

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА В ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ И ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

В.И. Швецова

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

В настоящей статье обоснована необходимость учета эргономической составляющей (человека-оператора) эргатической системы, а также предложено методическое решение по оценке надежности человека-оператора в эргатической системе контроля по опытным данным на примере ручного пускового устройства системы пожарной сигнализации, основанное на выражении стандартного показателя в виде коэффициента готовности технических изделий. В работе представлены результаты экспериментального исследования и их статистическая обработка: аппроксимация эмпирических данных методом корреляционно-регрессионного анализа и оценка адекватности аппроксимации экспериментальных результатов с помощью критерия согласия Фишера.

Ключевые слова: надежность, эргатическая система контроля, человек-оператор, оценка надежности, показатель оценки надежности.

Поступила в редакцию: 29.09.2020. После доработки: 21.10.2020.

Введение. Эргатическая система – это система управления, одним из элементов которой является человек (или группа людей). Успешность функционирования такой системы определяется совершенством взаимодействия человека и техники. В автоматических и автоматизированных системах нередко исключается роль человека-оператора при оценке их эффективности и надежности. В предыдущих статьях автора отмечалось, что надежность эргатической системы контроля и защиты опасных объектов просто недопустимо оценивать только по надежности их технической части, так как в этом случае предполагается, что характеристики работы оператора принимаются оптимальными и вероятность безотказности его действий равна 1, чего в действительности быть не может.

Для эргатических систем объектов повышенной опасности регламентированы два вида включения их в действие: первое – автоматическое при появлении признаков аварии; второе – ручное аварийное включение человеком по световому и звуковому сигналам, например, пожарной сигнализации. Снижение инерционности ручного включения ава-

рийного пускового устройства, а значит повышение надежности человека-оператора в эргатических системах, существенно влияет на социальные и экономические последствия аварий на объектах повышенной опасности. Успех контроля и защиты объектов повышенной опасности достигается быстродействием применяемых эргатических систем. При этом должно соблюдаться обязательное условие – одновременное проявление быстродействия технической части и человека-оператора системы. Ситуация с малой инерционностью технической части, но с высокой инерционностью действий человека-оператора может не обеспечить успеха действия эргатической системы. Это вызывает необходимость регламентации надежности нормативными актами (стандартами) не только технической части, но и действий в ней человека-оператора.

Отмеченное свидетельствует о том, что надежность человека-оператора не целесообразно исследовать в отрыве от технических систем, в которых имеет место его действие. Поскольку область применения эргатических систем весьма разнообразная, как разнообразны цели и условия (объекты) в которых они приме-

няются, то не может быть общих теоретических решений и опытных оценок надежности человека-оператора. Следовательно, возникает необходимость в разработке методических приёмов оценки надежности эргономической составляющей, т.е. человека-оператора.

Целью данной статьи является показать методический подход к оценке надежности человека-оператора в эргатической системе контроля и защиты объектов окружающей среды.

Эргатическая система – это техническая динамическая система с трехзвенной структурой техника–человек–среда, с открытыми границами, состояние детерминированное в дискретные моменты времени, но она может переходить в стохастическое состояние в следствии отказов и восстановления работоспособности ее элементов. Принимается с некоторым допущением, что элемент человек-оператор воспринимает сигналы и реакции как другие технические элементы. Система рассматривается как единое целое, что позволяет применять для описания надежности ее один и тот же математический аппарат. В [1,2] было обосновано, что человек с допустимым приближением воспринимает сигналы и реакции как технические элементы. В [3] обращалось внимание на возможность и целесообразность привлечения для оценки надежности человека-оператора тех же методов, которые используются в технике.

Методика исследования. В предыдущих работах анализ состояния задачи математического моделирования надежности человека-оператора в эргатических системах контроля и защиты опасных объектов, на примере взрывопожароопасных и химически опасных объектов, показал на возможность ее решения с привлечением теории синтеза сложных технических систем. Математическое описание состояний действия оператора достигается с применением метода системного анализа, включающего в себя: структурный анализ, морфологический анализ, построение графов состояний оператора и их переходов, применение теории марковских случайных процес-

сов, описываемых дифференциальными уравнениями.

Решение дифференциальных уравнений требует наличия опытных данных по отказам человека-оператора, интенсивности этих отказов (неправильных действий) и интенсивности восстановлений (исправлений) или среднего времени безотказности и среднего времени исправления действий оператора. Поскольку статистика человеческой надежности весьма ограничена и она многогранна, то для ее пополнения требуются специальные широкие и длительные экспериментальные исследования, то в данной работе приводятся результаты экспериментов, частично восполняющие данный пробел.

Оценка надежности вероятностными показателями, например, вероятность безотказной работы $P(t)$ 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 $\alpha = \frac{r(\Delta t)}{N\Delta t}$, где R – число успешно выполненных заданий или число объектов (элементов, изделий), которое находится в работоспособном состоянии к моменту времени t ; r – 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. В данной работе 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]. И хотя этот стандарт напрямую не относится к надежности действий человека, его отдельные положения по количественной оценке вероятностных показателей отказов, с учетом аналогии, можно перенести на оценку времени безотказности действий человека.

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. Это наименьшее время может быть определено (рассчитано) из формулы (1) нормативной вероятности безотказности действия человека-оператора

$$P = e^{-\lambda \cdot t} \quad (1)$$

равной 0,999 или другому обоснованному значению принятых IV и III категорий из [4]. Это время является опорным (условно эталонным) для испытания пускового устройства.

В данной работе предлагается оценить надежность человека-оператора в эргатической системе на примере включении ручного пускового устройства. Такой путь оценки надежности возможен по аналогии с оценкой коэффициента готовности восстанавливаемого технического устройства. В этом случае за статистическую оценку вероятности действия человека можно принять отношение непосредственного времени включения устройства к суммарному времени выполняемых операций. Выражение данного показателя имеет вид (2)

$$K_{гч} = P_{ч} = \frac{T_p}{T_p + T_{п}} = \frac{T_p}{T_p + (t_{н} + t_{о} + t_{д} + t_{п})} \quad (2)$$

где $K_{гч}$ – коэффициент готовности оператора, являющийся статистической оцен-

кой вероятности безотказности действий человека $P_{ч}$; T_p – время «рабочее»; $T_{п}$ – время «простоя»; $t_{н}$ – время непосредственного включения (нажатия кнопки) пускового устройства; $t_{о}$ – время открытия створки пускового устройства; $t_{д}$ – время досягаемости руки человека кнопки пускового устройства; $t_{п}$ – время подхода человека к пусковому устройству по сигналу тревоги.

Составляющие выражения (2) подлежат определению опытным путем.

Учитывая формулу среднего времени безотказности $\bar{T} = \frac{1}{\lambda}$, предварительно прологарифмировав равенство (1), выразив из него λ , получаем формулу для расчета «рабочего» времени T_p

$$T_p = \bar{T} = \frac{1}{\lambda} = \frac{t}{-\ln P} = \frac{t_{н}}{-\ln P} \quad (3)$$

Функциональная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

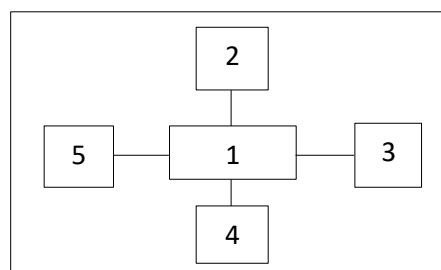


Рис.1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. Experimental installation scheme

Принцип работы установки: при срабатывании пожарного датчика дыма 1 включается сирена и загорается световой индикатор 2 и одновременно запускается электросекундомер 3, который останавливается при нажатии устройства ручного пуска 4, в этот момент отключаются звуковой и световой сигналы (таким образом фиксируется время от момента включения сигнализации до нажатия кнопки устройства ручного пуска). В эксперименте датчик дыма срабатывал принудительно с помощью кнопки 5.

Экспериментальное исследование проводилось с использованием методов теории вероятности, методов математической статистики, корреляционно-

регрессионного анализа и его основы метода наименьших квадратов для обработки опытных данных. Оценка адекватности аппроксимации экспериментальных результатов выполнялась по критерию согласия Фишера.

Результаты исследования основаны на 15 испытуемых возрастом 20 лет. Количество измерений (опытов) по каждому параметру t_i : $n=10$ (т.е. t_i – это среднее 150 значений). Перед применением статистических тестов проводилась обработка данных на наличие (отсутствие) грубых погрешностей с использованием критерия Смирнова-Граббса. Расчетные (средние) статистические значения временных параметров смешанной группы представлены в табл. 1.

Таблица 1. Значения временных параметров смешанной группы

t_n, c	t_o, c	$t_{д(0,5)}$	$t_{п(1),c}$	$t_{п(5),c}$	$t_{п(10),c}$
1,18	0,48	0,45	1,01	2,06	3,88

В таблице $t_{п(1)}$, $t_{п(5)}$, $t_{п(10)}$ – это время подхода человека к пусковому устройству по сигналу тревоги с расстояния 1 м, 5 м, 10 м соответственно.

Рабочее время T_p рассчитываем по формуле (3), приняв вероятность $P=0,95$, достаточную для решения инженерных задач, получаем: $T_p = 1,18 / (-\ln 0,95) = 23,0$ с.

Коэффициент готовности человека $K_{гч}$, когда человек-оператор находится рядом с устройством ручного пуска и более того, створка устройства открыта (в этом случае $K_{гч} \rightarrow \max$) равен

$$K_{гч} = \frac{23}{23 + t_n} = \frac{23}{23 + 1,18} = 0,951. \quad (4)$$

В случае удаления человека-оператора на расстоянии 10 м от устройства ручного пуска, створка устройства закрыта, $K_{гч}$ равен

$$K_{гч} = \frac{23}{23 + t_n + t_o + t_{п(10)}} = \frac{23}{23 + 1,18 + 0,48 + 3,88} = 0,806. \quad (5)$$

Расчет $K_{гч}$ на расстоянии 0,5, 1 и 5 м производится аналогичным образом, для удобства значения $K_{гч}$ сведены в табл. 2.

Таблица 2. Значения $K_{гч}$ в зависимости от расстояния l в смешанной группе

$l, м$	0	0,5	1	5	10
$K_{гч}$	0,951	0,916	0,896	0,861	0,806

Для наглядности покажем значения коэффициента готовности человека $K_{гч}$ на графике (рис. 2). Из графика видно, что с увеличением расстояния, т.е. удаления человека-оператора от устройства ручного пуска, а значит и с увеличением времени подхода, коэффициент готовности человека $K_{гч}$ уменьшается.

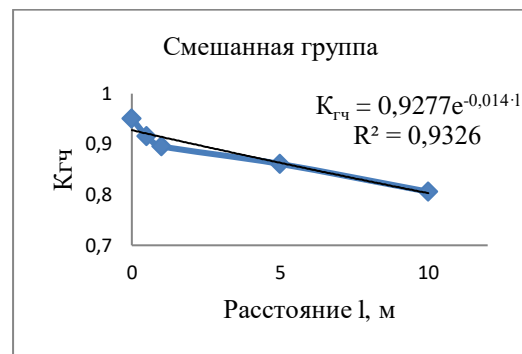


Рис. 2. Экспоненциальная зависимость коэффициента готовности $K_{гч}$ от расстояния l в смешанной группе

Fig. 2. Exponential dependence of a human availability on distance in a mixed group

Оценим качество уравнения регрессии с помощью ошибки абсолютной аппроксимации по формуле

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|y_i - y_T|}{y_i} \right) \cdot 100\%, \quad (6)$$

где n – количество опытов (измерений); y_i – экспериментальный результат измерения; y_T – теоретический результат измерения, полученный из уравнения регрессии

$$\bar{A} = \frac{1}{5} \cdot (0,05715) \cdot 100\% = 1,1\% \quad (7)$$

Значение средней ошибки аппроксимации, равное 1,1% свидетельствует об очень хорошо подобранной модели уравнения.

Оценку аппроксимации экспериментальных результатов провели с помощью критерия согласия Фишера. Полученное значение $F=33,4$ ($F > F_{табл}=10,1$) свидетельствует о статистической значимости математической модели (8) коэффициента готовности человека $K_{гч}$ в смешанной группе

$$K_{гч}(смеш) = 0,9277 \cdot e^{-0,014 \cdot l} . \quad (8)$$

Рассмотрим мужскую и женскую группы (8 и 7 испытуемых соответственно). Расчет производился аналогичным образом, поэтому далее представлены конечные результаты в виде таблиц и графиков.

Таблица 3. Значения временных параметров мужской группы

$t_n, с$	$t_o, с$	$t_{д(0,5)}$	$t_{п(1),с}$	$t_{п(5),с}$	$t_{п(10),с}$
1,07	0,45	0,38	1,07	2,12	3,88

Таблица 4. Значения $K_{гч}$ в зависимости от расстояния l в мужской группе

$l, м$	0	0,5	1	5	10
$K_{гч}$	0,951	0,917	0,890	0,851	0,794

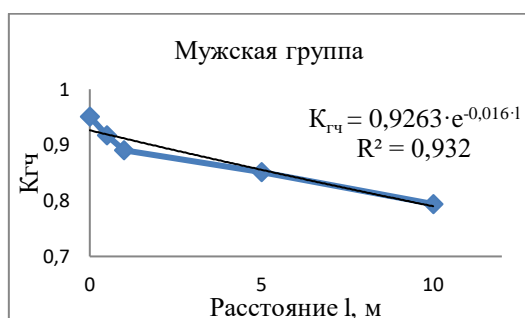


Рис. 3. Экспоненциальная зависимость коэффициента готовности $K_{гч}$ от расстояния l в мужской группе

Fig. 3. Exponential dependence of a human availability on distance in a male group

Значение средней ошибки аппроксимации по уравнению регрессии на рис. 3, получилось равным 1,3%, значение кри-

терия Фишера составило $F=35,98$ ($F > F_{табл}=10,1$). Таким образом, математическая модель (9) коэффициента готовности человека $K_{гч}$ признается статистически значимой

$$K_{гч}(муж) = 0,9263 \cdot e^{-0,016 \cdot l} . \quad (9)$$

Таблица 5. Значения временных параметров женской группы

$t_n, с$	$t_o, с$	$t_{д(0,5)}$	$t_{п(1),с}$	$t_{п(5),с}$	$t_{п(10),с}$
1,32	0,51	0,53	0,95	1,99	3,87

Таблица 6. Значения $K_{гч}$ в зависимости от расстояния l в женской группе

$l, м$	0	0,5	1	5	10
$K_{гч}$	0,951	0,916	0,902	0,871	0,819

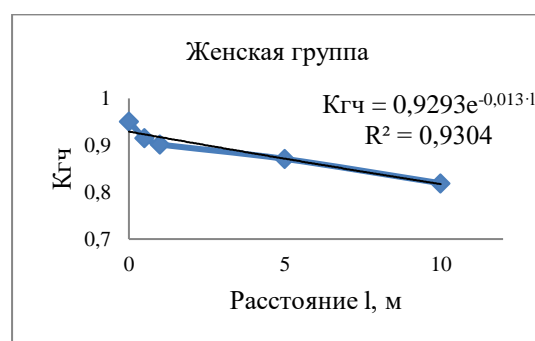


Рис. 4. Экспоненциальная зависимость коэффициента готовности $K_{гч}$ от расстояния l в женской группе

Fig. 4. Exponential dependence of a human availability on distance in a female group

Значение средней ошибки аппроксимации по уравнению регрессии на рис. 4, получилось равным 1,0%, значение критерия Фишера составило $F=35,93$ ($F > F_{табл}=10,1$). Значит, матмодель (10) коэффициента готовности человека $K_{гч}$ признается статистически значимой

$$K_{гч}(жен) = 0,9293 \cdot e^{-0,013 \cdot l} . \quad (10)$$

Целесообразность рассмотрения отдельно женской и мужской групп заключалась в выявлении гендерных различий при определении времени реакции человека. Однако в результате эксперимента существенных различий выявлено не было.

Заключение. Предложена методика исследования надежности человека-оператора в эргатических системах контроля и защиты объектов повышенной опасности, построенная на гипотезе того, что человек в системе воспринимает сигналы и реакции как другие технические элементы.

Создана экспериментальная лабораторная установка, имитирующая устройство пожарной сигнализации (световой и звуковой) на основе серийного датчика дыма типа ИПД-3.1М, оснащенная дополнительно электрическим чувствительным секундомером с ценой деления 0,01 секунда, ручным аварийным серийным пусковым устройством типа «ИПР-3СУМ», элементом дистанционного управления ЭДУ 513-3М, позволившая провести эксперименты по исследованию надежности человека-оператора. Данная установка позволяет исследовать временные характеристики (быстродействие, инерционность), надежность человека по профессиональной пригодности в других сферах деятельности, таких как вождение транспортных средств, диспетчерской службе, управлении быстропротекающими процессами и т.п.

Перспективой дальнейших исследований является оценка надежности человека-оператора в эргатической системе по изложенной методике различных возрастных групп (30-, 40-, 60-тилетних) и их сравнительная характеристика между собой и анализ.

Работа выполнена в рамках написания диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 на тему «Структурная надежность человека-оператора в эргатических системах контроля и защиты взрывопожароопасных объектов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Оптимизация структур эргатических систем контроля и защиты пожаро-взрывоопасных объектов / В.В. Севриков, Л.А. Ничкова, И.В. Севриков [и др.] Монография. Санкт-Петербург: Лань. 2020. 236 с.*
2. *Севриков А.И. Формирование множества структур эргатических систем контроля и защиты взрывопожароопасных объектов при проектировании // Технологічні комплекси: наук. журнал. Луцк. 2013. № 1 (7). С. 64–70.*
3. *Швецова В.И. Моделирование надежности человека-оператора эргатической системы контроля природной среды и защиты взрывопожароопасных объектов. // Системы контроля окружающей среды. 2020. Вып. 1(39). С. 160–167.*
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.*

ASSESSMENT OF HUMAN OPERATOR RELIABILITY IN ERGATIC SYSTEMS OF MONITORING AND PROTECTION OF ENVIRONMENTAL OBJECTS

V.I. Shvetsova

Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

In the article the need to take into account the ergonomic component (i.e. human operator) of the ergatic system is proved. Methodological approach for assessing the human operator reliability in an ergatic control system based on experimental data using the example of a manual trigger of a fire alarm system, based on the expression of a standard pointer in the form of a readiness factor of technical products is proposed. The experimental research results and their statistical processing: the approximation of empirical data by the method of correlation-regression analysis and an assessment of the adequacy of the approximation of the experimental results using the Fisher's goodness-of-fit test are presented.

Keywords: reliability, ergatic control system, human operator, reliability assessment, methodological approach.