

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 ТРУДА ЧЕЛОВЕКА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Проведен анализ существующих методов оценки безопасности человека в системе человек – машина (СЧМ). Предложен общий методологический подход и метод оценки безопасности труда человека при проектировании технологических процессов в машиностроении.

Отсутствие единой методики оценки безопасности труда человека при проектировании технологических процессов в машиностроении, приводит к тому, что при разработке технологий не закладывается необходимый уровень безопасности и не производится оптимизация технологических операций по критериям охраны труда.

Целью данной работы является разработка единого методологического подхода к оценке безопасности труда человека при проектировании технологических процессов в машиностроении. Такая оценка должна быть неотъемлемой частью общей оценки безопасности технологического процесса.

Оценка надежности СЧМ может проводиться следующими методами: аналитическими (расчетными); экспериментальными (в том числе, проведением специальных испытаний, имитационного моделирования на ЭВМ и т. д.).

На этапах проектирования СЧМ используются, как правило, расчетные методы. Для упрощения расчетов надежности авторы работ [1, 2] предлагают все человеко-машинные системы разделить на три класса: системы непрерывного типа; системы смешанного типа; дискретные системы.

В системах непрерывного типа человек участвует в процессе управления постоянно. При нормальном течении процесса, роль оператора сводится только к наблюдению за его ходом. Оператор активно вмешивается в процесс (восстанавливает его нормальное течение), в случае отклонения его параметров от нормы. СЧМ непрерывного типа характеризуются высокой степенью автоматизации всех процессов (проверки, подготовки, применения по назначению). Для таких систем показателем надежности является вероятность $P_{СЧМ1}(t)$ безотказного, безошибочного и своевременного протекания производственного процесса в течение времени t

$$P_{СЧМ1}(t) = P_T(t) + [1 - P_T(t)] \times K_{ОП} \times [P_{ОП}P_{СВ} + (1 - P_{ОП}) \times P_{ИСП}(t)], \quad (1)$$

где $P_T(t)$ – вероятность безотказной работы технических средств; $K_{ОП}$ – коэффициент готовности оператора; $P_{ОП}$ – вероятность безошибочной работы оператора; $P_{СВ}$ – вероятность своевременного выполнения оператором требуемых действий; $P_{ИСП}(t)$ – вероятность исправления ошибочных действий.

Безотказное, безошибочное и своевременное протекание производственного процесса возможно в следующих случаях: технические средства находятся в работоспособном состоянии; произошел отказ технических средств, но при этом: оператор безошибочно и своевременно выполнил требуемые действия по ликвидации аварийной обстановки, либо оператор допустил ошибочные действия, но своевременно их исправил.

В СЧМ смешанного типа процесс управления также носит непрерывный характер, оператор периодически решает задачи, которые могут непрерывно следовать одна за другой. В интервалах между решениями задач у оператора наступает оперативная пауза, то есть время ожидания (прогнозирования) следующей задачи. Для такой системы показателем надежности служит вероятность $P_{СЧМ2}(t)$ безотказного, безошибочного и своевременного решения поставленной перед ней задачи. С учетом принятых в формуле (1) обозначений, выражение для оценки надежности имеет следующий вид

$$P_{СЧМ2}(t) = K_{ОП} [P_T P_{ОП} P_{СВ} + (1 - P_T) \times P_{ВОС} \times P_{ОП} \times P_{СВ} + (1 - P_{ОП}) \times P_T \times P_{ИСП}], \quad (2)$$

где $P_{ВОС}$ – вероятность своевременного восстановления работоспособности техники.

Задача такой СЧМ может быть выполнена в том случае, если в требуемый момент времени оператор готов к приему поступающей информации и при этом имеет место одна из следующих ситуаций: в течение времени ожидания и времени решения задачи оператором, технические средства работали безотказно, оператор правильно и своевременно выполнил свои действия; произошел отказ технических средств, но оператор своевременно устранил его и при решении задачи не допустил ошибок; технические средства работали безотказно, а оператор допустил ошибку, но своевременно ее устранил.

В СЧМ дискретного типа четко выражена дискретность решения отдельных задач. В перерывах между ними оператор находится в режиме ожидания и подготовки к решению очередной задачи (в частности, в этом режиме оператор может заниматься прогнозированием возможных управляющих воздействий). В таких человеко-машинных системах работа оператора совпадает по времени с работой технических средств. Для СЧМ дискретного типа применим такой же показатель надежности, как и для систем смешанного типа. Расчет надежности для таких систем, с учетом ранее принятых обозначений, проводят по формуле

$$P_{СЧМ3}(t) = K_G \times P_T \times P_{ОП} \times P_{СВ} + (1 - P_T \times K_G) \times P_{ВОС} \times P_{ОП} \times P_{СВ} + (1 - P_{ОП}) \times P_T \times P_{ИСП} \quad (3)$$

где K_G – коэффициент готовности технических средств.

Задача СЧМ дискретного типа будет выполнена, если выполняются условия: в требуемый момент технические средства будут находиться в работоспособном состоянии и не откажут в течение заданного времени выполнения задачи, а действия оператора были безошибочными и своевременными; неготовая или отказавшая техника была своевременно восстановлена, операторы при решении задачи не допускали ошибок; при безотказной работе техники оператор допустил ошибку, но своевременно ее исправил.

Как видно из формул (1) – (3) для оценки надежности СЧМ необходимо иметь частные показатели надежности человека и техники.

По результатам анализа литературных источников составлена таблица 1, в которой представлены основные показатели надежности и безопасности СЧМ.

Таблица 1 – Основные частные и общие показатели, используемые при оценке надежности и безопасности СЧМ

Показатели надежности		
Техники	Человека	СЧМ в целом
1. Вероятность безотказной работы в течение заданного времени, $P_T(t)$	1. Вероятность безошибочной работы, $P_{ОП}$	Вероятность выполнения задачи системой, $P_{СЧМ}(t)$
2. Коэффициент готовности, K_G	2. Вероятность своевременного решения задачи, $P_{СВ}$	
3. Вероятность восстановления отказавшей техники, $P_{ВОС}$	3. Коэффициент готовности оператора, $K_{ОП}$	
	4. Вероятность исправления ошибки, $P_{ИСП}(t)$	
	5. Интенсивность ошибок, $\lambda_{оп}$	
Показатели безопасности		
Показатели отсутствуют	Вероятность безопасной работы, $P_{БТ}$	Показатели отсутствуют

На сегодняшний день не разработаны математические модели для расчета уровня безопасности СЧМ в целом. Практически отсутствуют частные показатели безопасности человека и техники. Исключением может стать только работа [1], в которой авторы предложили частный показатель для оценки безопасности труда человека в СЧМ – вероятность безопасной работы $P_{БТ}$, определяемую выражением

$$P_{БТ} = 1 - \sum_{i=1}^n P_{вози} \times P_{оши} ,$$

где $P_{возi}$ – вероятность возникновения опасной (или вредной) для человека производственной ситуации i -го типа; $P_{оии}$ – вероятность неправильных действий оператора в i -ой ситуации; n – число возможных травмоопасных ситуаций.

Как известно, надежность объекта является необходимым (но не достаточным) условием для обеспечения его безопасности. Очевидно, что при анализе безопасности различных объектов важно иметь данные об их надежности.

В качестве основного показателя надежности человека-оператора, в работах [1-3] предлагается использовать вероятность безошибочной работы, которая вычисляется по статистическим данным следующим образом:

$$P_{опj} = \frac{N_j - n_j}{N_j}, \text{ где } P_{опj} - \text{вероятность безошибочного выполнения опера-}$$

ции j -го типа; N_j – общее число выполненных операций j -го типа; n_j – число ошибок, допущенное при выполнении операций j -го типа.

Существующие подходы к оценке надежности человека-оператора частично могут послужить основой для разработки единой методологии в оценке безопасности труда человека при проектировании технологических процессов в машиностроении. При этом необходимо учитывать следующие специфические особенности:

а) для оценки безопасности труда человека должны приниматься в учет только те его отказы, которые могут привести к травме, заболеванию работника или угрозе жизни и здоровью окружающих людей;

б) при оценке безопасности человека необходимо рассматривать как объект, функционирующий до первого опасного отказа (травмы), т.е. как невосстанавливаемую систему.

Целесообразно выделить следующие основные элементы СЧМ: техника (станки, приспособления, инструменты, детали и т.д.); человек (работники); среда (опасные и вредные производственные факторы, вносимые извне).

В рамках поставленной задачи, рассмотрим следующие отношения между элементами. Элемент «техника» генерирует опасности, воздействующие на человека. Рассматриваются только опасные отказы.

Опасным отказом техники будем называть отказ, последствием которого могут быть травмы или заболевания работника. Техника может иметь встроенные средства защиты. При этом защита может обеспечиваться по одному или нескольким опасным и (или) вредным факторам.

Человек, используя технику, подвергается опасностям, генерируемым не только техникой, но также, опасности со стороны внешней производственной среды. Под опасными и вредными производственными факторами среды понимаются факторы, обусловленные, например, работой оборудования на соседних

производственных участках (шум, запыленность и т.д.). Под опасным отказом среды будем понимать, отказ, обусловленный выходом параметров внешней среды за допустимые пределы (например, установленные санитарные нормы ПДК, ПДУ), который может привести к травме или заболеванию работника.

Для защиты от некоторых опасных (или вредных) производственных факторов человек может использовать средства индивидуальной защиты (СИЗ). Для защиты от опасностей возникающих в среде, а также опасностей генерируемых оборудованием, могут использоваться средства коллективной защиты (СКЗ). На рисунке 1 показано воздействие опасных и вредных производственных факторов в системе «человек – техника – среда», с учетом применения средств защиты.

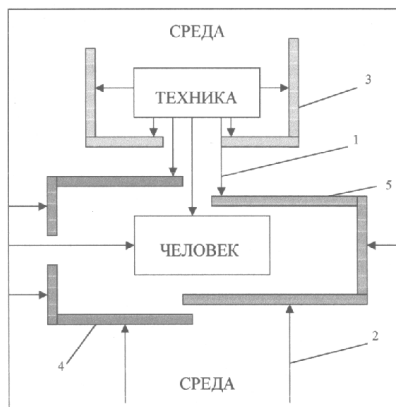


Рисунок 1 – Опасные и вредные производственные факторы в системе «человек – техника – среда», с учетом применения средств защиты: 1–опасные и вредные факторы, генерируемые техникой; 2 – опасные и вредные факторы, генерируемые средой; 3 – средства защиты, встроенные в оборудование; 4 – средства коллективной защиты (СКЗ); 5 – средства индивидуальной защиты (СИЗ)

Опасным отказом человека будем называть, отказ, обусловленный нарушением работником хотя бы одного правила безопасности (например, одного пункта инструкции по охране труда).

Целесообразно рассматривать средства защиты техники как самостоятельную часть элемента «машина», СИЗ как самостоятельную часть элемента «человек», а СКЗ как самостоятельную часть элемента «среда».

Таким образом, несчастный случай с работником (а значит и отказ СЧМ) может иметь место в следующих ситуациях: произошел опасный отказ техники (Т); произошел опасный отказ человека (Ч); произошел опасный отказ среды (С).

Рассмотрим, вначале случайные события Т и Ч. Очевидно, эти события могут быть совместны, т.е. появление опасного отказа техники, не исключает появления нарушения правил безопасности работником. С другой стороны, эти события зависимы, т.е. опасный отказ человека может привести к ускорению отказа техники. Тогда, вероятность появления события H_1 – несчастного случая с работником, без учета появления отказов среды можно определить из выражения

$$P(H_1) = P(Ч + Т) = P(Ч) + P(Т) - P(ЧТ) . \quad (4)$$

Учитывая зависимость событий $Ч$ и T , получаем

$$P(H_1) = P(Ч + T) = P(Ч) + P(T) - P(Ч) \times P_q(T), \quad (5)$$

где $P_q(T)$ – условная вероятность отказа техники, при условии, что отказ человека уже имел место.

Событие C – опасный отказ среды и событие H_1 могут совмещаться, поэтому вероятность события H_2 – несчастного случая с работником, с учетом отказов среды можно определить по формуле

$$P(H_2) = P(C + H_1) = P(C) + P(H_1) - P(CH_1). \quad (6)$$

Выражения (4)-(6) позволяют вычислить опасность системы «человек-техника-среда».

В соответствии с действующим законодательством Украины об охране труда, основной формой контроля за безопасностью труда на производстве является трехступенчатый административно-общественный контроль. Причем, на первой ступени контроль проводится ежедневно. Очевидно, что статистические данные об отказах человека, техники и среды могут быть получены именно при таком контроле.

Введем понятие «риск травмирования человека (работника)». Под риском травмирования будем понимать вероятность опасного отказа работника в течение времени t при выполнении технологической операции или некоторой работы. Статистически риск получения травмы работником $H_{TP}(t)$ может быть определен по данным трехступенчатого контроля как

$$H_{TP}(t) = \frac{n(t)}{N}, \quad (7)$$

где $n(t)$ – количество нарушений правил охраны труда, совершенных работником ко времени t ; N – количество проведенных проверок по охране труда, в которых принимал участие данный работник.

Значение $n(t)$ в формуле (7) принимается из расчета, что работник не может получить более одного взыскания за одну проверку. Хотя, фактически работник может получить и 10 замечаний за одну контрольную проверку, но в учет целесообразно принимать только факт нарушений или его отсутствие. Такой подход предполагает более жесткие требования к выполнению правил охраны труда и позволит избегать субъективности и «мягкости» при контроле.

С учетом предложенного подхода, вероятность безопасной работы в течение времени t $P_{BP}(t)$ можно найти из выражения

$$P_{BP}(t) = 1 - H_{TP}(t). \quad (8)$$

Сделаем замечание к зависимости (8). Это выражение справедливо, прежде всего, для работ с повышенной опасностью, когда любое нарушение правил безопасности проведения работ с высокой вероятностью приводит к травме. Необходимо сказать, что в соответствии с законодательством Украины об охране тру-

да к таким работам в машиностроении относятся, в первую очередь работы на металлообрабатывающих и деревообрабатывающих станках, а также работы по обслуживанию автоматических линий. Для работ, не связанных с повышенной опасностью, величину $P_{БР}(t)$ целесообразно определять по формуле

$$P_{БР}(t) = 1 - \sum_{i=1}^n Q_{ОСi}(t) \times H_{ТРi}(t), \quad (9)$$

где $Q_{ОСi}(t)$ – вероятность возникновения i -ой опасной ситуации; $H_{ТРi}(t)$ – риск получения травмы в i -ой ситуации; n – число возможных опасных ситуаций у работника.

Событие $Ч_О$ – опасный отказ работника, может произойти в следующих случаях (события $Ч_i$):

- опасное действие работника при управлении оборудованием (событие $Ч_1$);
- опасное действие работника при установке или замене инструмента (событие $Ч_2$);
- опасное действие работника при использовании приспособления (событие $Ч_3$);
- опасное действие работника при установке-снятии заготовки (событие $Ч_4$).

Каждое из событий $Ч_i$ может произойти в одной из следующих ситуаций: не использование работником средств защиты (событие H_1); применение работником средств защиты (событие H_2).

Для каждого из событий $Ч_i$ по формуле полной вероятности можно записать

$$P(Ч_i) = P(H_1) \times P_{H_1}(Ч_i) + P(H_2) \times P_{H_2}(Ч_i), \quad (10)$$

где $P(Ч_i)$ – вероятность, соответственно событий $Ч_1, Ч_2, Ч_3$ и $Ч_4$; $P(H_j)$ – вероятность, соответственно событий H_1, H_2 ; $P_{H_j}(Ч_i)$ – условные вероятности событий $Ч_i$, вычисленные в предположении, что имели место события H_j (т.е. H_1 или H_2).

При определении вероятностей $P(H_j)$ следует иметь в виду, если предварительно известно, что для данной технологической операции работником не используются средства защиты, то $P(H_1)=1$, а $P(H_2)=0$. Тогда выражение (10) примет вид $P(Ч_i) = P_{H_1}(Ч_i)$.

События $Ч_i$ являются несовместными, поэтому

$$P(Q_O) = \sum_{i=1}^{n=4} P(Q_i), \quad (11)$$

где Q_O – вероятность опасного отказа работника.

Подставляя выражение (10) в (11) получаем:

$$P(Q_O) = \sum_{i=1}^{n=4} (P(H_1) \times P_{H_1}(Q_i) + P(H_2) \times P_{H_2}(Q_i)). \quad (12)$$

Рассматривая $P(Q_O)$ в формуле (12) за определенный промежуток времени, получаем выражение для оценки риска травмирования работника при различных его опасных действиях. Этот показатель целесообразно использовать в качестве основного показателя безопасности деятельности человека в системах «человек – техника – производственная среда».

Предложенные общие принципы могут быть использованы для решения проблемы оценки безопасности труда человека при проектировании технологических процессов в машиностроении.

Перспективами дальнейших исследований могут быть, например, в частности улучшение сбора и обработки статистических данных о травматизме на машиностроительных предприятиях Украины с целью выявления законов распределения риска травмирования человека для различных технологических операций.

Библиографический список

1. Основы инженерной психологии/ Б.А. Душков, Б.Ф. Ломов, В.Ф. Рубахин; Под ред. Б.Ф. Ломова. — М.: Высш. шк., 1986. — 448 с.
2. Смирнов Б.А. Инженерная психология: Экономические проблемы / Б.А. Смирнов, Б.А. Душков, Ф.П. Космолинский. — М.: Экономика, 1983. — 224 с.
3. Справочник по инженерной психологии / Б.Ф. Ломов, С.В. Борисов, В.А. Денисов; Под ред. Б.Ф. Ломова. — М.: Машиностроение, 1982. — 368 с.

Поступила в редакцию 30.01.2006 г.