

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА В ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ ПОВЫШЕННОЙ ОПАСНОСТИ

*В.И. Швецова, В.В. Севриков*

Севастопольский национальный  
технический университет  
г. Севастополь, ул. Гоголя, 14  
E-mail: peot2@mail.ru

*В статье предложен методологический подход и математический аппарат оценки надежности человека-оператора эргатической системы на основе теории марковских процессов, а также оценка финальной вероятности человека-оператора по одной наиболее ответственной операции.*

**Введение.** Наибольшая эффективность контроля вредных и опасных веществ достигается с помощью эргатических быстродействующих систем непрерывного действия, имеющие трехзвенную структуру: техника – человек – среда. Одним из основных базовых свойств эргатических систем является их надежность, включающая в себя две составляющие: надежность технической части и надежность человека-оператора, показателями которых служат, соответственно, вероятность безотказной работы техники и вероятность безотказных (безошибочных) действий человека.

Выявлено, что при разработке и проектировании эргатических систем структурная надежность их учитывается формально по аналогам подобных систем или источникам другого назначения, а эргатическая составляющая (оператор) надежности идеализируется, т.е. вероятность безотказности  $P_{ч0}$  принимается равной единицы, а это означает, что вообще не учитывается. Недооценка составляющей надежности человека-оператора в эргатических системах очевидно связана с отсутствием рабочих методик и даже методологии доступных проектировщикам и отсутствием необходимой статистической базы исходных данных по среднему времени безотказности действий, а значит и по интенсив-

ности отказов и восстановлений работоспособности. Устранение отмеченного пробела является актуальной задачей, требующей дальнейших масштабных исследований по эргономической надежности применительно к конкретным типам эргатических систем и условиям их применения.

**Анализ проблемы, постановка исследования.** Эргатические системы контроля и защиты объектов повышенной опасности относятся к сложным (большим) социально-техническим динамическим системам, находящимся в детерминированном и стохастическом состоянии в определенные временные периоды, и человек-оператор в них воспринимает сигналы и реакции как другие технические элементы. Для моделирования состояний технической части, человека-оператора и в целом системы допустимо применения теории марковских переходных процессов с математическим аппаратом в виде дифференциальных уравнений.

Выявлена тенденция в проводимых в настоящее время исследованиях по человеческой надежности системного анализа общей (результатирующей) надежности с построением графов переходов состояний по вероятностям отдельных действий оператора и отдельных элементов схемы эргатической системы или с использованием лингвистических исследуемых систем управления, например, в авиационной сфере. Однако, при этом неизвестен главный показатель – вероятность отдельных состояний и действий человека в согласии с техническими элементами. Все это пока остается недоступно, громоздким и сложным для проектировщиков эргатических систем.

Предлагается исследовать возможность применения математического аппарата Маркова и Колмагорова для описания надежности человека-оператора в эргатических системах контроля вредных веществ, принимая процессы и состояния переходов элементов динамической системы, используя синтез теории сложных технических систем с применением морфологического анализа.

Целью данной статьи является показать методологический подход и способ оценки надежности человека-оператора

в эргатических системах контроля вредных веществ повышенной опасности.

Следуя логике того, что элемент человек-оператор в эргатической системе рассматривается как технический элемент этой же системы, то модель случайных марковских процессов правомерно распространить на состояние человеческого процесса. При этом человек в своих действиях совершает ошибки (неправильные действия или частичное выполнение их), 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  $S_{ij}$  и вероятностями  $P_{ij}$  по схеме:

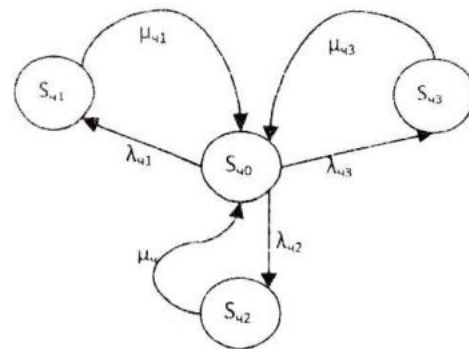
$$\begin{cases} S_{v0} \rightarrow P_{v0}, \\ S_{v1} \rightarrow P_{v1}, \\ S_{v2} \rightarrow P_{v2}, \\ S_{v3} \rightarrow P_{v3}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $S_{v0}$ ,  $P_{v0}$  – начальное работоспособное состояние человека;  $S_{v1}$ ,  $P_{v1}$  – состояние человека при отказе восприятия входного сигнала с интенсивностью  $\lambda_{v1}$  и восстановлением  $\mu_{v1}$ ;  $S_{v2}$ ,  $P_{v2}$  – тоже самое при принятии решения;  $S_{v3}$ ,  $P_{v3}$  – 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  $P_{ij}$  состояний  $S_{ij}$  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 (2):

$$\left. \begin{aligned} S_1 \left\{ \frac{dP_1}{d\tau} = -\mu_1 \cdot P_1 + \lambda_1 \cdot P_0 \right. \\ S_2 \left\{ \frac{dP_2}{d\tau} = -\mu_2 \cdot P_2 + \lambda_2 \cdot P_0 \right. \\ S_3 \left\{ \frac{dP_3}{d\tau} = -\mu_3 \cdot P_3 + \lambda_3 \cdot P_0 \right. \\ S_4 \left\{ \frac{dP_4}{d\tau} = -\mu_4 \cdot P_4 + \lambda_4 \cdot P_0 \right. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Для описания этой надежности принимаем марковский математический аппарат в виде системы дифференциальных уравнений (2) с построением графа состояний человека-оператора (рис. 1).



Р и с. 1. Граф состояний человека-оператора в эргатической системе контроля

Однако, решение системы марковских дифференциальных уравнений (2) затруднительно. Наиболее доступным из числа возможных решений является применения принципа Колмагорова – нормирования надежности по ее составляющим. В этом случае суммарная вероятность состояний технического процесса

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n = \sum_{i=1}^n P_i = 1. \quad (3)$$

Такой прием позволяет систему дифференциальных уравнений Колмагорова свести к системе простых алгебраических уравнений, которая решается обычным способом.

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



$$\begin{cases} P_{v0} \cdot (\lambda_{v1} + \lambda_{v2} + \lambda_{v3}) = P_{v1} \cdot \mu_{v1} + P_{v2} \cdot \mu_{v2} + P_{v3} \cdot \mu_{v3}, \\ P_{v1} \cdot \mu_{v1} = P_{v0} \cdot \lambda_{v1}, \\ P_{v2} \cdot \mu_{v2} = P_{v0} \cdot \lambda_{v2}, \\ P_{v3} \cdot \mu_{v3} = P_{v0} \cdot \lambda_{v3}. \end{cases} \quad (4)$$

С учетом (3) и  $\frac{dP_{v0}}{d\tau} = 0$ , систему (4) сводим к системе простых алгебраических уравнений следующего вида:

$$\begin{cases} P_{v0} \cdot (\lambda_{v1} + \lambda_{v2} + \lambda_{v3}) = P_{v1} \cdot \mu_{v1} + P_{v2} \cdot \mu_{v2} + P_{v3} \cdot \mu_{v3}, \\ P_{v1} \cdot \mu_{v1} = P_{v0} \cdot \lambda_{v1}, \\ P_{v2} \cdot \mu_{v2} = P_{v0} \cdot \lambda_{v2}, \\ P_{v3} \cdot \mu_{v3} = P_{v0} \cdot \lambda_{v3}. \end{cases} \quad (5)$$

Из (5) имеем:

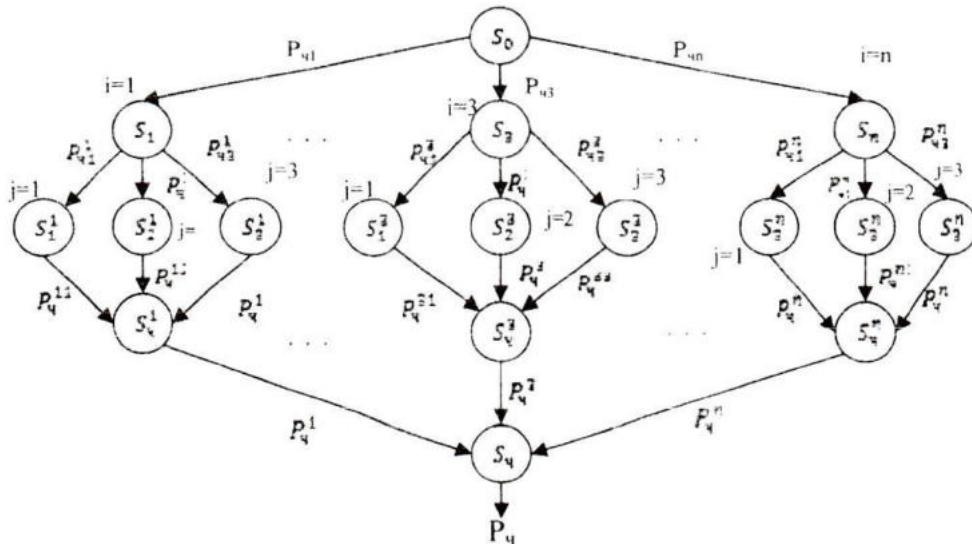
$$\begin{cases} P_{v1} = \frac{P_{v0} \cdot \lambda_{v1}}{\mu_{v1}}, \\ P_{v2} = \frac{P_{v0} \cdot \lambda_{v2}}{\mu_{v2}}, \\ P_{v3} = \frac{P_{v0} \cdot \lambda_{v3}}{\mu_{v3}}. \end{cases} \quad (6)$$

Решая систему алгебраических уравнений (6), получаем выражения вероятности безотказной работы человека, выполняющего единичную  $i$ -ю операцию в эргатической системе контроля вредных веществ, следующего вида

$$P_{v0}^i = \left(1 + \frac{\lambda_{v1}^i}{\mu_{v1}^i} + \frac{\lambda_{v2}^i}{\mu_{v2}^i} + \frac{\lambda_{v3}^i}{\mu_{v3}^i}\right)^{-1} = \left(1 + \sum_{j=1}^{n=3} \frac{\lambda_{vj}^i}{\mu_{vj}^i}\right)^{-1}. \quad (7)$$

Поскольку при функционировании эргатической системы человек-оператор выполняет несколько разнообразных действий (операций), и, в зависимости от особенностей системы и условий её применения, этих действий может быть большое количество, что осложняет оценку человеческой надежности, то ма-

тематическая модель должна соответствовать этому множеству. Для построения такой модели представим операционный граф состояний (рис. 2) человека в эргатической системе и примем в качестве базового выражения вероятности единичной операции (7).



Р и с. 2. Граф операционных состояний человека-оператора в эргатической системе контроля

Система алгебраических уравнений вероятностей безотказности действий человека по всем его действиям в эргатической системе имеет следующий вид:

$$\begin{cases} P_{\text{ч0}}^1 = \left(1 + \frac{\lambda_{\text{ч1}}^1}{\mu_{\text{ч1}}^1} + \frac{\lambda_{\text{ч2}}^1}{\mu_{\text{ч2}}^1} + \frac{\lambda_{\text{ч3}}^1}{\mu_{\text{ч3}}^1}\right)^{-1} \\ P_{\text{ч0}}^2 = \left(1 + \frac{\lambda_{\text{ч1}}^2}{\mu_{\text{ч1}}^2} + \frac{\lambda_{\text{ч2}}^2}{\mu_{\text{ч2}}^2} + \frac{\lambda_{\text{ч3}}^2}{\mu_{\text{ч3}}^2}\right)^{-1} \\ P_{\text{ч0}}^3 = \left(1 + \frac{\lambda_{\text{ч1}}^3}{\mu_{\text{ч1}}^3} + \frac{\lambda_{\text{ч2}}^3}{\mu_{\text{ч2}}^3} + \frac{\lambda_{\text{ч3}}^3}{\mu_{\text{ч3}}^3}\right)^{-1} \\ \dots \\ P_{\text{ч0}}^n = \left(1 + \frac{\lambda_{\text{ч1}}^n}{\mu_{\text{ч1}}^n} + \frac{\lambda_{\text{ч2}}^n}{\mu_{\text{ч2}}^n} + \frac{\lambda_{\text{ч3}}^n}{\mu_{\text{ч3}}^n}\right)^{-1} \end{cases} \quad (8)$$

Или в компактной форме система (8) имеет вид:

$$\begin{aligned} P_{\text{ч0}}^{j=1} &= \left(1 + \sum_{j=1}^{R=3} \frac{\lambda_{\text{ч}j}^1}{\mu_{\text{ч}j}^1}\right)^{-1}, \\ P_{\text{ч0}}^2 &= \left(1 + \sum_{j=1}^{R=3} \frac{\lambda_{\text{ч}j}^2}{\mu_{\text{ч}j}^2}\right)^{-1}, \\ P_{\text{ч0}}^3 &= \left(1 + \sum_{j=1}^{R=3} \frac{\lambda_{\text{ч}j}^3}{\mu_{\text{ч}j}^3}\right)^{-1}, \\ &\dots \\ P_{\text{ч0}}^{j=n} &= \left(1 + \sum_{j=1}^{R=3} \frac{\lambda_{\text{ч}j}^n}{\mu_{\text{ч}j}^n}\right)^{-1}. \end{aligned} \quad (9)$$

Исходя из принятого принципа, что прогнозирование расчетным способом структурной надежности действий человека в эргатической системе контроля и защиты объектов повышенной опасности, производится с ужесточением условий оценок путем обоснованных допущений: последовательности действий человека-оператора при выполнении каждой операции и последовательности выполнения всех операций в системе; независимости действий и операций друг от друга; общая вероятность безотказности действий человека в системе может быть получена перемножением вероятностных оценок для отдельных операций. В этом случае выражение вероятности безотказности работы человека-оператора в эргатической системе имеет вид:

$$P_{\text{ч0}} = P_{\text{ч0}}^1 \cdot P_{\text{ч0}}^2 \cdot P_{\text{ч0}}^3 \cdot \dots \cdot P_{\text{ч0}}^n = \prod_{i=1}^n P_{\text{ч0}i}, \quad (10)$$

где  $n$  – число отдельных операций человека в системе;  $P_{\text{ч0}i}$  – вероятность безотказности работы человека при выполнении одной операции.

Практическая реализация математических моделей (7–10) при проектировании эргатических систем контроля вредных веществ и защиты объектов повышенной опасности возможна только при наличии опытных (справочных) данных по интенсивностям отказов (ошибок)  $\lambda_{\text{ч}}$  и восстановлением  $\mu_{\text{ч}}$  (правильности повторных действий) человека-оператора в системе. Поскольку число операций может быть значительное, то решение задачи окажется весьма трудоемким без использования электронно-вычислительной машины.

К сожалению, до настоящего времени не имеются в достаточной мере данных оценок вероятностей ошибок работ, выполняемых человеком в различных эргатических системах, применяемых в разнообразных условиях. Это разнообразие настолько велико, что имеющиеся опытные данные по человеческой надежности (в основном зарубежных исследователей, например, [1]) не решают проблемы оценки надежности операторов при проектировании эргатических систем.

Наибольшее внимание к этой проблеме было проявлено в авиации, космонавтике, военном деле и специальной деятельности служб безопасности. В основном исследовались информационно-управляющие человеко-машинные системы; безопасность и эффективность функционирования систем человек – техника эргосетями; характеристики безопасности времени действий оператора в управлении; количественная оценка деятельности человека в системах человек-техника; вывод показателей качества человеко-машинных систем на основе функциональных сетей; инженерно-технологические качественные закономерности оператора в зависимости от темпа (времени) его работы и многое другое. Всему этому посвящено много работ, например [2–5]. В основе этих исследований лежат системные, морфологические, графо-аналитические



методы с описанием случайных процессов (переходов состояний) человека в эргатических системах.

В последнее время к исследованию деятельности человека-оператора информационно-управляющих человеко-машинных системах привлечены модели теории лингвистики [6, 7]. В подавляющем большинстве указанных и других работ за оценку эффективности надежности, безотказности функционирования человеко-машинных систем приняты вероятностные показатели, в т.ч. надежность человека в них характеризуется вероятностью безопасной работы или вероятностью ошибок его в системе. В последней публикации этого плана [5] проф. П. П. Чабоненко моделирование функционирования систем человек-техника и моделирование обучения операторов этих систем сопровождается разветвленной структурой графов состояний эргономических характеристик безошибочности защищенности, опасности, времени выполнения операций, описываемых аналитическими многоэлементными матрицами вероятностных показателей. Безусловно эти модели представляют теоретический интерес, но они не имеют практического выхода при проектировании и эксплуатации эргатических систем, т.к. принятые вероятности  $P$  в них не имеют количественных оценок и даже методов их получения. Следует только полагать, что эти структурные вероятности можно получить, как и в других случаях, опытным путем.

Решение задачи оценки надежности человека-оператора в эргатической системе 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 (8), (10) необходимы количественные оценки интенсивности отказов  $\lambda_{ч}$  и восстановлений  $\mu_{ч}$  работоспособности человека по каждой операции эргатической системы, которые можно получить опытным путем, из справочных данных или аналогов. Поскольку справочные данные и аналоги крайне ограничены, за исключением вероятности ошибок для работ, выполненных челове-

ком, полученных американским исследовательским институтом, связанных с вопросами контроля и использования индикаторов органов управления [1]. Для других условий остается реальным опытный путь по каждой операции и по каждому действию человека в операции. В этом случае программа эксперимента объемная и трудоемкая. Кроме того, психофизиологические действия человека по восприятию сигнала, осмыслению его и принятию решения трудно моделируются, и воспроизведение этого доступно только специалистам в областях эргономики, психологии и физиологии. Поэтому возникает необходимость в упрощении оценок надежности человека-оператора в эргатической системе.

Предлагается проектировщикам при проектировании эргатических систем контроля и защиты объектов повышенной опасности на основании своего опыта рассчитывать надежность человека-оператора по наиболее ответственной операции и по отклику (выходному действию человека) в достижении конечной цели, т.е. по принципу выявления «слабого» звена в технической системе. Это допустимо на основании того, что элемент человек-оператор рассматривается как другие технические элементы в эргатической системе, а также в связи с отсутствием необходимых статистических данных. При накоплении этих данных возможно использование с применением ЭВМ прогностической (расчетной) математической модели (8), (10).

Определение вероятностей в этих расчетных выражениях, как и в выражении «слабого» звена

$$P_{ч0} = P_i \rightarrow \min \geq P_H, \quad (11)$$

где  $P_H$  – нормативное значение, определяются по среднему опытному времени безошибочной работы (безотказному действию) человека  $\bar{T}_{ч}$  и среднему времени восстановления работоспособности (исправления ошибки)  $\bar{T}_{ч}$ . Соответственно, интенсивности безотказности  $\lambda_{ч} = \frac{1}{\bar{T}_{ч}}$  и восстановления  $\mu_{ч} = \frac{1}{\bar{T}_{ч}}$ .

Второй путь определения надежности работы человека через вероятность появления ошибок оператора в испытаниях [1, т. 3]. Вероятностная оценка ка-



чества работы оператора определяется отношением  $\frac{r}{n}$ , где  $r$  – число успешно выполненных заданий (действий), а  $n$  – общее число испытаний. Это отношение есть только статистическая оценка фактической (теоретической) вероятности  $P_T$ . Чтобы получить доверительный интервал для  $P_T$ , используя отношение  $\frac{r}{n}$  можно воспользоваться уравнением [1, т. 3]:

$$\sum_{i=1}^n p^i \cdot q^{n-i} = 1 - \alpha, \quad (12)$$

где  $\alpha$  – достоверность того, что истинная вероятность  $P_T$  находится в интервале от  $p$  до 1;  $p$  – нижняя граница  $P_T$ , т.е. истинной, но неизвестной надежности  $q = 1 - p$ . Более подробно используемые статистические методы изложены в [1, т. 1, гл. 4] и в [8].

Прибегая к оценке финальной вероятности безотказности человека-оператора в эргатической системе  $P_{\text{чo}}$  по выражению единичной операции и отклику (действию) человека (11), следует пояснить обоснование задания нормированной надежности  $P_n$ . В настоящее время не имеется сведений о нормировании надежности человека-оператора в эргатических системах, как и другого вида системах, хотя в этом есть настоятельная необходимость, в первую очередь, для объектов повышенной опасности и ценности. Очевидно, это связано с недостаточной изученностью человеческой надежности и трудностью ее оценки. Однако имеются в некоторых странах регламентированные индивидуальные риски фатального исхода людей, аварий и средств защиты, которые могли бы служить основанием нормативных оценок допустимых вероятностей операторов эргатических систем.

Для некоторых средств защиты нормативное значение риска составляет  $10^{-4} \dots 10^{-6}$ . Можно предположить, что эти значения принимаются ориентировочно от когда-то принятого допустимого риска гибели людей равного  $10^{-6}$ . Некоторые исследователи предлагают принимать риск равным  $10^{-5}$  и даже  $10^{-4}$  исходя из того, что фактический риск на два-три порядка выше приемлемого  $10^{-6}$ . Концепция приемлемого риска в нашей стране пока необоснованна, но в ряде других стран она принята в законодательном порядке, например в Голландии.

Ориентируясь на отмеченные нормативные риски объектов, средств защиты и систем управления, можно только утверждать, что риски (ошибки) человека-оператора в этих системах не могут быть ниже выше указанных. Это означает, что показатели надежности (прогностические риски, вероятности безошибочности) человека-оператора в эргатических системах контроля и защиты объектов повышенной опасности проектировщиками могут ориентироваться на требования нормативно-руководящих документов.

С учетом выше приведенных сведений, можно допустить возможность оценки проектировщиками финальной вероятности безотказности человека-оператора в эргатической системе контроля и защиты объекта повышенной опасности, в случае отсутствия статистических данных, по наиболее ответственной в достижении конечной цели единичной операции с наименьшей надежностью, по отношению к другим операциям, и по единичной характеристике оператора в виде выходного действия оператора, т.е. отклика. В этом случае

$$P_{\text{чo}} = P' \rightarrow \min \geq P_n \geq 1 - \alpha_n, \quad (13)$$

где  $\alpha_n$  – нормативная вероятность ошибки (риска) выходного действия (отклик) оператора.

Поиск наиболее ответственной единичной операции с наименьшей надежностью вполне доступен опытным проектировщикам по экспертным оценкам, а значение вероятности отклика по выбранной операции принимается по аналогу, справочнику, нормативно-руководящему документу, если и имеются таковые. В отсутствии источников вероятности человека-оператора определяется опытным путем.

В большинстве случаев ответственной операцией человека-оператора эргатической системы контроля и защиты объекта повышенной опасности является действие ручного включения устройства защиты 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. Поэтому надежность включения в работу устройств защиты оператором вручную является более низкой по отношению к включению этих устройств, например, посредством автоматического реле. Любая автоматизированная система контроля вредных веществ на химически опасных и взрывопожароопасных объектах, помимо контроля концентраций этих веществ при их предельных (критических), предаварийных значениях, выдает команду на включение защитных устройств в автоматическом режиме. Но на объектах повышенной опасности эта система обязательно должна иметь устройство (кнопку) ручного пуска на случай несрабатывания (отказа) автоматического пуска и даже при срабатывании автоматического пуска включается ручной пуск, чтобы наверняка была достигнута цель – предотвращение аварии. Причем надежность ручного включения существенно зависит от расстояния между оператором и устройством пуска средств защиты, а также от уровня обученности и опыта.

При определении вероятности ручного пуска устройств защиты  $P_j^r$  опытным путем регистрируется среднее время наработки на отказ  $\bar{T}_0$ , по которому определяется интенсивность отказов  $\lambda_{чj}^r = \frac{1}{\bar{T}_0}$ . По данным наблюдений при постоянстве  $\lambda_{чj}^r = const$  вычисляется вероятность безотказности человека-оператора в эргатической системе по экспоненциальному закону распределения:

$$P_{ч0} = P_j^r = e^{-\lambda_{чj}^r \tau} = e^{-\frac{1}{\bar{T}_0} \tau} \quad (14)$$

где  $\tau$  – время работы оператора.

**Заключение.** В настоящей статье предложен подход и математический аппарат оценки финальной 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 по интенсивностям отказов и восстановлений его работоспособности. Также обоснована возможность оценки проектировщиком финальной вероятности человека-оператора эргатической системы

по одной наиболее ответственной операции (для достижения конечной цели) при отсутствии статистических (опытных) данных по аналогии «слабого» звена в технической системе.

Перспективой дальнейших исследований является статистическая оценка фактической (теоретической) вероятности путем проведения эксперимента для определения надежности работы человека через вероятность появления ошибок оператора в испытаниях.

## 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. *Борисов А.Н.* Модели принятия решения на основе лингвистической переменной / А.Н. Борисов, А.В. Алексеев, Г.В. Меркурьев и др. – Рига: Зинатиз, 1981. – 300 с.
3. *Галактионов А.И.* Основы инженерно-психологического проектирования АСУТП / А.И. Галактионов. – М.: Энергия, 1978. – 208 с.
4. *Буров О.Ю.* Ергономічні основи розробки систем прогнозування працездатності людини-оператора на основі психофізіологічних моделей діяльності: автореферат дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук: спец. 05.01.04 «Ергономіка» / О.Ю. Буров. – Харків, 2007. – 208 с.
5. *Чабоненко П.П.* Исследование безопасности и эффективности функционирования систем человек-техника эргосетями / П.П. Чабоненко. – Севастополь: АВМС им. П.С. Нахимова, 2012. – 162 с.
6. *Васильев В.И.* Интеллектуальные системы управления с использованием нечеткой логики: Учебное пособие / В.И. Васильев, Б.Г.Ильясов. – Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 1995. – 80 с.
7. *Чабоненко П. П.* Построение модели теории лингвистической переменной на вероятностно-психологической основе / П. П. Чабоненко // Методы и системы принятия решений. – Рига: РПИ, 1981. – с. 76–89.
8. *Lloyd D.K.* Reliability: Management, Methods and Mathematics / D. Lloyd, M. Lipow. – NJ: Prentice Hall, 1962. – 277 p.