

УДК. 658.387

А.А. Леонов, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ НА ЭТАПАХ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Анализируются современные методы оценки безопасности труда. Предложен общий методологический подход для оценки безопасности технологических процессов в машиностроении на этапах их проектирования.

По данным Госнадзорохрантруда Украины за первый квартал 2005 года в машиностроительной отрасли погибло 11 человек (за аналогичный период в 2004 погибло 8 человек). Количество травмированных за год исчисляется в отрасли сотнями человек.

Основой обеспечения безопасности на производстве является Система управления охраной труда (СУОТ), создаваемая работодателем в соответствии со статьей 13 Закона Украины «Об охране труда». Важнейшими критериями эффективности СУОТ являются, прежде всего, показатели уровня травматизма. Очевидно, что сегодня СУОТ в машиностроительной отрасли мало эффективна.

Одной из главнейших задач, решаемых в результате функционирования СУОТ на машиностроительном предприятии, является обеспечение безопасности производственного процесса. Главным элементом производственного процесса является технологический процесс; в первую очередь должна решаться задача обеспечения его безопасности, как на стадии проектирования, так и на стадиях внедрения и эксплуатации.

Решая задачу обеспечения безопасности технологического процесса, например, механической обработки детали, необходимо обеспечивать высокую безопасность на стадии проектирования технологии, так как в дальнейшем при реализации технологического процесса, его безопасность может значительно снизиться, например, в результате износа оборудования.

В настоящее время отсутствуют какие-либо методики оценки безопасности (или опасности) технологических процессов в машиностроении на этапах их проектирования, четкая методология оценки и повышения безопасности труда при проектировании новых и модернизации существующих технологий.

Целью работы, проводимой на кафедре прикладной экологии и охраны труда СевНТУ под руководством профессора, доктора технических наук В.В. Севрикова, является создание единого методологического подхода к решению проблем оценки и повышения безопасности технологических процессов в машиностроении на этапах их проектирования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить сложный комплекс задач, первой из которых является задача изучения современных методов оценки безопасности производственных процессов, используемых в различных отраслях народного хозяйства.

Рассмотрим подробнее эту задачу. Основными методами оценки соответствия производственных процессов требованиям охраны труда на сегодняшний день являются следующие: на стадии проектирования – методы экспертной оценки; на стадии проведения технологического – метод сопоставления фактической величины контролируемого опасного или вредного производственного фактора с нормативным значением этого фактора.

В условиях реального производства из-за отсутствия четких методик экспертная оценка безопасности технологии на этапах проектирования практически не проводится. Как правило, заводские технологи сначала проектируют технологический процесс, а затем согласуют проект со службой охраны труда предприятия. При этом последняя проверяет лишь наличие требований безопасности труда в технологических документах и их соответствие с ГОСТ 3.1120-83 «Общие правила отражения и оформления требований безопасности труда в технологической документации» и ГОСТ 12.3.002-75 «ССБТ. Процессы производственные. Общие требования безопасности».

На стадии проведения для оценки безопасности технологического процесса используют следующий детерминированный подход. На первом этапе выявляют опасные и вредные производственные факторы (ОВПФ), характерные для данного процесса. Для этого на практике используют также экспертные оценки, прежде всего результаты работы комиссии предприятия по аттестации рабочих мест по условиям труда. На данном этапе важнейшее значение имеют источники информации: законодательные и нормативные акты по охране труда, документы по охране труда предприятия, акты расследования несчастных случаев и т.д.

На втором этапе, путем измерений (запыленности, загазованности воздуха рабочей зоны, уровней шума и т.д.) определяют фактические значения этих факторов. На третьем этапе, сопоставляют данные измерений (оценок) с нормативными значениями (например, с санитарными нормами ПДК, ПДУ и т.д.) для этих факторов и делают вывод о степени вредности или опасности данного производства. Условие безопасности, при таком подходе можно записать в следующем виде, $C_i \leq ПДК_i$, $L_i \leq ПДУ_i$, $D_i \leq ПДД_i$, где C_i , L_i , D_i – фактические значения, соответственно, концентрации i -го вредного вещества, уровня и дозы i -го опасного или вредного производственного фактора; $ПДК_i$, $ПДУ_i$, $ПДД_i$ – соответственно, предельно-допустимая концентрация, предельно-допустимый уровень, предельно-допустимая доза i -го вредного вещества, опасного или вредного фактора.

Важно отметить, что в настоящее время многие факторы не нормированы и не могут быть оценены количественно. Кроме того, необходимо подчеркнуть, что данный подход не применим для стадии проектирования технологии, так как основывается на измерении фактических значений ОВПФ. Поэтому крайне важна разработка новых методов и методик оценки безопасности технологических процессов при их проектировании.

В последнее время специалистами по охране труда ведется разработка новых методов оценки безопасности различных объектов на основе вероятностного подхода. Такой подход является более совершенным, так как основан на количественной зависимости между ОВПФ, причинами их возникновения, возможным ущербом, в том числе вероятностью взрыва или пожара. Важным достоинством данного подхода является возможность нахождения оптимальных технических решений обеспечения безопасности для конкретных объектов. Например, при оценке взрывопожароопасности промышленных объектов (производств) используются два подхода: детерминированный и вероятностный. Детерминированный подход основан на количественной дифференциации производств на категории (А, Б, В, Г, Д), группы (1 – 7), классы (В - I, В - Ia, В - Ib, В - Ig, В - II, В - IIa) и т.д.

В [1] предложен детерминированный подход к оценке опасных видов деятельности промышленных предприятий. Авторы предлагают ранжировать промышленные объекты по категориям опасности в зависимости от полученных значений индексов опасности. В свою очередь, индексы опасности рассчитываются с учетом индексов опасности и безопасности внутренних и внешних факторов техногенного и природного происхождения. Например, значения индексов безопасности J_{EN_k} для помещений различных категорий взрывопожароопасности предлагается принять следующими: для категории А - 0,1; для категорий Б, В, Г, Д соответственно 0,3; 0,5; 0,7; 0,9.

Главными недостатками такого подхода являются: субъективность при установлении категорий, групп и т.д., ограниченная возможность варьирования при определении категорий.

Рассмотрим некоторые работы, представляющие наибольший интерес, с точки зрения используемых в них вероятностных методов.

В [2] рассмотрен следующий вероятностный подход для определения взрывопожароопасности объекта. На первом этапе определяют вероятность достижения предельных значений опасных факторов Q_0 пожара $Q_0 = Q_{II}(1 - F_{IIp})(1 - F_A)$, где Q_{II} – вероятность возникновения пожара или взрыва; F_{IIp} – вероятностная эффективность профилактических мер; F_A – вероятностная эффективность активных мер противопожарной защиты.

Вероятность возникновения пожара (взрыва) может быть определена по формуле

$$Q_{\Pi} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Q_{\Pi i}),$$

где $Q_{\Pi i}$ – вероятность возникновения пожара или взрыва в i -м помещении здания в течение года, причем $Q_{\Pi i} = f(Q_{ГС}; Q_{ИЗ})$, $Q_{ГС}$ – вероятность образования горючей среды (определяется расчетным путем); $Q_{ИЗ}$ – вероятность появления источника зажигания (определяется путем анализа условий появления источника зажигания, температура, энергия и время контакта которого с горючей средой достаточны для зажигания); n – число помещений в здании.

Величины $F_{ПР}$ и F_A определяют из расчета надежности функционирования соответствующего производственного оборудования, устройств и систем защиты.

На втором этапе проводят проверку условия безопасности $Q_0 \leq Q_N$, где Q_N – нормативная величина, равная 10^{-6} .

Сравнивая вероятностный и детерминированный подходы при оценке взрыво-пожароопасности производств можно сделать вывод, что более совершенным является вероятностный подход, хотя он является более сложным и еще не до конца разработанным.

Рассмотренный вероятностный подход оценки взрывопожароопасности производств целесообразно принять за основу при разработке методики комплексной оценки опасности технологических процессов в машиностроении, хотя в чистом виде такой подход не может быть применен в условиях, когда действуют различные по характеру и причинам возникновения производственные опасности.

Вероятностный подход к оценке безопасности труда предложен и в [3]. Автор рассматривает функционирование системы производство – лечение и использует методы теории массового обслуживания для определения математического ожидания числа людей отсутствующих на производстве из-за травматизма. При этом распределение производственных травм принимается пуассоновским, а распределение длительности лечения – экспоненциальным. Здесь же предложены несколько математических моделей, описывающих поведение системы производство – лечение с учетом частичной и полной потери трудоспособности работников. При частичной потере трудоспособности работников, вероятность P_0 отсутствия на производстве n травмированных человек может быть определена по формуле

$$P_0 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^n + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\prod_{i=0}^{k-1} (n-i)}{k!} \left(\frac{\mu}{\lambda}\right)^k}, \quad (1)$$

где λ – интенсивность моментов появления случаев травматизма; μ – интенсивность обслуживания в сфере лечения; $k = 1, 2, 3, \dots, n-1$.

В общем случае вероятность $Q(t)$ отсутствия того или иного человека в момент времени t на производстве по причине травмы с учетом принятых в формуле (1) обозначений определяется следующим выражением

$$Q(t) = \frac{\lambda}{\lambda - \mu} (e^{-\mu t} - e^{-\lambda t}).$$

Кроме того, в [3] предложена математическая модель процессов микротравматизма. В этой модели автор полагает распределение числа случаев микротравматизма экспоненциальным, а распределение времени нетрудоспособности – нормальным. При таких допущениях, вероятность отсутствия человека на производстве по причине микротравматизма $Q(t)$ в момент времени t определяется формулой

$$Q(t) = -e^{-\lambda t} + \left\{ 1 + \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(t-\tau-m)^2}{2\sigma^2}} d\tau \right\} + \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(t-\tau-m)^2}{2\sigma^2} - \lambda \tau} d\tau,$$

где σ , m – параметры нормального распределения; λ – интенсивность случаев микротравматизма.

В чистом виде такой подход также не может быть применен для оценки безопасности технологических процессов в машиностроение на стадии проектирования. Главным недостатком такого подхода является то, что указанные математические модели не позволяют оценивать непосредственно уровень безопасности оборудования, технологической операции и т.д. Другими словами, зная вероятность отсутствия человека на производстве из-за травмы, нельзя ответить на главный вопрос: безопасно или небезопасно то оборудование (оснастка, инструмент и пр.), на котором работал работник и насколько.

Учитывая сказанное, на наш взгляд наиболее целесообразно для оценки безопасности технологических процессов на этапах проектирования использовать следующий подход.

Любой технологический процесс представляет собой цепь технологических операций, выполняемых в определенной последовательности. Очевидно, что безопасность технологического процесса определяется безопасностью составляющих его технологических операций.

Принимая допущение о независимости появления опасностей (опасных и (или) вредных производственных факторов) на разных технологических операциях, можно записать

$$P_{III}(t_0; t) = \prod_{j=1}^n P_{OПj}(t_{0j}; t_j), \quad (2)$$

где $P_{III}(t_0; t)$ – вероятность безопасного протекания технологического процесса в течение заданного времени $(t_0; t_0 + t)$; $P_{OПj}(t_{0j}; t_j)$ – вероятность безопасного протекания j -ой технологической операции в течение всего времени ее выполнения, при условии, что в момент времени t_{0j} она успешно начата.

Отсчет времени t начнем с момента времени t_0 , т.е. начала выполнения технологического процесса, а время t_j отсчитываем с момента t_{0j} , т.е. начала выполнения j -ой операции. Отсчет величин t_0 , t_{0j} , t_j целесообразно вести от момента введения данного технологического процесса в эксплуатацию, так как в большинстве случаев проведенный технологический

процесс используется повторно (многократно).

Обозначим через $\lambda_j(t)$

– интенсивность наступления опасности, при выполнении j -ой операции. Тогда выражение (2) можно записать в следующем виде:

$$P_{III}(t_0; t) = e^{-\left[\sum_{j=1}^n \int_{t_{0j}}^{t_{0j}+t} \lambda_j(t) dt \right]}. \quad (3)$$

Если $\lambda_j(t) = \text{const}$, то формула (3) упростится и примет вид

$$P_{III}(t_0; t) = e^{-\left[\sum_{j=1}^n \lambda_j t_j \right]}. \quad (4)$$

Пример. Пусть технологический процесс изготовления детали состоит из четырех операций: заготовительной, транспортной, токарной и контрольной. Рассмотрим процесс, в котором каждая последующая операция начинает выполняться сразу по окончании предыдущей технологической операции, т.е. для данного примера не будем учитывать межоперационное время. На рисунке 1 показана циклограмма технологического процесса продолжительностью t .

Из рисунка видно, что длительность первой операции $\tau_1 = t_0 + t_1$, второй – $\tau_2 = t_2 - t_1$ и т.д.

В соответствии с формулой (3) вероятность безопасного протекания технологического процесса в течение времени $(t_0; t_0 + t)$ выражается уравнением

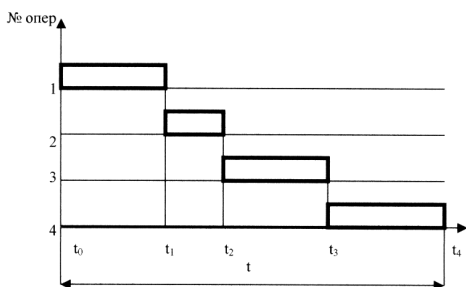


Рисунок 1 – Циклограмма технологического процесса

$$P_{ТП}(t_0; t) = \exp \left[- \int_{t_0}^{t_0+t_1} \lambda_1(t) dt - \int_{t_0+t_1}^{t_0+t_1+t_2} \lambda_2(t) dt - \int_{t_0+t_2}^{t_0+t_2+t_3} \lambda_3(t) dt - \int_{t_0+t_3}^{t_0+t_3+t_4} \lambda_4(t) dt \right]. \quad (5)$$

Таким образом, зная интенсивности наступления опасностей для каждой операции, можно определить вероятность безопасного протекания всего технологического процесса. При этом необходимо помнить, что в обозначении $P_{ТП}(t_0; t)$ в скобках указывается заданный (интересующий нас) интервал времени, а в обозначении $\lambda(t)$ в скобках стоит общее время технологического процесса.

Для ориентировочных расчетов, в соответствии с результатами работы [3] можно принять, что на всех операциях время наступления травм распределено экспоненциально, а значит и интенсивность опасностей (травм) на каждой операции постоянна.

При постоянной интенсивности реализации опасностей вероятность безопасного протекания процесса для данного примера в соответствии с формулой (4) запишется как

$$P_{ТП}(t_0; t) = \exp[-\lambda_1 t_1 - \lambda_2 t_2 - \lambda_3 t_3 - \lambda_4 t_4].$$

В общем случае определение значений $\lambda(t)$ для различных технологических операций представляет определенные трудности. При наличии статистических данных значения $\lambda(t)$ определяются следующим образом:

$$\lambda_j(t) = \frac{n_j}{N_j \times t_{cp}}.$$

Здесь $\lambda_j(t)$ – интенсивность наступления опасностей на j -ой операции; n_j – число нарушений правил охраны труда при выполнении операций j -ого типа; N_j – общее число выполненных операций j -ого типа; t_{cp} – среднее время выполнения операции j -ого типа.

Целесообразно сформировать базу данных по интенсивностям реализации опасностей для типовых технологических операций. Такой подход хорошо зарекомендовал себя в практике инженерной надежности. Благодаря наличию базы данных об интенсивностях отказов элементов электронных и механических систем значительно упрощены расчеты надежности на стадии проектирования сложных объектов. Не менее важная задача – сбор статистических данных о распределениях времени безопасной работы при выполнении различных производственных операций.

В формуле (5) $\lambda(t)$ представляют собой функцию времени. Рассмотрим пример. Пусть на первой операции (первый член в формуле (5)) интен-

сивность наступления опасностей описывается функцией $\lambda(t) = 3 - 2t$. Тогда для этой операции можно записать

$$\int_0^t \lambda(t) dt = \int_0^1 \lambda(t) dt + \int_1^t \lambda(t) dt = \int_0^1 (3 - 2t) dt + \int_1^t dt = 1 + t.$$

Таким образом, вероятность безопасного протекания $P_{on}(t)$ этой технологической операции можно выразить как $P_{on}(t) = \exp[-1 - t]$.

Зная функции $\lambda(t)$ для отдельных операций, по формуле (5) найдем вероятность безопасного протекания технологического процесса в целом.

На заключительном этапе оценки необходимо провести проверку условия безопасности $H(t) = 1 - P_{III}(t) \leq H_{нор}(t)$, где $H(t)$ – риск данной технологии, т.е. вероятность опасного отказа в течение времени протекания технологического процесса; $P_{III}(t)$ – вероятность безопасного протекания технологического процесса в течение времени t , определяемая по формуле (2); $H_{нор}(t)$ – нормативное значение риска.

Нормативное значение риска (вероятности опасного отказа в течение заданного времени) необходимо принимать в соответствии с рекомендациями межгосударственного стандарта ГОСТ 27.310-95 «Анализ видов, последствий и критичности отказов», равным менее 0,00005.

Таким образом, сформированы основные принципы единого методологического подхода в решении проблемы оценки безопасности технологических процессов в машиностроении на этапах их проектирования. Предлагаемый подход позволяет количественно оценивать безопасность каждой технологической операции и процесса в целом, а значит, делает возможным оптимизацию технологических процессов по критерию безопасности на стадии проектирования. Рассматриваемый подход даст возможность создавать более безопасные технологии и тем самым значительно повысить общую безопасность труда на производстве.

На дальнейших этапах работы необходимо решить следующие задачи:

- 1) собрать и провести обработку статистических данных о травматизме и отказах ТС не только по крупным машиностроительным заводам, но в первую очередь, по многочисленным небольшим ремонтным предприятиям;
- 2) построить уточненные математические модели опасных отказов человека и ТС, в том числе в условиях автоматического, автоматизированного и неавтоматизированного машиностроительного производства;
- 3) разработать общую методику оценки безопасности технологических процессов в машиностроении на этапах их проектирования, позволяющую оценивать безопасность при наличии и отсутствии статистических данных о появлении опасных событий.

Библиографический список

1. Статюха Г.О. Розробка методики оцінки небезпечних видів діяльності промислових підприємств / Г.О. Статюха, Т.В. Бойко, В.І. Бендюг // Екологія і ресурси: Зб. наук. праць Інституту проблем національної безпеки. — К.: Вид-во ІПНБ, 2003. — № 7. — 128 с.
2. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность. Справочник / А.Н. Баратов, Е.Н. Иванов, А.Я. Корольченко. — М.: Химия, 1987. — 272 с.
3. Козлов В.И. Модели и алгоритмы решения задач безопасности труда / В.И. Козлов. — Рига: «Зинатне», 1978. — 131 с.
4. Точность, надежность и производительность металлорежущих станков / Г.Д. Григорьян, С.А. Зелинский, Г.А. Оборский. — К.: Тэхніка, 1990. — 222 с.

Поступила в редакцию 31.01.2006 г.