

УДК 004.412.4

**О. Н. Друзь**, канд. техн. наук, доцент, **С. В. Житная**, ст. преподаватель  
Государственное образовательное учреждение высшего образования Луганской  
Народной Республики «Луганский государственный университет имени Владимира  
Даля, г. Луганск, Луганская Народная Республика  
Тел.: 072-199-18-01; E-mail: [zhytnaya@mail.ru](mailto:zhytnaya@mail.ru)

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО РИСКА В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

*В статье рассмотрены вопросы математического моделирования влияния на производственный риск надежности технических систем с наличием или возможностью возникновения при их эксплуатации вредных и опасных производственных факторов.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, несчастный случай (НС), машиностроительное производство (МВ), машиностроительное оборудование (МО), промышленный робот (ПР), надежность, достоверность, интенсивность отказа.

**O. N. Druz. S. V. Zchutnayay**

### MATHEMATICAL MODELING OF PRODUCTION RISK IN MACHINE-BUILDING PRODUCTION

*In the article the questions of mathematical modeling of impact on production risk reliability of technical systems with the presence or possibility of exploitation, harmful and dangerous production factors.*

**Keywords:** mathematical modeling, accident, machine-building production (MBP), machine-building equipment (MBE), industrial robot (ER), reliability, credibility, the intensity of failure.

**Анализ состояния вопроса.** В настоящее время в машиностроительном производстве наблюдается высокая интенсивность работы, внедряется продуктивное оборудование и технические средства безопасности, расширяются возможности существующих видов оборудования, путем оснащения средствами робототехники, при наличии их неполного соответствия современным требованиям безопасности, что приводит к возникновению специфических вредных и опасных производственных факторов (ВОПФ) [1]. Поэтому системный анализ взаимосвязей между новым и старым оборудованием является неотъемлемым, с обязательным учетом степени изношенности последнего, а также внедрение действенных средств контроля за состоянием его работы, осуществление технологических процессов и оснащение средствами безопасности.

Также необходимо учитывать то, что до 25% опасных, критических и аварийных ситуаций (ОС, КС, АС) возникают вследствие снижения надежности отдельных узлов, как машиностроительного оборудования (МО), так и промышленных роботов (ПР). Это приводит к возникновению один раз за три рабочие смены указанных ситуаций и доводит их количество до 50 на каждый несчастный случай, что, в свою очередь, ведет к нетрудоспособности работника на период до 15 дней. Поскольку в мелкосерийном производстве довольно часто возникает необходимость в перепрограммировании, наладке, ремонте, монтаже, смазке, очистке различных узлов ПР, машиностроительного и прочего технологического оборудования, то риск получения травм существует не только в основных профессиях МП, а и во вспомогательных.

Это связано с тем, что последние принимают существенное участие в выявлении и ликвидации неполадок и явлений, связанных, как с осуществлением технологического процесса, так и с возможностью возникновения ОС, КС, АС. В частности, доля участия наладчиков в их ликвидации составляет до 28%, слесарей-монтажников – до 51,5%. [2].

Исследования показывают, что при распределении количества несчастных случаев в зависимости от вида выполняемых работ, степени участия человека-оператора в управлении ПР, 80% из них приходится на использование манипуляторов с ручным контролем управления при одинаковом распределении травматизма при выполнении различных видов работ.

По данным [3, 4] основными причинами производственного травматизма в рабочих зонах манипуляторов являются:

- непредусмотренное движение исполнительных устройств при осуществлении управляющей программы, наладке, ремонте, а также во время обучения – 30,6%;
- неожиданные включения и движение дополнительных устройств – 28,3%;
- отказы в работе, несвязанные с движением, – 17,4%;
- невыполнение команды о начале движения – 9,5%;
- выбрасывание, скатывание или падение материалов – 8,5%;
- внезапные остановки – 5,3%.

При этом необходимо отметить, что 38,1% НС являются следствием ошибочных действий человека-оператора. В соответствии с требованиями действующих нормативных документов [1], основными источниками НС могут быть, как сами ПР, так и несогласованность их в работе с оборудованием, а также причины, обусловленные человеческим фактором. К этому можно отнести:

1) Неисправность или повреждение:

- защитных средств, например, защитных ограждений, цепей блокировок и др. (отсутствие блокировочных устройств является причиной большинства НС, связанных с обслуживанием передач приводов, поскольку операторы открывают их ограждения на работающем оборудовании для ликвидации технологических нарушений и травмируются подвижными элементами открытых передач);
- источников питания или распределительных устройств;
- систем управления ПР, датчиков и других устройств, обеспечивающих безопасную эксплуатацию;

2) Наличие подвижных элементов ПР, которые являются носителями механической опасности (как самостоятельно, так и при взаимодействии с оборудованием):

- накопление энергии движущихся элементов, электрических зарядов, гидравлических или пневматических систем ПР;
- электрические, гидравлические или пневматические источники питания;

3) Наличие или возможность возникновения ВОПФ, связанных с технологическим процессом, который обслуживается ПР, к которым можно отнести общеизвестные, такие, как: корпусный, жидкостный и воздушный шум, общая и локальная вибрации; недостаточное освещение рабочей зоны (РЗ); загрязнение воздуха РЗ газами, паром, пылью; опасность получения механических, электрических, термических и прочих травм; психофизиологические ВОПФ (монотонность, утомление, фиксированная рабочая поза человека-оператора, невыполнение эргономических требований к рабочему месту и прочие), а также такие, которые возникают при работе с (в):

- взрывоопасными и горючими материалами;
- агрессивной или корродирующей среде;
- радиоактивными материалами;
- условиях высоких или низких температур;
- условиях проявления промышленных, радио- и электростатических разрядов оборудования, а также тех, которые возникают под действием вибрации или удара;

4) Возможность возникновения субъективных ошибок обслуживающего персонала, связанных с:

- нарушением требований эргономики при разработке и конструировании системы управления ПР;

- несоответствием параметров микроклимата действующим нормативным требованиям, недостаточностью освещенности, повышенным уровнем шума и вибрации на рабочем месте оператора;

- выполнением пуско-наладочных работ, контролем, проведением функциональных испытаний, при программировании и проверке правильности выполнения программы, во время эксплуатации, обслуживания, при смене рабочих органов, а также при поиске неисправностей и ремонте;

5) Выполнение специфических работ, связанных с демонтажем или модернизацией ПР и МО.

**Цель.** Анализ возможности математического моделирования производственного риска в машиностроительном производстве.

**Постановка задачи исследования.** Анализ состояния вопроса показывает, во-первых, сложность задач, связанных с определением количественных характеристик надежности технических систем, поскольку они подразделяются на статистические и вероятностные, во-вторых, необходимость совершенствования методов их расчетов для оценки риска нанесения вреда здоровью работников в условиях машиностроительного производства. Поэтому задачей статьи является определение возможности использования основных характеристик надежности для совершенствования математических моделей оценки производственного риска.

**Материалы и результаты исследования.** Существующие нормативные документы рекомендуют определять степень риска для разных НС, как качественную характеристику вероятности их возникновения, и учитывать при этом такие факторы, как размеры, мощность, скорость перемещения подвижных элементов ПР, опасные ситуации, связанные с технологическим процессом, который обслуживает ПР. Оценка травоопасности должна осуществляться для всех стадий подготовки и осуществления технологического процесса, связанных с нахождением людей-операторов не только на рабочем месте (РМ), а и вообще в производственном помещении при монтаже, программировании, функционировании, испытаниях, эксплуатации, поиске неисправностей и техническом обслуживании ПР. Поэтому надо учитывать, что самой высокой является степень риска при необходимости близкого нахождения человека-оператора возле рабочей зоны ПР, когда его рабочие механизмы не отключены от источника питания. Но такой риск допускается при исключительных обстоятельствах и требует использования дополнительных средств, уменьшающих вероятность возникновения НС. При оценке степени риска в АС необходимо учитывать, что при аварийном торможении положение элементов ПР не может быть определено однозначно.

Необходимо отметить, что в наше время совершенствуются методы расчета профессионального риска, которые базируются на известных методиках [5, 6] и дополняются анализом надежности технических систем [7, 8]. Это связано с тем, что рост уровня автоматизации промышленности машиностроения приводит к внедрению в производство более сложных технологических процессов и оборудования. Последние, не смотря на использование современных средств индикации и измерительной техники

для контроля показателей качества при определении линейных и угловых размеров на основе распространения метрологических требований к функционированию производственных объектов, содержащих потенциальную опасность для работников и производственной среды [9]. С точки зрения соответствия расчетных значений риска фактически существующему положению с количественными показателями профессиональных заболеваний и производственных травм, возникает необходимость определения правильной последовательности действий при расчете интенсивности отказов различных элементов защитных устройств и сборочных единиц производственного оборудования. А исходными данными при определении количественных характеристик надежности могут быть статистические данные об отказах оборудования, отдельных его элементов или аналитическое выражение конкретной характеристики.

При этом надо иметь в виду необходимость контроля процесса изменений параметров, как технических систем, так и средств контроля, в процессе их эксплуатации, а также влияния этих изменений на надежность оборудования.

Соответственно этому при решении задач первого типа задействуются статистические определения количественных характеристик надежности технических систем, а для задач второго типа должны использоваться вероятностные определения характеристик и аналитические зависимости между ними [10-12]. Однако, надо иметь в виду, что достоверность информации об отказах не всегда является корректной. Поскольку критерием надежности является признак или мера, по которой выполняется оценка надежности различных технических систем, то ее критериями могут выступать показатели надежности, свойства безотказности, долговечности, сохранения, ремонтпригодности и другие, к наиболее распространенным из них относятся показатели безотказности:

- вероятность безотказной работы в течение определенного времени  $P(t)$ ;
- гамма-процентная наработка до отказа  $t_\gamma$ ;
- средняя наработка до отказа  $T_1$  (для статистических задач  $\bar{T}_1$ );
- средняя наработка до отказа  $T$  (для статистических задач  $\bar{T}$ );
- частота отказов  $f(t)$ ;
- интенсивность отказов  $\lambda(t)$ ;
- параметр потока отказов  $\mu(t)$ .

Характеристикой надежности технической системы является количественное значение критерия ее надежности, а поскольку основные критерии надежности делятся на две группы, к которым относятся те, что характеризуют надежность невозстанавливаемых изделий и те, которые характеризуют надежность восстанавливаемых изделий, то вопрос выбора количественных характеристик надежности зависит от его вида.

Вероятностью безотказной работы является количественная мера того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени или в пределах заданной наработки не произойдет ни одного отказа. Тогда функция  $P$ , указанная выше в первом показателе безотказности, является относительной продолжительностью непрерывной исправной работы технической системы до первого отказа, а аргументом  $t$  определяется время, в течение которого существует вероятность безотказной работы (ВБР), и тогда:

$$P(t) = P(T \geq t), t \geq 0, \quad (1)$$

где  $T$  – время работы объекта от начала до первого отказа, час;  
 $t$  – время, в течение которого определяется ВБР, час.

Статистическая оценка вероятности безотказной работы  $\hat{P}(t)$  будет составлять

$$\hat{P}(t) = (N_0 - n(t)) / N_0, \tag{2}$$

где  $N_0$  – число объектов в начале работы;  
 $n(t)$  – число элементов, отказавших за время  $t$ .

Интегральная функция распределения случайной величины определяется из:

$$Q(t) = F(t),$$

$$Q(t) = P(T < t), Q(t) = 1 - P(t) = F(t). \tag{3}$$

Статистическая вероятность отказов равна:

$$\hat{Q}(t) = \frac{n(t)}{N_0} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{t/\Delta t} n_i}{N_0}, \tag{4}$$

где  $n_i$  – число неблагоприятных случаев;  
 $N_0$  – общее число испытаний.

Если интегральная функция распределения  $Q(t)$  дифференцирована, то производная от нее – является дифференцированным законом.

Поскольку по [11] частоте отказов по статистическим данным называется отношение числа элементов (объектов), отказавших в единицу времени к первоначальному их числу, которые работают (испытываются) при условии, когда все из них вышли из строя и не восстанавливаются, то:

$$\hat{f}(t) = n(\Delta t) / N_0 \Delta t \text{ или } a(t) = n(\Delta t) / N_0 \Delta t, \tag{5}$$

где  $\hat{f}(t)$  – частота отказов в единицу времени, час. ;  
 $n(\Delta t)$  – число элементов, отказавших в интервале времени от  $(t - \Delta t)/2$  до  $(t + \Delta t)/2$ ;  
 $N_0$  – первоначальное число элементов в начале работы (испытания).

Таким образом, частотой отказов является плотность вероятности (или закон разделения) времени работы элемента до первого отказа и поэтому:

$$f(t) = -\frac{dP}{dt} = -P'(t) = \frac{dQ(t)}{dt} Q'(t)$$

$$Q(t) = \int_0^t f(t) dt, \tag{6}$$

$$P(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt. \tag{7}$$

Интенсивностью отказов по статистическим данным называется отношение числа элементов, отказавших в единицу времени, к среднему числу элементов, исправно работающих в данный промежуток времени, и она определяется из:

$$\hat{\lambda}(t) = n(\Delta T) / N_{cp} \cdot \Delta t, \tag{8}$$

где  $N_{cp} = (N_i + N_{i+1}) / 2$  – среднее число исправно работающих элементов (объектов) в интервале  $\Delta t$ ;

$N_i$  – число элементов, исправно работающих в начале интервала  $\Delta t$ ;

$N_{i+1}$  – число элементов, исправно работающих в конце интервала  $\Delta t$ .

Поскольку интенсивность отказов в вероятностной оценке – это условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, когда к моменту времени, который рассматривается, отказ не возник. И поэтому вероятностная оценка характеристики  $\lambda(t)$  определяется из выражения:

$$\lambda(t) = f(t) / P(t) \text{ или } f(t) = \lambda(t)P(t). \tag{9}$$

Интенсивность отказов и вероятность безотказной работы связаны между собой зависимостью

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \tag{10}$$

Средней наработкой до первого отказа называется математическое ожидание времени работы объекта до отказа  $T_1$ , которое вычисляется через частоту отказов (плотность распределения времени безотказной работы):

$$m_t = T_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} t f(t) dt, \tag{11}$$

где  $m_t$  – средняя наработка до первого отказа.

При условии, что  $t > 0$  и  $P(0) = 1$ , а  $P(\infty) = 0$ , можно определить  $T_1$

$$T_1 = \int_0^{\infty} P(t) dt. \tag{12}$$

Средняя наработка до первого отказа, согласно статистическим данным об отказах, вычисляется по формуле:

$$T_1 = (\sum_{i=1}^m n_i t_i) / N_0, \tag{13}$$

где  $t_i$  – время безотказной работы  $i$ -го элемента.

Для его определения необходимо знать моменты выхода из строя всех объектов, которые испытываются, а следовательно для вычисления  $T_1$  последнюю формулу использовать сложно. При наличии данных о количестве элементов  $n_i$ , вышедших из

строю в каждом  $i$ -ом интервале времени ( $t_{cp i}$ ), среднюю наработку  $T_1$  до первого отказа можно определять как:

$$T_1 \approx (\sum_{i=1}^m n_i t_{cp i}) / N_0, \quad (14)$$

где  $t_{cp i}$  и  $m$  определяются из:

$$t_{cp} = (t_{i-1} + t_i) / 2 \text{ и } m = t_k / \Delta t, \quad (15)$$

где  $t_{i-1}$  – время начала  $i$ -го интервала, час.;

$i$  – время конца  $i$ -го интервала, час.;

$t_k$  – время, в течение которого вышли из строя все элементы, час.;

$\Delta t = t_{i-1} - t_i$  – интервал времени, час.

Для расчета количественных характеристик надежности технических элементов устройств и оборудования чаще всего используются следующие законы распределения: экспонентный; усеченный нормальный; Релея; гамма; Вейбулла-Гнеденко; логарифмически-нормальный, в соответствии с [8, 12-14] по формулам, приведенным в табл. 1.

Анализ формул, приведенных в табл. 1 показывает, что все характеристики, кроме средней наработки до первого отказа, являются функциями времени.

Приведенные критерии надежности позволяют оценивать надежность невосстанавливаемых и восстанавливаемых объектов до первого отказа, причем наличие нескольких критериев не указывает на необходимость такой оценки объектов по всем характеристикам. Это подтверждается и тем, что наиболее полной характеристикой надежности является частота отказов  $f(t)$  – плотность распределения, которая содержит в себе все данные о случайном явлении – времени безотказной работы.

А средняя наработка до первого отказа, в свою очередь, является наглядной характеристикой надежности, но ее применение при оценке надежности сложной системы ограничивается в случаях, когда:

- время работы системы гораздо меньше среднего времени безотказной работы;
- закон распределения времени безотказной работы не является однопараметрическим и для достижения полной оценки нужны моменты высших порядков;
- система является резервированной;
- интенсивность отказов не является постоянной;
- время работы отдельных частей сложной системы является различным.

Интенсивность отказа является наиболее удобной характеристикой надежности простейших элементов, что позволяет просто вычислять количественные характеристики надежности сложных систем по критерию вероятности безотказной работы, поскольку она:

- входит как множество в другие более общие характеристики систем, например, в эффективность и стоимость [15];
- характеризует надежность с учетом изменения во времени [16];
- может быть определена в процессе проектирования систем и оценена в процессе их испытаний.

Таблица 1. – Интенсивность отказов элементов

Закон распределения	Частота отказов (плотность распределения)	Вероятность безотказной работы	Интенсивность отказов	средняя наработка до первого отказа
Экспонентный	$\lambda e^{-\lambda t}$	$e^{-\lambda t}$	$\lambda = \text{const}$	$\frac{1}{\lambda}$
Релея	$\frac{t}{\sigma^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	$e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	$\frac{t}{\sigma^2}$	$\sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma$
Гамма (при k целом)	$e^{-\lambda_0 t}$	$e^{-\lambda_0 t}$	$\frac{\lambda_0 (\lambda_0 t)^{k-1}}{(k-1)! \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}}$	$\frac{k}{\lambda_0}$
Вейбулла-Гнеденко	$\lambda_0 k t^{k-1} e^{-\lambda_0 t^k}$	$e^{-\lambda_0 t^k}$	$\lambda_0 k t^{k-1}$	$\frac{r(\frac{1}{k} + 1)}{\lambda_0 k^{\frac{1}{k}}}$
Усеченный нормальный	$\frac{1}{F(\frac{T_1}{\sigma}) \sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}}$	$\frac{F(\frac{T_1 - t}{\sigma})}{F(\frac{T_1}{\sigma})}$	$\frac{e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma F(\frac{T_1 - t}{\sigma})}}$	$T_1 + \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi} F(\frac{T_1}{\sigma})} e^{-\frac{T_1^2}{2\sigma^2}}$
Логорифмически-нормальный	$\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2}$	$\frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{\mu - \ln t}{\sigma}\right)$	$\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \frac{e^{\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2}}{0,5 + \Phi\left(\frac{\mu - \ln t}{\sigma}\right)}$	$\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2}} dt}$

Положение Рекомендаций Международной организации труда по совершенствованию системы управления охраной труда (СУОТ) на всех предприятиях предусматривают его выполнение на основе управления профессиональными рисками, поскольку использование этого понятия является универсальной количественной и качественной мерой опасности. Это особенно важно на стадии стратегического планирования, потому что развитие СУОТ путем использования соответствующих подходов к оценке рисков через различные математические модели, в т.ч. не только статистические, позволяет адекватно управлять качеством и безопасностью производственной среды.

**Выводы.** В результате выполненного исследования показана возможность и целесообразность использования для моделирования производственного риска в машиностроительном производстве основных характеристик надежности, таких как вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, средняя наработка до первого отказа.

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Роботы промышленные. Роботизированные технологические комплексы. Требования безопасности и методы испытаний: ГОСТ 3738-98 (ГОСТ 12.2.072-98). – [Действующий от 2000-07-01]. – К.: Госстандарт Украины, 1998. – 47 с.

2. Асфаль, Г. Роботы и автоматизация производства. Пер. с англ. М.Ю. Евстигнеева и др. / Г. Асфаль. – М.: Машиностроение, 1989. – 448 с.
3. Русак, В. Н. Справочная книга по охране труда в машиностроении / А. Н. Русак. – Л.: Машиностроение. 1989. – 541 с.
4. Гибкие производственные системы Японии. Пер. с япон. А.Л. Семенова; под ред. Л. Ю. Лищинского. – М.: Машиностроение, 1987. – 232 с.
5. Оценка риска развития профессиональных заболеваний и пути его снижения исходя из стажа работы в условиях воздействия вредных производственных факторов: Методические рекомендации / И. В. Бойко, Т. М. Наумова, Л. Б. Герасимова и др. – СПб., 1999. – 44 с.
6. Минько, В. М. О взаимосвязях фактического и потенциального производственного риска и их практическом использовании / В. М. Минько, И.Ж. Титаренко // Известия КГТУ: научный журнал. – Калининград, 2005. – № 8. – С. 164-172.
7. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичность отказов. Основные положения: ГОСТ 27.310-95. – [Дата введения 1997-01-01]. – Минск: изд-во стандартов, 1996. – 19 с.
8. Корчагин, А. Б. Надежность технических систем и техногенный риск. Уч. пособие в 2-х ч. – Ч.2. Практикум / А. Б. Корчагин, В. С. Сердюк, А. И. Бокарев. – Омск: изд-во ОмГТУ, 2011. – 140 с.
9. Федорец, А. Г. Научно-методические основы управления производственными рисками на рабочих местах / А. Г. Федорец // Безопасность в техносфере. – 2007. – №6. – С. 18-27.
10. Половко, А. М. Сборник задач по теории надежности / Половко А. М. и др.; под ред. А. М. Половко. – М.: Соврадио, 1972. – 408 с.
11. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1994. – 576 с.
12. Оценка вероятности возникновения опасных ситуаций: метод. указания / сост. Э.А. Гомзигов. – СПб.: С.-Петербур. речной гос. ун-т водных коммуникаций, 1999. – 15 с.
13. Королев, В. Ю. Математические основы теории риска: уч. пособие / В. Ю. Королев, В. Е. Бенинг, С. Я. Шоргин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Физматлит, 2011. – 620 с.
14. Мирзоахмедов, Ф. М. Математические модели и методы управления производством с учетом случайных факторов / Ф.М. Мирзоахмедов. – К.: Научн. мысль, 1991. – 224 с.
15. Ястремский, А. И. Моделирование экономического риска / А. И. Ястремский. – К.: Лебедь, 1992. – 176 с.
16. Talbott-E-O. Evidence for a dose-response relationship between occupational noise and blood pressure/ L-B Gibson, A Burks, R Engberg, K-P. McHugh // Arch-Environ-Health. 1999 Mar-Apr; 54(2): 71-8.

Поступила в редколлегию 28.02.2022 г.