное, а в иных случаях, и определяющее влияние на создание аварийных ситуаций при эксплуатации механического оборудования машиностроительных цехов металлургических предприятий, которое в подавляющем числе случаев представляет собой сложные технические системы (СТС) [1, 2].

В основе данной модели лежит представление СТС механического оборудования (МО), управляемой человеком-оператором, в виде системы связанных элементов, часть из которых соответствует основным техническим узлам оборудования, отказ которых может привести к отказу всего

оборудования, а другая часть – характеризует оператора (точнее, его действия или бездействие, приводящие к созданию аварийной ситуации).

Модель носит вероятностный характер. Для построения модели используется «дерево отказов», где на основе входных данных о вероятностях отказов простых элементов, рассчитывается вероятность головного события – отказа всей системы [3, 4].

Влияние ЧФ на безотказность оборудования определяется путем введения в схему «дерева отказов» событий, связанных с ошибками оператора, как отдельных элементов схемы, расчетом вероятности всего оборудования и выявлении в итоговой оценке роли ЧФ [5].

Модель реализуется следующим образом

Шаг 1. Построение базовой модели.

– Анализируется работа выбранного оборудования с точки зрения возможности отказа всей системы при отказе технических узлов и ошибок оператора.

– Строится «дерево отказов».

– По справочным, расчетным или экспериментальным данным устанавливаются вероятности отказов техническим элементам и ошибок оператора(ов) в течение определенного времени T .

– На основании теорем алгебры вероятностей определяется вероятность $P(S)$ финального события S – «Отказ всей системы», которую представим как функцию входных вероятностей в следующем виде [6]:

$$R = P(S) = f(P(A_{ч1}), P(A_{ч2}), \dots, P(A_{чn}), P(A_{T1}), P(A_{T2}), \dots, P(A_{Tm})), \quad (1)$$

где $P(\dots)$ – вероятность соответствующего события;

$A_{ч1}, A_{ч2}, \dots, A_{чn}$, – события, соответствующие ошибочным действиям человека;

$A_{T1}, A_{T2}, \dots, A_{Tm}$ – события, соответствующие отказам технических узлов оборудования;

n или m – число элементов в расчетной схеме, связанных с человеческим и техническими факторами соответственно;

вид функции f определяется исходя из принятой схемы «дерева отказов» и формул теории вероятностей.

Примем обозначения: $P(A_{ч1}) = p_{ч1}, P(A_{ч2}) = p_{ч2}, \dots, P(A_{чn}) = p_{чn},$
 $P(A_{T1}) = p_{T1}, P(A_{T2}) = p_{T2}, \dots, P(A_{Tm}) = p_{Tm}.$

Тогда формула (1) примет вид:

$$R = f(p_{ч1}, p_{ч2}, \dots, p_{чn}, p_{T1}, p_{T2}, \dots, p_{Tm}). \quad (2)$$

Шаг 2. Исследование модели на чувствительность к изменению входных параметров.

Под чувствительностью модели в данном случае понимается определение чувствительности конечной вероятности отказа всей системы R

на изменения значений вероятностей отдельных элементов системы $P_{ч1}, P_{ч2}, \dots, P_{чn}, P_{Т1}, P_{Т2}, \dots, P_{Тm}$ в определенных пределах [7, 8].

В данной работе анализируется чувствительность модели при различных вариантах изменения входных параметров: 1% изменение показателей, а также изменения в пределах доверительного интервала. При этом показатели изменяются как по одному, так и по группам, включая изменения всех показателей одновременно.

Случай А. Чувствительность модели к поодиочному изменению входных показателей.

Пусть вероятность p^* одного из элемента системы (например, из группы ЧФ) в модели 1 получит приращение Δp^* , которое может быть как положительного, так и отрицательного знака. Тогда изменение выходного показателя R можно оценить по абсолютной величине по формуле (3):

$$\Delta R_* = f(p_{ч1}, \dots, p_* + \Delta p_*, \dots, p_{чn}, p_{Т1}, p_{Т2}, \dots, p_{Тm}) - f(p_{ч1}, \dots, p_*, \dots, p_{чn}, p_{Т1}, p_{Т2}, \dots, p_{Тm}), \quad (3)$$

и по относительной величине по формуле (4):

$$\delta R_* = \frac{\Delta R_*}{f(p_{ч1}, \dots, p_*, \dots, p_{чn}, p_{Т1}, p_{Т2}, \dots, p_{Тm})} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Наиболее представительной оценкой чувствительности модели является относительная оценка (4), которую и будем называть **показателем чувствительности модели на изменение входного параметра p^*** . Данной процедуре можно подвергнуть все входные вероятности как группы технический фактор (ТФ), так и группы ЧФ.

Для сравнительной оценки влияния входных вероятностей на конечный результат выберем 1% увеличение каждого из факторов ($\Delta p_* = 0,01 p_*$). В результате получим вектор чувствительностей (5):

$$\bar{d} = \{\delta R_{ч1}, \dots, \delta R_{чn}, \delta R_{Т1}, \dots, \delta R_{Тm}\}. \quad (5)$$

каждая из компонент которого показывает, на сколько процентов изменится выходной показатель R , если соответствующая компоненте входная вероятность p^* увеличится на 1 %.

Ранжирование компонент вектора чувствительностей в порядке убывания позволяет выявить в системе МО наиболее значимые с позиций безотказности технические и человеческие факторы. В приоритете будут элементы с наибольшей чувствительностью.

Случай Б. Оценка чувствительности модели к групповым изменениям входных показателей.

Этот случай является продолжением и обобщением случая А. Только показатели изменяются одновременно и по группам. Соответственно получают разные оценки чувствительности модели.

1. Чувствительность модели на изменение вероятностей группы ЧФ:

$$\delta R_{q_i} = \frac{f(p_{q_1} + \Delta p_{q_1}, \dots, p_{q_m} + \Delta p_{q_1}, p_{T_1}, \dots, p_{T_m}) - f(p_{q_1}, \dots, p_{q_m}, p_{T_1}, \dots, p_{T_m})}{f(p_{q_1}, \dots, p_{q_m}, p_{T_1}, \dots, p_{T_m})} \cdot 100\% \quad (6)$$

2. Чувствительность модели на изменение вероятностей группы ТФ:

$$\delta R_T = \frac{f(p_{q_1}, \dots, p_{q_m}, p_{T_1} + \Delta p_{T_1}, \dots, p_{T_m} + \Delta p_{T_m}) - f(p_{q_1}, \dots, p_{q_m}, p_{T_1}, \dots, p_{T_m})}{f(p_{q_1}, \dots, p_{q_m}, p_{T_1}, \dots, p_{T_m})} \cdot 100\% \quad (7)$$

3. Чувствительность модели на одновременное изменение вероятностей групп ТФ и ЧФ:

$$\delta R_{q+T} = \frac{f(p_{q_1} + \Delta p_{q_1}, \dots, p_{q_m} + \Delta p_{q_m}, p_{T_1} + \Delta p_{T_1}, \dots, p_{T_m} + \Delta p_{T_m}) - f(p_{q_1}, \dots, p_{q_m}, p_{T_1}, \dots, p_{T_m})}{f(p_{q_1}, \dots, p_{q_m}, p_{T_1}, \dots, p_{T_m})} \cdot 100\% \quad (8)$$

Случай В. Оценка чувствительности модели к изменениям входных показателям в пределах их доверительных интервалов.

Поскольку используемые в модели входные показатели - вероятности отказов $p_{q_1}, p_{q_2}, \dots, p_{q_m}, p_{T_1}, p_{T_2}, \dots, p_{T_m}$ являются, как правило, результатами статистической обработки данных, и для их адекватного применения недостаточно использовать только точечные оценки. Необходимо учитывать разброс входных вероятностей в пределах их доверительных интервалов (p_i^H, p_i^G) , который строится с использованием соответствующего закона распределения.

Тогда для каждой входной вероятности отказа p_i строится доверительный интервал, далее выполняется расчет чувствительности модели по формуле (4) для нижнего и верхнего конца доверительного интервала. После этого делается прогноз на верхний и нижний пределы изменения выходной вероятности R отказа всей системы.

Выводы. Сравнение результатов оценок чувствительности по формулам (6) – (8) позволят оценить роль ЧФ в безотказном функционировании сложных технических систем механического оборудования машиностроительных цехов металлургических предприятий, а ранжированный ряд компонент вектора \bar{d} поможет выявить приоритетные направления для улучшений характеристик надежности механического оборудования как за счет модернизации технических узлов системы, так и путем оптимизации действий и условий труда человека-оператора.

Оценка чувствительности модели к изменениям входных показателям в пределах их доверительных интервалов позволит оценить влияние ЧФ в отказе механического оборудования в интервальной форме, в результате чего надежность выводов будет существенно повышена. Ранжирование факторов отказа, связанных как с техническими причинами, так и ЧФ, также примет интервальную форму.

Список литературы

1. Доброборский Б.С. Безопасность машин и человеческий фактор: Монография / под ред. д-ра техн. наук, проф. С.А. Волкова. – СПб.: СПбГАСУ, 2011. – 111 с.

2. Вишнеvский Д.А. Анализ влияния «человеческого фактора» на надежность металлургического оборудования / Д.А. Вишнеvский, Б.А. Сахаров // Сборник научных трудов ДонГТУ. – ЛНР, Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР ДонГТУ, 2018. – Вып. 12 (55). – С. 97-104.
3. Полоvко А.М. Основы теории надежности. Практикум / А.М. Полоvко, С.В. Гуров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 560 с.
4. Решетов Д.Н. Надежность машин / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев. – М.: Высшая школа, 1988. – 238 с.
5. Хенли, Э.Дж. Надежность технических систем и оценка риска / Э.Дж. Хенли, Х. Кумамото. Пер. с англ. В.С. Сыромятников, Г.С. Деминой / Под общ. ред. В.С. Сыромятникова. – М.: Машиностроение, 1984. – 528 с.
6. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – 9-е изд. – М.: Высшая школа, 2003. – 479 с.
7. Kleiber M. Parameter Sensitivity in Nonlinear Mechanics / M. Kleiber, H. Antunez, T.D. Hien and P. Kowalczyk, Theory and Finite Element Computations, John Wiley & Sons, New York, NY, 1997.
8. Фетисов В.Н. Анализ чувствительности марковских моделей и его использование для оценки влияния ошибок идентификации на критерий качества управления / II Междунар. конф. «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO 03. – М.: ИПУ, 29-31 января 2003. – С. 1302-1319.

References

1. Dobroborskiy B.S. Safety of machines and the human factor: Monograph / Ed. by dr. of tech. sc., prof. S.A. Volkov. –SPb.: SPbSUACE, 2011. – 111 p.
2. Vishnevskiy D.A. Analysis of the "human factor" influence on the metallurgical equipment reliability / D.A. Vishnevskiy, B.A. Sakharov // Bulletin of Scientific Works of DonSTU. – LPR, Alchevsk: SEI HPE LPR DonSTU, 2018. – Iss. 12(55). – P. 97-104.
3. Polovko A.M. Fundamentals of the reliability theory. Workshop / A.M. Polovko, S.V. Gurov. – SPb.: BHV-Petersburg, 2006. – 560 p.
4. Reshetov D.N. Reliability of machines / D.N. Reshetov, A.S. Ivanov, V.Z. Fadeyev. – М.: Higher School, 1988. – 238 p.
5. Henley E.J. Reliability of Technical Systems and Risk Assessment / E.J. Henley, H. Kumamoto. Translated from English B.S. Syromyatnikov, G.S. Dyomina / Under the general editorship of B.S. Syromyatnikov. – М.: Mechanical Engineering, 1984. – 528 p.
6. Gmurman V.Ye. Theory of Probability and Mathematical Statistics. – 9th ed. – М.: Higher school, 2003. – 479 p.
7. Kleiber M. Parameter Sensitivity in Nonlinear Mechanics / M. Kleiber, H. Antunez, T.D. Hien and P. Kowalczyk, Theory and Finite Element Computations, John Wiley & Sons, New York, NY, 1997.
8. Fetisov V.N. Sensitivity analysis of Markov's models and its use to assess the impact of identification errors on the criterion of control quality // II Int. conf.

"System identification and control tasks" SICPRO 03. – М.: IPU, 2003. – P.1302-1319.

Вишнеvский Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, доцент, проректор по научной работе, заведующий кафедрой машин металлургического комплекса, Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР, dimavish.79@mail.ru	Vishnevskiy Dmitriy Aleksandrovich – candidate of technical sciences, associate professor, vice-rector on the scientific work, head of the Department of Metallurgical Machines, Donbass State Technical Institute, Alchevsk, LPR, dimavish.79@mail.ru
Сотников Алексей Леонидович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры механического оборудования заводов черной металлургии им. проф. В.Я. Седуша, Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР, 0713019870@mail.ru	Sotnikov Alexey Leonidovich – doctor of technical sciences, associate professor, professor of the Department of Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgy Plants named after prof. V.Ya. Sedusha, Donetsk National Technical University, Donetsk, DPR, 0713019870@mail.ru

Received 05.04.2021