

**ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ «ЧЕЛОВЕК–МАШИНА–СРЕДА»:  
ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА**

**В.И. Швецова**

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

В статье обращается внимание на не учет человеческой составляющей при решении оптимизационных задач в системах типа «человек–машина–среда», что очевидно связано с отсутствием рабочих методик. Предложен математический аппарат оценки надежности человека-оператора эргатической системы на основе теории марковских случайных переходных процессов состояний, описываемых многочленной системой дифференциальных уравнений по каждой операции человека в системе, решаемой при наличии опытных данных. Обоснована возможность оценки проектировщиком финальной вероятности человека-оператора эргатической системы по одной наиболее ответственной операции при отсутствии статистических данных по аналогии «слабого» звена в технической системе. Результаты экспериментального исследования представлены четырьмя возрастными группами, а также их статистическая обработка.

**Ключевые слова:** надежность, система «человек–машина», эргатическая система контроля, человек-оператор, оценка надежности, показатель оценки надежности.

Поступила в редакцию: 13.02.2021.

**Введение.** Система в общем понимании – множество элементов, находящихся в отношениях и связях друг с другом, которые образуют определенную целостность и единство. Система «человек–машина–среда», или сложная техническая система, или социально-техническая система, а в последствии эти системы получили название эргатические с трехзвенной структурой техника–человек–среда – это система управления, одним из элементов которой является человек (или группа людей).

Статистика показывает, что в авиации до 70% лётных происшествий случается по вине человека. Более 56% из общего числа происшествий, где обошлось без смертельного исхода, приходится на сенсомоторные акты. Около 52% от числа трагических случаев сводятся к ошибкам категории «принятие решения». Ошибки человека являются основной причиной большинства аварий и других инцидентов на море. Ошибки человека вызвали от 60 до 80% аварийных случаев, в то время как конструктивные недостатки оборудования дали лишь немногим более 10%.

Надежность эргатической системы (ЭС), иными словами системы «человек – машина», т.е. ее свойство сохранять значение установленных существенных параметров в определенных пределах, зависит как от технических факторов, так и от человеческих составляющих системы, от характера функций, возложенных на человека-оператора, от человеческого фактора.

Для решения оптимизационных задач в человеко-машинных системах необходимо не только учитывать роль человека, но и иметь возможность количественно оценить ее. До сих пор оценка надежности и эффективности ЭС и человека-оператора в них выполняется по-разному и без убедительных обоснований, что приводит к некорректному решению оптимизационных задач. Возникает необходимость в разработке единого подхода и методологии и оценке надежности человека-оператора для проектировщиков эргатических систем.

ЭС контроля и защиты объектов повышенной опасности, в первую очередь, должны быть эффективными и надежными. Чаще всего при разработке и проектировании системы этого вида ее эф-

фективность и надежность оценивается только по технической части. При этом эффективность эргатической системы оценивается по экономической составляющей. Это связано с тем, что в настоящее время отсутствуют не только рабочие методики, но и методология оценки эффективности с учетом интегрального критерия надежности: технической составляющей, и человека-оператора.

В качестве основного показателя надежности ЭС следует принять вероятность безотказного, безошибочного и своевременного выполнения задачи системой определяемую через показатели надежности оператора и техники с учетом взаимного влияния их друг на друга. К числу показателя надежности техники относятся вероятность безотказной работы в течение времени и коэффициент готовности.

Теоретическое выражение человеческой надежности в системах управления было представлено еще в шестидесятых годах прошлого века [1]. Показателем этой надежности принята вероятность безотказности действий человека  $P_ч$  в системе, представленная тремя ее составляющими:  $P_1$  – восприятие человеком входного сигнала;  $P_2$  – внутренняя реакция и принятие решения;  $P_3$  – выходной отклик (действие), т.е.

$$P_ч = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3. \quad (1)$$

Однако выражение (1) не имеет замкнутого практического решения. Поэтому совершенствование расчетных и экспериментальных методов оценок надежности эргатических систем, как их технической части, так и человека-оператора остается весьма актуальной проблемой.

При проектировании эргатических систем проектировщики решают две основные задачи: первую – определяют действия (операции) и последовательность их выполнения; вторую – оценивают надежность каждой операции и в целом надежность человека. Первая задача опытными проектировщиками решается без особых затруднений. Решение второй – связано с затруднениями в связи с отсутствием доступного матема-

тического аппарата. Возникает необходимость в дополнительных теоретических и экспериментальных исследованиях, в привлечении аналоговых данных и ориентировочных оценках надежности с целью ограничения структур эргатических систем при их дальнейшей оптимизации.

Целью данной статьи является сравнительная оценка надежности человека-оператора в ЭС различных возрастных групп (20-, 30-, 40-, 60-летних) и их сравнительная характеристика между собой по методике, изложенной в [2].

**Методика исследования.** При определении надежности ЭС необходимо учитывать следующее:

1. Показатели надежности должны быть едиными для всех звеньев ЭС, включать в себя в явном виде показатели надежности ее отдельных звеньев – человека и машины.

2. При определении надежности ЭС с методической точки зрения целесообразно представлять человека-оператора в качестве одного из звеньев ЭС [3]. Вместе с тем следует помнить, что человек является специфическим звеном ЭС с присущими только ему особыми свойствами.

3. Структурно ЭС состоит из отдельных подсистем (технической, эргономической, т.е. человека-оператора), которые, в свою очередь, состоят из отдельных элементов. Каждый элемент, включая и человека-оператора, обладает всеми признаками технической динамической системы. Элементы, подсистемы и система в целом изменяются во времени и характеризуются начальным, текущим и конечным состояниями и историей развития.

Следуя логике того, что элемент человек-оператор в ЭС рассматривается как технический элемент этой же системы, то модель случайных марковских процессов правомерно распространить на состояние человеческого процесса [4]. При этом человек в своих действиях совершает ошибки, что приводит к отказам человека, а следовательно, и отказам системы. В тоже время оператор может повторить это действие, т.е. восстановить свою работоспособность. Таким

образом, триада действий человека (1 – восприятие сигнала, 2 – принятие решения, 3 – отклик, т.е. выходное действие) образует систему переходных случайных процессов с финальными состояниями  $S_{ч}$  и вероятностями  $P_{ч}$  по схеме (2)

$$\begin{cases} S_{ч0} \rightarrow P_{ч0}, \\ S_{ч1} \rightarrow P_{ч1}, \\ S_{ч2} \rightarrow P_{ч2}, \\ S_{ч3} \rightarrow P_{ч3}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $S_{ч0}$ ,  $P_{ч0}$  – начальное работоспособное состояние человека;  $S_{ч1}$ ,  $P_{ч1}$  – состояние человека при отказе восприятия входного сигнала с интенсивностью  $\lambda_{ч1}$  и восстановлением  $\mu_{ч1}$ ;  $S_{ч2}$ ,  $P_{ч2}$  – тоже самое при принятии решения;  $S_{ч3}$ ,  $P_{ч3}$  – тоже самое при отклике, т.е. действии.

Допускаем, по аналогии с технической системой, что выявляются все отказы (ошибки) человека, и после их проявления сразу начинается восстановление работоспособности. При этом потоки отказов и восстановлений простые, ординарные и стационарные. В этом случае финальные вероятности  $P_{чi}$  состояний  $S_{чj}$  также стационарные, а значит, применим экспоненциальный закон распределения показателей надежности человека-оператора эргатической системы. Вероятности  $P_i$  состояния элементов  $S_i$  описываются системой дифференциальных уравнений (3)

$$\begin{cases} S_1 \left\{ \begin{aligned} \frac{dP_1}{d\tau} &= -\mu_1 \cdot P_1 + \lambda_1 \cdot P_0 \\ \frac{dP_2}{d\tau} &= -\mu_2 \cdot P_2 + \lambda_2 \cdot P_0 \\ \frac{dP_3}{d\tau} &= -\mu_3 \cdot P_3 + \lambda_3 \cdot P_0 \\ \frac{dP_4}{d\tau} &= -\mu_4 \cdot P_4 + \lambda_4 \cdot P_0 \end{aligned} \right. \end{cases} \quad (3)$$

Для описания этой надежности принимаем марковский математический аппарат в виде системы дифференциальных уравнений (3) с построением графа состояний человека-оператора (рис. 1).

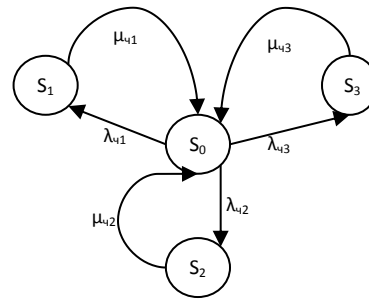


Рис. 1. Граф состояний человека-оператора в эргатической системе контроля  
Fig. 1. State graph of a human operator in an ergatic control system

Однако, решение системы марковских дифференциальных уравнений (3) затруднительно. Наиболее доступным из числа возможных решений является применения принципа Колмагорова – нормирования надежности по ее составляющим. Такой прием позволяет системе дифференциальных уравнений Колмагорова свести к системе простых алгебраических уравнений.

Применительно к решению данной задачи, в соответствии с графом состояний человека-оператора (рис. 1), марковская система дифференциальных уравнений имеет вид (4)

$$\begin{cases} P_{ч1} = \frac{P_{ч0} \cdot \lambda_{ч1}}{\mu_{ч1}}, \\ P_{ч2} = \frac{P_{ч0} \cdot \lambda_{ч2}}{\mu_{ч2}}, \\ P_{ч3} = \frac{P_{ч0} \cdot \lambda_{ч3}}{\mu_{ч3}}. \end{cases} \quad (4)$$

Решение задачи оценки надежности человека-оператора в ЭС контроля вредных веществ и защиты объекта повышенной опасности даже при сведении множества операций путем экспертных оценок проектировщиков до пяти-семи также затруднительно. Для практической реализации предложенных выражений (4) необходимы количественные оценки интенсивности отказов  $\lambda_{чi}$  и восстановлений  $\mu_{чi}$  работоспособности человека по каждой операции ЭС, которые можно получить опытным путем, из справочных данных или аналогов. Справочные данные и аналоги крайне ограничены,

поэтому остается реальным опытный путь по каждой операции и по каждому действию человека в операции. В этом случае программа эксперимента объемная и трудоемкая. В этом случае возникает необходимость в приемлемом упрощении оценок надежности человека-оператора в ЭС.

Можно допустить возможность оценки проектировщиками финальной вероятности безотказности человека-оператора в ЭС контроля, в случае отсутствия статистических данных, по наиболее ответственной в достижении конечной цели еденичной операции с наименьшей надежностью по отношению к другим операциям, и по еденичной характеристике оператора в виде выходного действия оператора, т.е. отклика. В большинстве случаев ответственной операцией человека-оператора ЭС контроля и защиты опасного объекта является действие ручного включения пускового устройства при возникшей критической ситуации (аварии). Эргатические системы – это автоматизированные системы, в которых часть операций производится человеком вручную. А это значит, что эти операции по отношению к операциям, выполняемыми в автоматическом режиме, являются более инерционными. Любая автоматизированная система контроля и защиты взрывопожароопасных объектов помимо автоматического включения имеет ручное устройство пускового включения. На опасных объектах это устройство обязательно должно иметь кнопку ручного пуска на случай несрабатывания (отказа) автоматического пуска и даже при срабатывании его включается ручной пуск, чтобы наверняка была достигнута цель – предотвращение аварии.

В [2] предлагается оценить надежность человека-оператора в ЭС контроля и защиты взрывопожароопасных объектах на примере включения ручного пускового устройства. Такой путь оценки надежности возможен по аналогии с оценкой коэффициента готовности восстанавливаемого технического устройства. За статистическую оценку вероятности действия человека принимается отношение непосредственного времени

включения устройства к суммарному времени выполняемых операций. Выражение данного показателя имеет вид (5)

$$K_{гч} = P_{ч} = \frac{T_p}{T_p + T_n} = \frac{T_p}{T_p + (t_n + t_o + t_d + t_{п})}, \quad (5)$$

где  $K_{гч}$  – коэффициент готовности человека-оператора, являющийся статистической оценкой вероятности безотказности действий человека  $P_{ч}$ ;  $T_p$  – время «рабочее»;  $T_n$  – время «простоя»;  $t_n$  – время непосредственного включения (нажатия кнопки) пускового устройства;  $t_o$  – время открытия створки пускового устройства;  $t_d$  – время досягаемости руки человека кнопки пускового устройства;  $t_{п}$  – время подхода человека к пусковому устройству по сигналу тревоги.

По каждой возрастной группе составляющие выражения (5) определялись опытным путём с помощью лабораторной установки. Функциональная схема и принцип работы такой экспериментальной установки представлен в [2].

Обработка опытных данных проводилась с использованием методов математической статистики, корреляционно-регрессионного анализа. Оценка адекватности аппроксимации экспериментальных результатов выполнялась по критерию согласия Фишера.

**Результаты исследования** представлены четырьмя возрастными группами: 20-, 30-, 40-, 60-ти лет, каждая из которых включала в себя 12 испытуемых. Количество измерений (опытов) по каждому параметру  $t_i$ ;  $n=10$  (т.е.  $t_i$  – это среднее 120 значений). Предварительно проводилась обработка данных на наличие (отсутствие) грубых погрешностей с использованием критерия Смирнова-Граббса. Расчетные (средние) статистические значения временных параметров возрастных групп представлены в табл. 1. В табл. 1  $t_{п(1)}$ ,  $t_{п(5)}$ ,  $t_{п(10)}$  – это время подхода человека к пусковому устройству по сигналу тревоги с расстояния 1 м, 5 м, 10 м соответственно.

**Таблица 1.** Значения временных параметров различных возрастных групп

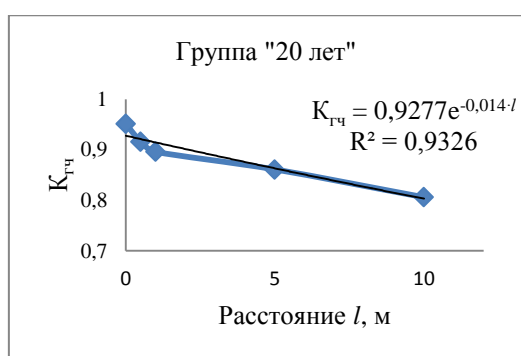
$t_{н}, с$	$t_{о}, с$	$t_{д(0,5)}$	$t_{п(1)}, с$	$t_{п(5)}, с$	$t_{п(10)}, с$
«20 лет»					
1,18	0,48	0,45	1,01	2,06	3,88
«30 лет»					
0,93	0,86	0,64	1,46	2,78	4,69
«40 лет»					
1,17	0,73	0,42	1,19	2,97	4,91
«60 лет»					
1,24	0,72	0,63	1,17	3,45	4,89

Расчет коэффициент готовности человека-оператора  $K_{гч}$  на расстояниях 0,5, 1 и 5 м производится по формуле (5), значения

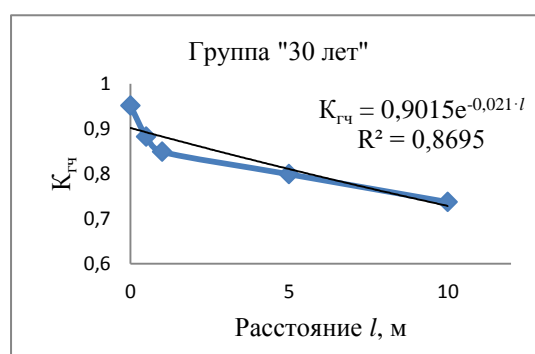
$K_{гч}$  сведены в табл. 2 и представлены на графике (рис. 2).

**Таблица 2.** Значения  $K_{гч}$  в зависимости от расстояния  $l$  в группе «20 лет»

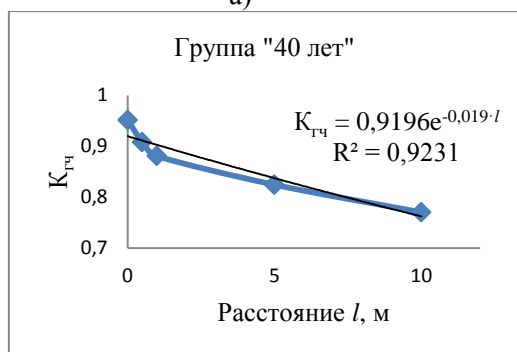
$l, м$	0	0,5	1	5	10
«20 лет»					
$K_{гч}$	0,951	0,916	0,896	0,861	0,806
«30 лет»					
$K_{гч}$	0,951	0,882	0,848	0,798	0,737
«40 лет»					
$K_{гч}$	0,951	0,907	0,880	0,824	0,770
«60 лет»					
$K_{гч}$	0,951	0,903	0,885	0,817	0,781



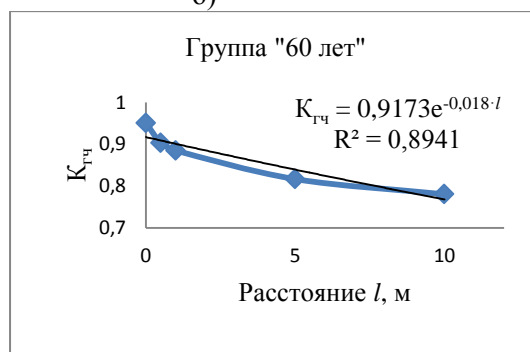
а)



б)



в)



г)

**Рис. 2.** Экспоненциальная зависимость коэффициента готовности  $K_{гч}$  от расстояния  $l$  в различных группах:

а) «20 лет»; б) «30 лет»; в) «40 лет»; г) «60 лет»

**Fig. 2.** Exponential dependence of a human availability on distance in different groups:

а) «20 years»; б) «30 years»; в) «40 years»; г) «60 years»

Полученные уравнения регрессий представлены ниже

$$K_{гч}(20 \text{ лет}) = 0,9277 \cdot e^{-0,014 \cdot l} \quad (6)$$

$$K_{гч}(30 \text{ лет}) = 0,9015 \cdot e^{-0,021 \cdot l} \quad (7)$$

$$K_{гч}(40 \text{ лет}) = 0,9196 \cdot e^{-0,019 \cdot l} \quad (8)$$

$$K_{гч}(60 \text{ лет}) = 0,9173 \cdot e^{-0,018 \cdot l} \quad (9)$$

Качество уравнений регрессии оценивалось с помощью ошибки абсолютной аппроксимации по стандартной

формуле. Значения средней ошибки аппроксимации, равные 1,1%, 2,9%, 1,8%, 2,1% в группах 20, 30, 40 и 60 лет соответственно, свидетельствует об очень хорошо подобранной модели уравнения.

Оценка аппроксимации экспериментальных результатов проводилась с помощью критерия согласия Фишера. Полученные значения  $F = 33,4$ ;  $F = 15,77$ ;  $F = 31,63$ ;  $F = 23,45$  ( $F_i > F_{\text{табл}} = 10,1$  при уровне значимости  $\alpha=0,05$ ) в группах 20, 30, 40, 60 лет соответственно свидетельствует о статистической значимости математических моделей (6–9) коэффициента готовности человека  $K_{гч}$ .

**Заключение.** Представлен математический аппарат оценки финальной надежности человека-оператора ЭС на основе теории марковских случайных переходных процессов состояний, описываемых многочленной системой дифференциальных уравнений по каждой операции человека в системе, решаемой при наличии опытных данных.

Обоснована возможность оценки проектировщиком финальной вероятности человека-оператора ЭС по одной наиболее ответственной операции (для достижения конечной цели) при отсутствии статистических (опытных) данных по аналогии «слабого» звена в технической системе.

Проведены серии экспериментов по исследованию надежности действия человека-оператора при включении ручно-

го аварийного пускового устройства, регламентированного в обязательном порядке в дополнении к автоматическому включению ЭС контроля и защиты объектов повышенной опасности.

На основании полученных экспериментальных данных существенного различия в коэффициенте готовности человека  $K_{гч}$  у различных возрастных групп выявлено не было.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Справочник по надежности* в 3-х томах под ред. Б.Р. Левина и Б.Е. Бердичевского, перевод с англ. М.: МИР. 1969. 1050 с.
2. *Швецова В.И.* Оценка надежности человека-оператора в эргатических системах контроля и защиты объектов окружающей среды. // Системы контроля окружающей среды. 2020. Вып. 4(42). С. 127–132.
3. *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.
4. *Присняков В.Ф., Присняков Л.М.* Математическое моделирование переработки информации оператором человеко-машинных систем. М.: Машиностроение. 1990. 245 с.

## OPTIMIZATION OF “HUMAN-MACHINE-ENVIRONMENT” SYSTEM: HUMAN-OPERATOR RELIABILITY ASSESSMENT

V.I. Shvetsova

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

This article focuses on disregarding the human component when solving optimization problems in systems "man-machine-environment", which is obviously due to the lack of working methods. An approach and mathematical apparatus for assessing the reliability of the human operator of an ergatic system based on the Markov theory of random transient processes of states described by a polynomial system of differential equations for each human operation in the system, solved in the presence of experimental data, are proposed. The possibility of the designer's assessment of the final human operator probability of an ergatic system for one of the most important operations in the absence of statistical data by analogy with a "weak" link in a technical system is substantiated. The experimental research results by four age groups and their statistical processing are presented.

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

REFERENCES

1. *Spravochnik po nadezhnosti v 3-h tomah* pod red. B.R. Levina i B.E. Berdichevskogo, perevod s angl. M.: MIR. 1969. 1050 p.
2. *Shvecova V.I.* Ocenka nadezhno-sti cheloveka-operatora v jergaticeskikh sistemah kontrolja i zashhity ob'ektov okruzhajushhej sredy. *Sistemy kontrolja okruzhajushhej sredy*. 2020. Vol. 4 (42). pp. 127–132.
3. *Sevrikov A.I.* Formirovanie mnozhestva struktur jergaticeskikh si-stem kontrolja i zashhity vzryvopozha-roopasnyh ob'ektov pri proektirovanii. *Tehnologichni kompleksi: nauk. zhurnal. Luck*. 2013. No 1 (7). pp. 64–70.
4. *Prisnjakov V.F., Prisnjakov L.M.* Matematicheskoe modelirovanie pererabotki informacii operatorom cheloveko-mashinnyh sistem. M.: Mashinostroenie. 1990. 245 p.