УДК 62-52

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИЁМЫ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА В ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ И ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ ПОВЫШЕННОЙ ОПАСНОСТИ

В.И. Швецова, В.В. Севриков

Севастопольский государственный университет
г. Севастополь, ул. Университетская, 33
E-mail: lerasevas@mail.ru

Рассмотрены методические приёмы оценки по опытным данным надежности человека-оператора в эргатической системе контроля для объектов повышенной опасности. А также предложены новые нестандартные показатели для оценки этой надежности – частота относительного времени и коэффициент готовности человека.

Введение. Надежность эргатической системы контроля и защиты объектов повышенной опасности просто недопустимо оценивать, как это часто бывает, только по надежности их технической части, так как в этом случае предполагается, что характеристики работы оператора принимаются оптимальными и вероятность безотказности действия его P=1,00, чего в действительности быть не может. Поэтому оценки надежности таких систем являются грубо ошибочными. Для эргатических систем объектов повышенной опасности регламентированы два вида включения их в действие: первое – автоматическое при появлении признаков аварии; второе – дублирующее ручное аварийное включение человеком по световому и звуковому сигналам, например, пожарной сигнализации. Снижение инерционности ручного включения аварийного пускового устройства, а значит повышение надежности человека-оператора в эргатических системах, существенно влияет на трагические и экономические последствия аварий на объектах повышенной опасности. Следовательно, возникает необходимость в разработке методических приёмов оценки надежности эргономической составляющей, т.е. человека-оператора.

В справочнике по надежности [1, т. 3, с. 122] Д. Мейстером дается определение «Надежность работы человека определяется как вероятность того, что работа или поставленная задача будет выполнена успешно персоналом на любой заданной стадии работы системы в течение заданного минимального времени (при условии наличия требования относительно времени)». Следует выделить три особенности этого определения: 1 – минимального времени – это фундаментальное требование для эргатических систем безопасности, т.е. систем контроля и защиты объектов повышенной опасности; 2 – успешного выполнения работы, что означает, применительно к теории надежности, выполнение работы без ошибок, оказывающих значительное влияние на правильное (требуемое) выполнение поставленной задачи; 3 – сходство данного определения с определением надежности в технике, что подтверждает допустимость рассмотрения надежности человека-оператора как технического элемента технической динамической системы, что так же было обосновано в [2].

В большинстве методов прогнозирования надежности работы (действий в системе) человека предполагается, что имеются необходимые данные по частоте ошибок, обуславливающих появление отказов. В действительности таких данных очень мало, а по операторам механических систем практически не имеется. Прогнозы надежности основываются на статистических данных по отказам и соображениях подобия аналогов, по которым имеются эти данные. При отсутствии статистических по частотам ошибок человека прибегают к необходимости получения их опытным путем для конкретных условий, что затрудняет достижение цели по экономическим и организационным соображениям. Методы

прогнозирования надежности работы человека чаще всего основываются, как и в случае аппаратуры и механических систем, на вероятностных оценках случайных величин отдельных элементов, заданий, операций в предположении независимости их друг от друга и последовательности действий. Надежность человека-оператора можно выразить через вероятность появления ошибок его действий и неспособность выполнения им операций на необходимом (требуемом) уровне по своим физиологическим возможностям на применяемом или испытываемом оборудовании. Используемый метод такой оценки аналогичен методу оценки надежности техники и, в частности, аппаратуры.

Целью данной статьи является обосновать методический подход оценки надежности человека-оператора в эргатической системе контроля объектов повышенной опасности на примере опытных данных испытания ручного пускового устройства пожарной сигнализации.

Для вероятностной оценки качества действий оператора при испытаниях, в любом случае, удобно использовать отношение частоты $p = \frac{r}{n}$, где r – число успешно выполненных испытаний (заданий, опытов), а n – общее число испытаний. Следует понимать, что эта оценка справедлива только для конкретных условий и не может рассматриваться как фактическая вероятность.

Однако, при прогнозировании надежности действий человека-оператора, в случае испытания аварийного ручного пускового устройства, как и во всех других случаях, сталкиваемся с препятствием отсутствия достоверных данных по частоте ошибок (отказов), а, следовательно, с применением отношения $p = \frac{r}{n}$. Возникает необходимость доказательности (обоснованности), т.е. критерия условий оценки отказа оператора при успешном выполнении им задания, а следовательно допустимости применения отношения $p = \frac{r}{n}$. В [2, 3] обращалось внимание на возможность и целесообразность привлечения для оценки надежности человека-оператора тех же методов, которые используются в технике. Роль оператора можно оценить так же, как элемент аппаратуры, т.е. путем использования входных и выходных параметров. Это позволяет для описания характеристик человека и машины использовать общий язык и применять один и тот же математический аппарат.

Поскольку на работу человека оказывает влияние большое количество случайных факторов, то реакция его может соответствовать надежности, которая изменяется от 0 до 0,9999. В связи с этим трудно вывести обобщающие соотношения, охватывающие различные типы систем и решаемые ими задачи [1, с. 96]. Это существенно затрудняет использование в соотношениях и математических моделях конкретные показатели, характеризующие функционирование системы человек – машина и ее надежность, что нередко побуждает прибегать к качественным оценкам.

Оценка надежности вероятностными показателями, например, вероятность безотказной работы P(τ) элементов системы, в том числе и человека-оператора, выражается через время безотказной работы или через интенсивность отказов, в основе которой лежит частота ошибок человека, выполняющего задание. При этом имеет место неопределенность того, что следует понимать под приемлемой частотой ошибок. На практике прибегают к статистическим оценкам вероятностных показателей надежности, например: статистическая оценка вероятности безотказной работы $P = \frac{R}{N}$; статистическая оценка вероятности отказа $Q = \frac{r}{N}$; статистическая оценка частоты отказа $a = \frac{r(\Delta t)}{N\Delta t}$, где R – число успешно выполненных заданий или число объектов (элементов, изделий), которое находится в работоспособном состоянии к моменту времени t; $r(\Delta\tau)$ – число невыполненных заданий (объектов) за интервал времени Δt; N – общее число испытаний (объектов).

Для всех этих отношений нет доказательной (обоснованной) базы количественных лимитированных оценок заданий (объектов, испытаний), а следовательно и вероятностных показателей надежности как технических элементов, так и работы человека. Авторами данной работы сделана попытка разрешения этой неопределенности на основе понимания критичности последствий действия человека в эргатической системе с учетом регламентированных стандартом ГОСТ 27.310.–95 последствий и критичности отказов в технике [4].

Еще на начальном этапе исследования надежности работы человека было выделено два типа ошибок [1]. К ошибкам первого типа относятся критические по своим последствиям ошибки, вызывающие катастрофический отказ системы. Применительно к эргатическим системам безопасности этот отказ приводит к авариям и несчастным случаям с гибелью людей. Катастрофические отказы по вине человека встречаются реже, чем технические катастрофические отказы. Но последствия по первым бывают более неблагоприятными, чем по вторым. К другому типу относятся ошибки, не вызывающие катастрофических последствий. Подобные ошибки могут вызывать отказ только при напряженных рабочих условиях. Отмеченное выше явилось основой дальнейшего изучения критичности отказов в технике. В настоящее время на базе научных достижений создан стандарт по надежности в технике ГОСТ 27.310.– 95 «Анализ видов, последствий и критичности отказов» (АВПКО) [4]. И хотя этот стандарт напрямую не относится к надежности действий человека, его отдельные положения по количественной оценки вероятностных показателей отказов, с учетом аналогии, можно перенести на оценку времени безотказности действий человека.

Из категорий тяжести последствий отказов, приведенных в Приложении А из [4], принимаются к анализу решения наших экспериментальных задач категории IV и III. К категории IV относится «отказ, который быстро и с высокой вероятностью может повлечь за собой значительный ущерб для самого объекта и/или окружающей среды, гибель или тяжелые травмы людей, срыв выполнения поставленной задачи». Категория этих отказов наиболее удовлетворяет катастрофическим отказам человека-оператора эргатических систем безопасности как по временному фактору, так и последствиям тяжести аварии на защищаемом объекте.

К категории III относится «отказ, который быстро и с высокой вероятностью может повлечь за собой значительный ущерб для самого объекта и/или окружающей среды, гибель или тяжелые травмы людей, срыв выполнения поставленной задачи, но создает пренебрежимо малую угрозу жизни и здоровью людей». Эта категория больше удовлетворяет отказам человека, не вызывающим катастрофических последствий.

Для понимания аналогии возможности перенесения стандартных понятий критичности отказов в технике на надежность человека-оператора в системе безопасности приведем только основные. «Категория тяжести последствий отказов – классификационная группа отказов по тяжести их последствий, характеризуемая определенным, установленным до проведения анализа сочетанием качественных и/или количественных учитываемых составляющих ожидаемого (вероятного) отказа или нанесенного ущерба». Такое же определение по признакам вероятности появления технического отказа и нанесенного от него ущерба вполне можно применить к критическому отказу работы человека. Таким же образом можно классифицировать критический отказ человека, исходя из стандартного определения «отказ системы или ее элемента, тяжесть последствий в пределах данного анализа признана недопустимой и требует принятия специальных мер по снижению вероятности данного отказа и/или возможного ущерба, связанного с его возникновением».

Или критический элемент – «элемент системы, отказ которого может быть критическим», с пониманием этого «в процессе АВПКО конкретного изделия могут быть установлены иные признаки для отнесения элементов к категории критичных, например, критичным может быть элемент, отказ которого безусловно ведет к полному отказу системы, независимо от тяжести его последствий». Или определение показателя критичности отказа – «количественная характеристика критичности отказа, учитывающая его вероятность за время эксплуатации и тяжесть возможных последствий». Поскольку человек-оператор в эргатической динамической системе по восприятию реакций рассматривается как технический элемент, то большинство стандартных определений и оценочных показателей надежности допустимо перенести на деятельность человека в системе. Другие стандартные категории II и I тяжести последствий отказов как по оценке надежности человека-оператора, так и для оценки времени безотказности по ожидаемой вероятности отказов не являются представительными.

Допускаем, что оценку вероятности отказа человека-оператора в эргатической системе безопасности можно принять для четвертой категории тяжести последствий отказов, сопряженных с риском травмирования и гибелью людей, равную 0,001…0,005. При этом вероятность безотказной работы оператора в системе P=1–α = 0,999…0,995. Для третьей категории можно принять умеренную вероятность отказа, равную 0,005…0,990. Приняв малую вероятность риска оператора в системе α=0,001…0,005 и высокую вероятность безотказности его P=0,999…0,995, представляется возможность в эксперименте при испытании ручного аварийного пускового устройства зафиксировать среднее время действия человека (включения) по группе наблюдателей, соответствующее вероятности P. Общее время включения эргатической системы в действие (инерционность системы)

$$t_c = t_ч + t_T, \qquad (1)$$

где $t_ч$ – время включения человеком ручного пускового устройства (инерционность человека); $t_т$ – время включения в действие технической части системы (инерционность технической части).

Для эргатических систем безопасности эффективность в основном определяется временем включения их в действия, при достаточных других силовых и количественных характеристиках. Эргатическая система тем эффективнее, чем меньше время включения ее в действие. Поэтому условие оптимизации этого времени имеет вид

$$opt\{t_c = (t_ч + t_T)\} \to \min, \qquad (2)$$

где $t_ч = \sum_{i=1}^{m} t_{ч.i}$, $t_T = \sum_{i=1}^{n} t_{T.i}$, m – число составляющих временных операций (действий) человека, n – число временных технических операций.

Это наименьшее время может быть определено (рассчитано) из формулы принятой вероятности безотказности действия человека-оператора

$$P_ч = e^{-\lambda_ч \cdot \tau_ч}, \qquad (3)$$

равной 0,999 или другому обоснованному значению категорий IV и III. Это время является опорным (условно эталонным) для испытания пускового устройства в других мало удовлетворяющих условиях и с другими его конструкционными особенностями. Результаты испытания позволяют оптимизировать конструкцию пускового устройства, условия и режим его включения. Для этого следует обучить операторов и отработать их достаточный опыт в реальных условиях, обеспечивающих заданное среднее (по группе) время включения пускового устройства, соответствующее принятой вероятности P. Таким образом статистическая оценка вероятности безотказности действий включения ручного пускового устройства эргатической системы безопасности P=R/N

или других вероятностных показателей будет обоснована. В этом случае получаем общую вероятность безотказности оператора P, которая в теоретической формуле имеет вид

$$P = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 = \prod_{i=1}^{n} P_i, \qquad (4)$$

где P_i – соответственно составляющие операций (действий) человека: восприятия входного сигнала, внутренняя реакция и принятие решения, выходной отклик. Экспериментально провести оценку вероятности каждой составляющей P_i не представляется возможным из-за пока непреодолимых трудностей. Принимая экспоненциальный закон распределения показателей надежности человека-оператора в эргатической системе из формулы (3) вероятности безотказной работы можно определить интенсивность отказов при принятом значении вероятности, например, 0,999 и временем действия человека $\tau_ч$ определенного экспериментально, предварительно прологарифмировав выражение (3). В этом случае имеем

$$\lambda_ч = -\frac{lnP}{\tau_ч}, \qquad (5)$$

при экспоненциальном законе распределения $\lambda_ч$= const. Также представляется возможность оценить вероятность безотказности человека P при различных условиях и экспериментально отработать констркцию ручного аварийного пускового устройства эргатической системы безопасности.

Из выражения (5) можно вычислить время действия человека

$$\tau_ч = -\frac{lnP}{\lambda_ч}, \qquad (6)$$

поскольку $\lambda_ч$=const, можем вычислить среднее время безотказности человека-оператора

$$\overline{T} = \frac{1}{\lambda ч}, \qquad (7)$$

соответствующее принятой вероятности $P_ч$ и вычисленной интенсивности отказа при среднегрупповом времени испытания ручного пускового устройства. Групповое испытание позволит снивилировать (усреднить) психофизиологические и антропометрические особенности человека с учетом необходимой обученности.

Предлагается ввести новый нестандартный временной показатель статистической оценки вероятности безотказности действия человека-оператора включения пускового устройства эргатической системы безопасности. Таким показателем может быть отношение (частота относительного времени) порогового регламентированного времени включения оператором пускового устройства, соответствующего принятой нормативной вероятности безотказности P, к действительному времени при удалении оператора от пускового устройства на расстояние l>0 и других условиях выражение этого показателя имеет вид

$$\eta = \frac{\tau_{ч.l=0}}{\tau_{ч.l>0}} = p, \qquad (8)$$

при l=0 η=1, а при l=∞ $\eta = 0$, область значений $0 \leq \eta \leq 1$.

Другой предлагаемый приём оценки надежности человека-оператора по опытным данным, на примере ручного пускового устройства системы пожарной сигнализации, основан на выражении стандартного показателя в виде коэффициента готовности $К_Г$ технических изделий (объектов, систем, устройств и их элементов). Коэффициент готовности – это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени t, кроме планируемых периодов, когда использование объекта по назначению не предусмотрено. Выражение этого показателя имеет вид

$$К_г = \frac{T}{T+Tв}, \qquad (9)$$

где T – среднее время безотказной работы изделия (с учетом его составляющих $T=\Sigma T_i$); $T_в$ – среднее время восстановления работоспособности изделия после отказов (с учетом его составляющих $T_в=\Sigma T_{вi}$).

Статистическая оценка этого показателя имеет вид

$$К_г = P = \frac{\Sigma T}{\Sigma T_i + \Sigma T_{вi}}. \qquad (10)$$

Стандартное определение и выражение (10) показателя надежности в виде коэффициента готовности представляет собой временное отношение, что очень важно для эргатических систем объектов повышенной опасности, и оно является определяющим эффективности этих систем. С учетом отмеченного и, опуская принятую аналогию того, что человек-оператор в эргатических системах воспринимают сигналы и реакции как другие технические элементы, можно выполнить оценку надежности человека коэффициентом готовности его действий по опытным данным. В этом случае выражение (10) принимает следующий вид

$$K_{гч} = P = \frac{\Sigma T_{чi}}{\Sigma T_{чi} + \Sigma T_{чпi} + \Sigma T_{чдi}}, \qquad (11)$$

где $\Sigma T_{чi}$ – среднее время безотказности суммарных обязательных действий человека в системе; $\Sigma T_{чпi}$ – суммарное среднее время подхода человека к местам проявления его действий; $\Sigma T_{чдi}$ – суммарное среднее время досягаемости элементов системы по которым человек совершает действия.

Применительно к оценки надежности действий человека-оператора по включению устройства ручного пуска система пожарной сигнализации, принятого к испытанию, выражение (11) имеет вид

$$K_{гч} = P_{ч} = \frac{T_{чв}}{T_{чв} + T_{п} + T_{д}}, \qquad (12)$$

где $T_{чв}$ – среднее время безотказности непосредственного включения пускового устройства (нажатие кнопки «Пуск» $T_{нк}$); $T_{чв} = \sum_1^2 T_{чвi} = T_{рст} + T_{нк}$; $T_{рст}$ – время раскрытия створки (разрушение защитного стекла других типов устройств) с целью доступа к пусковой кнопке; $T_{п}$ – время подхода человека (оператора, диспетчера, дежурного, назначенного ответственного лица) к месту расположения пускового устройства; $T_{д}$ – время досягаемости пусковой кнопки рукой человека в зависимости от расстояния ее над рабочей поверхностью должностного лица.

Выражение (12) представляет собой ничто иное как частоту относительного времени ($K_{чв}=T_{чв}/\Sigma T_{i}$), согласующегося с отношением (8). В этом случае в качестве порогового регламентированного времени включения пускового устройства $T_{чв}$ можно принять наиболее оптимальное время при расположении устройства (кнопки ручного пуска) непосредственно на рабочем столе под рукой оператора.

Заключение. В данной статье рассмотрены методические приёмы оценки надежности человека-оператора в эргатической системе контроля и защиты объектов повышенной опасности по опытным данным, на примере ручного пускового устройства систем пожарно-охранной сигнализации. Предложены новые нестандартные показатели для оценки этой надежности – частота относительного времени и коэффициент готовности человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Справочник* по надежности в 3-х томах под ред. Б.Р. Левина и Б.Е. Бердичевского, перевод с английского. – М.: МИР, 1969. – 1050 с.
2. *Швецова В.И.* Анализ человеческой надежности эргатических систем контроля объектов повышенной опасности // Вісник СевНТУ. Сер. Механіка, енергетика, екологія: зб. наук. пр. – Севастополь, 2014. – Вип. 147/2014. – С. 151–156.
3. *Швецова В.И., Севриков В.В.* Математическое моделирование надежности человека-оператора в эргатических системах контроля объектов повышенной опасности // Системы контроля окружающей среды: сб. науч. тр. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2014. – Вып. 20. – С. 202–208.
4. *ГОСТ 27.310–95.* Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичность отказов: введен 1997-01-01. – Минск: ИПК, Изд-во стандартов. Приложения А, В.