



Ахмеджанов Ф.М.
Akhmedzhanov F.M.

*кандидат технических наук,
доцент кафедры «Управление и сервис
в технических системах», ФГБОУ ВО
«Уфимский государственный нефтяной
технический университет»,
г. Уфа,
Российская Федерация*



Крымский В.Г.
Krymsky V.G.

*доктор технических наук,
профессор кафедры «Управление и сервис
в технических системах», ФГБОУ ВО
«Уфимский государственный нефтяной
технический университет»,
г. Уфа,
Российская Федерация*

УДК 519.873:007.5

DOI:

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ МЕТОДИКИ

Методика HEART (human error assessment and reduction technique) относится к числу наиболее простых и удобных инструментов для оценки надежности человека-оператора, действующего в составе сложных технологических систем. В то же время в традиционной версии эта методика обладает рядом недостатков. В частности, она не учитывает время до возникновения ошибки (т.е. время до отказа), а также требует задания фиксированных значений для номинальных вероятностей ошибок, связанных с человеческим фактором.

В статье предлагается новая модификация методики HEART, которая имеет целью преодолеть эти препятствия. Она основана на использовании аппарата интервальных вероятностей и привлечении экспертных суждений для того, чтобы сделать модель более адекватной реальным условиям.

Применение предложенного алгоритма иллюстрируется численными примерами.

Ключевые слова: надежность человека-оператора, методика HEART, интервальнозначные вероятности.

HEART ALGORITHM FOR ASSESSMENT OF HUMAN OPERATOR RELIABILITY BASED ON MODIFIED HEART METHODOLOGY

Abstract The methodology named HEART (human error assessment and reduction technique) is one of the simplest and most convenient tools for assessing the reliability of a human operator acting as a part of complex technological systems. At the same time, in the traditional version, this technique has several disadvantages. In particular, it does not take into account the time before the occurrence of the error (i.e. time to failure), and also requires the assignment of fixed values for the nominal error probabilities associated with the human factor.

The paper proposes the new modification of HEART methodology which aims at overcoming these obstacles. It is based on the use of the interval probabilities technique and the involvement of expert judgments in order to make the model more adequate to real conditions.

The application of the proposed algorithm is illustrated by numerical examples.

Key words: human reliability, HEART methodology, interval-valued probabilities

Введение

В число подходов к оцениванию влияния человеческого фактора на надежность сложных технологических систем, которые включены в перечень методов HRA (т.е. «Human Reliability Analysis», или «Анализ надежности человека») стандарта ГОСТ Р МЭК 62508-2014 «Менеджмент риска. Анализ влияния на надежность человеческого фактора», входит так называемый метод HEART. Эта аббревиатура расшифровывается как «human error assessment and reduction technique», или инструментарий для оценивания и сокращения количества человеческих ошибок. Указанный метод был впервые представлен в 1985 г. в публикации Дж. Виллиамса [1] и позднее, пройдя через некоторые корректировки, получил широкое распространение на практике. Метод предполагает выполнение ряда последовательных шагов [2]:

- 1) конкретизация анализируемой деятельности человека в составе сложной системы;
- 2) соотнесение задач, стоящих в процессе данной деятельности перед человеком, с позициями предлагаемого списка обобщенных задач и установлением номинальных вероятностей GEP человеческой ошибки (отказа) (табл. 1);
- 3) идентификация условий, приводящих к ошибке человека в процессе рассматриваемой деятельности (задание весовых коэффициентов $W(i)$, позволяющих учесть i -е соче-

тание этих условий, осуществляется с помощью выбора значения в соответствующей строке таблицы 2);

4) оценивание интенсивности проявления этих условий (оно находит отражение в «распределении» величин коэффициентов важности $R(i)$ между сочетаниями условий, что делается, как правило, экспертным путем);

5) вычисление окончательного значения вероятности ошибки человека-оператора согласно выражению

$$HEP = GEP \prod_{i=1}^n (R(i)(W(i)-1) + 1), \quad (1)$$

где n – общее число вариантов условий, приводящих к ошибкам при реализации человеком рассматриваемой деятельности;

$$\sum_{i=1}^n R(i) = 1. \quad (2)$$

В монографии [3] приводится наглядный пример, иллюстрирующий применение этой методики. Автор рассматривает действия оператора по замене в химико-технологической установке старого клапана из-за его отказа на новый. Сначала оператор выключает из функционирования линию, в которой произошел отказ клапана, затем ремонтник заменяет неисправный клапан новым. После этого линия начинает работать с замененным клапаном.

Таблица 1

Обозначение обобщенной задачи	Характеристика задачи	Номинальная вероятность ошибки GEP	Интервал между квантилями для уровней 5 % и 95 % применительно к логнормальному распределению
А	Полностью незнакомая задача, которую необходимо выполнять быстро и при отсутствии реального представления о последствиях	0,55	(0,35-0,97)

B	Перевод системы в новое состояние или восстановление ее оригинального состояния за одну попытку без руководства и инструкций	0,26	(0,14-0,42)
C	Сложная задача, требующая высокого уровня понимания и практических навыков	0,16	(0,12 – 0,28)
D	Достаточно простая задача, выполняемая быстро или требующая ограниченного внимания	0,09	(0,06 – 0,13)
E	Обычная, в высокой степени практическая задача, для которой необходим относительно низкий уровень квалификации	0,02	(0,07 - 0,045)
F	Восстановление либо перевод системы в оригинальное или новое состояние в соответствии с установленными процедурами и с некоторой проверкой	0,003	(0,0008 - 0,007)
G	Полностью знакомая, хорошо сформулированная, в высокой степени практическая задача, возникающая несколько раз в день и выполняемая согласно наилучшим из возможных стандартов высокомотивированным, хорошо обученным и опытным персоналом, при наличии времени для исправления потенциальной ошибки, но без значительной помощи в работе	0,0004	(0,00008 - 0,009)

Н	Правильное реагирование на системную команду, в том числе при наличии расширенной или автоматизированной системы контроля, обеспечивающей точную интерпретацию системного состояния	0,00002	(0,000006 - 0,00009)
М	Прочие задачи, для которых нельзя найти какое-либо описание	0,003	(0,008 - 0,11)

Таблица 2

	Условия, приводящие к возникновению ошибки	Вес $W(i)$
1	Неизвестная ситуация, потенциально важная, но случающаяся нечасто или впервые	17
2	Дефицит времени для определения и коррекции ошибки	11
3	Низкое отношение уровней сигнал – шум	10
4	Средства подавления или аннулирования информации либо ее аспектов, которые слишком легкодоступны	9
5	Отсутствие способов передачи пространственной или функциональной информации операторам в форме, которую они готовы воспринимать	8
6	Несоответствие между моделью предметной области оператора и представлением разработчика	8
7	Отсутствие очевидных способов отмены непреднамеренных действий	8
8	Перегрузка канала, в частности, вызванная одновременным представлением различной избыточной информации	6
9	Необходимость забыть привычную методику и применить другую, основанную на альтернативных подходах	6
10	Необходимость передавать определенные знания от задания к заданию без потерь	5,5
11	Неопределенность в нормах выработки, фигурирующих в требованиях	5
12	Несоответствие между воспринимаемым и реальным риском	4
13	Слабая, неопределенная или неструктурированная системная обратная связь	4
14	Нет ясных, прямых и своевременных подтверждений намеченных действий со стороны той части системы, по отношению к которой осуществляется управление	3
15	Неопытный оператор (например, только что получивший квалификацию, не «эксперт»)	3
16	Низкое качество информации, поступающей по итогам процедур и от человека человеку	3

17	Малая или не вполне независимая проверка (тестирование) результатов	3
18	Конфликт между тактическими и стратегическими целями	2,5
19	Нет разнообразия источников информации для проверки достоверности	2,5
20	Несоответствие уровня обучения персонала требованиям задания	2
21	Побуждение использовать другие, более опасные процедуры	2
22	Небольшие возможности для упражнений ума и тела за рамками непосредственного выполнения работы	1,8
23	Ненадежные измерительные приборы (достаточно подозрений по этому поводу)	1,6
24	Необходимость оценок, лежащих за пределами компетентности или опыта оператора	1,6
25	Неясное распределение функций и обязанностей	1,6
26	Отсутствие очевидных способов удерживать процесс в требуемых пределах	1,4
27	Опасность превышения предельных физических возможностей	1,4
28	Малый или несущественный смысл задания	1,4
29	Высокий уровень эмоционального стресса	1,3
30	Свидетельство нездоровья работника, особенно наличие лихорадки	1,2
31	Низкий уровень моральных побуждений к труду	1,2
32	Несогласованность того, как представляется процесс и его значимости	1,2
33	Плохая окружающая среда (качество ниже 75 % от того, которое требуется для отсутствия угрозы жизни или здоровью)	1,15
34	Длительное бездействие или часто повторяющиеся циклы задач, ориентированные на низкий уровень интеллектуальной загрузки	1,1 (для первого получаса работы) 1,05 (для остальных часов)
35	Недосыпание	1,1
36	Сбой рабочего ритма, вызванный вмешательством посторонних	1,06
37	Члены команды – недостающие или лишние	1,03 на каждого
38	Возраст персонала, выполняющего работу	1,02

Анализируется случай, когда оператор имеет опыт выполнения таких заданий, а ремонтник – нет. В результате через 10 минут после начала работы отремонтированной системы зафиксирована утечка, вызванная ошибкой в процессе установки нового клапана.

Замена контрольного клапана включает в себя пять шагов:

1. Проверить, выведена ли линия с клапаном для ремонта из эксплуатации.

2. Проверить и убедиться, что на линии, где находится требующий ремонта клапан, отсутствует давление.

3. Изолировать линии, ведущие к клапану.

4. Заменить неисправный клапан новым.

5. Ввести линию с новым клапаном в действие.

Применение методологии HEART начинается с того, что для каждого из этих пяти шагов необходимо подобрать соответствие ситуации позициям таблицы 1. Шаги 1, 2, 3 и

5 выполняются опытным оператором, следовательно, соответствуют ситуации, обозначенной Н, и номинальная вероятность человеческой ошибки будет равна 0,00002. Шаг 4 вследствие того, что ремонтник не обладает необходимым опытом, соответствует ситуации В, и для данного случая такая вероятность будет равна 0,26.

Шаги 1, 2, 3, 5 связаны только с одним условием из таблицы 2, которое способно вызвать ошибку, а именно: «дефицит времени для определения и коррекции ошибки». Оно характеризуется весом $W(i)$, равным 11. Так как условие единственное, то $R(i)$ при $i = 1$ равно единице.

Применение формулы (1) к этим данным даст следующий результат:

$$HEP=0,00002*(1*(11-1)+1)=0,00022.$$

Для перечисленных выше шагов в сумме HEP составляет $0,00022*4=0,00088$.

Для действия в рамках шага 4 можно указать два таких «опасных» условия:

– «неопытность оператора», вес которого равен 3, а интенсивность $R(i)$ проявления которого по данным экспертного оценивания составляет 0,7;

– «высокий уровень эмоционального стресса», вес которого равен 1,3, а интенсивность проявления равна $1 - 0,7 = 0,3$. Итоговая вероятность человеческой ошибки для шага 4 будет равна:

$$HEP=0,26*(0,7*(3-1)+1)*(0,3*(1,3-1)+1)=0,68016.$$

Результирующее значение вероятности ошибки человека-оператора, равное сумме вычисленных значений вероятностей для каждого шага, составляет 0,68104. Очевидно, что решающий вклад в это значение дает четвертый шаг, выполняемый неопытным ремонтником.

Следует отметить, что при полностью независимом задании величин GEP , $W(i)$ и $R(i)$ значение вероятности HEP может оказаться больше единицы. К этому выводу нетрудно прийти, наложив необходимое требование на правую часть выражения (1) в случае, если $n = 1$:

$$GEP (R(i) (W(i)-1)+1) \leq 1. \quad (3)$$

Отсюда

$$R(i) \leq (1/GEP-1)/(W(i)-1). \quad (4)$$

Тогда если $GEP = 0,12$ (ситуация С, табл. 1) и $W(i) = 11$ (строка 2 в табл. 2), то неравенство (4) приобретает вид:

$$R(i) \leq 0,733.$$

Но согласно (2) при $n = 1$ должно выполняться $R(i) = 1$, что сразу же приводит к получению вероятностей HEP , больших единицы.

Авторы методики не дают ответа, как поступать в подобных случаях. Очевидно, если вычисляемое значение вероятности оказывается больше единицы, то принимается $HEP=1$.

Из приведенного рассмотрения видны сильные стороны методологии HEART. К ним необходимо отнести «прозрачность» ее применения – практически любой набор действий можно «разобрать» на составляющие и увидеть, какой вклад вносит каждый исполняемый шаг в результирующее значение вероятности человеческой ошибки. Из такого анализа напрямую вытекают меры, которые необходимо предпринять для того, чтобы снизить значение этой вероятности до приемлемых величин.

Между тем, рассматриваемая методология имеет и ряд недостатков. В частности, они касаются выбора величины номинальной вероятности GEP человеческой ошибки и заключаются в следующем:

а) принимается, что такие вероятности для любых видов деятельности соответствуют определенному (логнормальному) закону распределения (табл. 1), что на практике сложно, а зачастую – невозможно обосновать;

б) в традиционной модели, вытекающей из методики HEART, совершенно игнорируется фактор времени; между тем ясно, что вероятности GEP меняются с течением времени t , т.е. $GEP = GEP(t)$.

Ниже предлагается новая версия алгоритма, реализующего методику HEART, при создании которой поставлена цель повышения адекватности модели реальным условиям деятельности человека-оператора и устранения перечисленных недостатков.

Новая модификация методики heart на базе моделей, относящихся к теории интервальнозначных вероятностей

Будем далее исходить из предпосылок, которые, на наш взгляд, в значительно большей степени характерны для практики, чем те, которые отражены в таблице 1, а именно:

1) номинальные вероятности GEP ошибок человека для обобщенных задач А, В, С, ..., Н рассматриваются как функции времени t ;

2) величины этих вероятностей не берутся в фиксированном виде из таблицы 1, а оцениваются по накопленной статистике либо называются экспертом, причем и в том, и в другом случае они соответствуют определенному интервалу времени $[0, t^*]$ (т.е. принимается, что известны значения $GEP(t^*)$);

3) вид закона распределения указанных вероятностей полагается неизвестным, что вытекает из реально имеющегося уровня неопределенности.

Определим номинальную вероятность $GEP(t_{fact})$ человеческой ошибки на интервале $[0, t_{fact}]$. Здесь t_{fact} – время, в течение которого человек фактически работает в рамках выбранной обобщенной задачи из списка А, В, С, ..., Н. Высокий уровень неопределенности приводит к тому, что значение $GEP(t_{fact})$ в данном случае оказывается возможным оценить только с точностью до содержащего его интервала с границами $\underline{GEP}(t^*)$, $\overline{GEP}(t^*)$:

$$\underline{GEP}(t_{fact}) \leq GEP(t_{fact}) \leq \overline{GEP}(t_{fact}). \quad (5)$$

При этом должны соблюдаться ограничения:

$$\int_0^{t^*} I_{[0, t^*]}(t) f(t) dt = GEP(t^*), \quad (6)$$

$$\int_0^{t^*} f(t) dt = 1, \quad (7)$$

где $f(t)$ – неизвестная плотность распределения времени до ошибки человека-оператора, T^* – максимальное время его работы в рамках выбранной обобщенной задачи, $I_{[0, t^*]}(t)$ – индикаторная функция, равная 1 при $t \leq t^*$ либо равная 0 в противном случае.

В свою очередь,

$$GEP(t_{fact}) = \int_0^{t^*} I_{[0, t_{fact}]}(t) f(t) dt. \quad (8)$$

Мы можем рассматривать (8) как оптимизируемый функционал, стремясь найти

$$\underline{GEP}(t_{fact}) = \inf_{f(t)} \int_0^{t^*} I_{[0, t_{fact}]}(t) f(t) dt,$$

$$\overline{GEP}(t_{fact}) = \sup_{f(t)} \int_0^{t^*} I_{[0, t_{fact}]}(t) f(t) dt$$

с учетом ограничений (6), (7).

Поставленная задача принадлежит классу задач определения так называемых «интервальных», или «неточных» («imprecise»), вероятностей, в отношении которых основополагающими работами принято считать монографии [4, 5].

Между тем, в работе [6] показано, что при ограничениях вида (6), (7) (изопериметрических, т.е. сформулированных применительно лишь к интегралам от выражений, включающих $f(t)$), решения этой оптимизационной задачи представляют собой линейные комбинации δ -функций. Подобные плотности распределения характеризуют сосредоточение «вероятностной массы» в дискретной совокупности точек, что не соответствует реальным процессам, для описания которых используются формируемые вероятностные модели.

Для преодоления вышеназванной трудности в постановку задачи целесообразно ввести также голономные ограничения, касающиеся выражений, которые зависят непосредственно от $f(t)$. Соответствующие подходы предложены и исследованы в публикациях [7-12]. В работе [13] показана эффективность применения для оценки надежности человека-оператора голономного ограничения вида

$$f(t) \leq K, \quad (10)$$

где K – заданное положительное число.

В данном случае воспользуемся идеей, описанной в работах [10, 11], и введем ограничения снизу ($\underline{\lambda}$) и сверху ($\overline{\lambda}$) на величину интенсивности отказов (ошибок) человека $\lambda(t)$:

$$\underline{\lambda} \leq \lambda(t) \leq \overline{\lambda}. \quad (11)$$

При этом значения $\underline{\lambda}$ и $\bar{\lambda}$ должны не противоречить неравенствам

$$1 - \exp(-\underline{\lambda}t^*) \leq GEP(t^*) \leq 1 - \exp(-\bar{\lambda}t^*). \quad (12)$$

Преимущества такого подхода заключаются в том, что:

а) ограничения на величину $\lambda(t)$, как правило, относительно несложно получить по результатам экспертного опроса либо из статистики, накопленной по аналогичным системам с участием человека;

б) как показано в [10, 11], при наличии в постановке оптимизационной задачи неравенств вида (11) возможно рассмотрение случая $T^* \rightarrow \infty$ (так называемый «бесконечный горизонт управления» [14]), что позволяет устранить необходимость эвристического задания величины T^* , которая обычно не известна.

Поставим целью определение $\underline{GEP}(t_{fact})$ и $\overline{GEP}(t_{fact})$ в предположении, что $t_{fact} > t^*$.

Такого рода задача решена в примере 1 статьи [12]. Воспользовавшись этим решением, можно записать, что

$$\underline{GEP}(t_{fact}) = 1 - (1 - GEP(t^*)) \exp(-\underline{\lambda}(t_{fact} - t^*)), \quad (13)$$

$$\overline{GEP}(t_{fact}) = 1 - (1 - GEP(t^*)) \exp(-\bar{\lambda}(t_{fact} - t^*)). \quad (14)$$

Покажем, как «работают» соотношения (12), (13) на численных данных. Пусть $t^* = 4$ часа, $t_{fact} = 8$ часов, $GEP(t^*) = 0,26$ (аналогично ситуации, характеризуемой обобщенной задачей В, табл. 1), $\underline{\lambda} = 0,06$ (1/час),

$\bar{\lambda} = 0,08$ (1/час). Тогда из (13), (14) находим

$$0,418 \leq GEP(t_{fact}) \leq 0,462.$$

Полученный интервал значений номинальной вероятности ошибки человека-оператора за время 8 часов отражает реальную неопределенность, в условиях которой осуществляется оценивание. Между тем для ответственных систем при планировании мер по предотвращению неблагоприятных событий целесообразно ориентироваться на наихудший случай, т.е. на величину верхней границы указанной вероятности.

Остановимся далее на случае $t_{fact} < t^*$. Как показано в работах [11, 12], в такого рода ситуациях функция $f(t) = f^*(t)$, на которой достигается максимум или минимум функционала (9) (т.е. экстремаль), является кусочно-непрерывной, причем на интервалах непрерывности она представляет собой экспоненту с параметром либо $\lambda = \bar{\lambda}$, либо $\lambda = \underline{\lambda}$.

При определении величины $\underline{GEP}(t_{fact})$ последовательность интервалов непрерывности функции $f^*(t)$ соответствует рисунку 1.

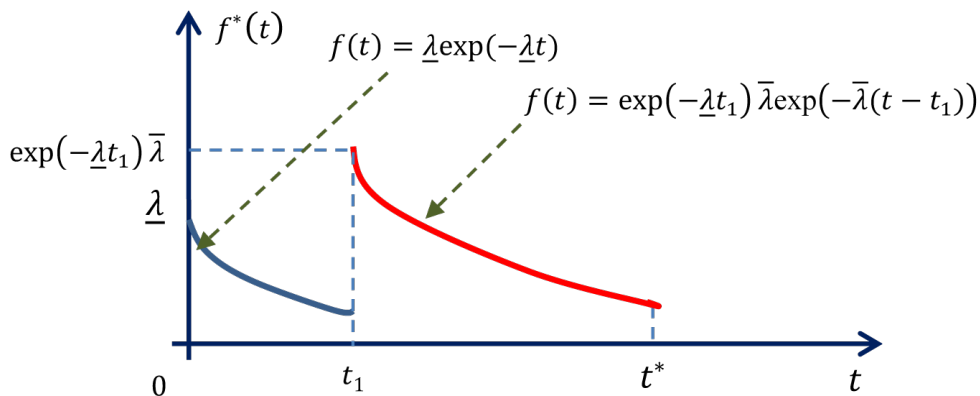


Рисунок 1. Экстремаль при поиске $\underline{GEP}(t_{fact})$

Момент времени t_1 переключения (рис. 1) можно найти из соотношения

$$\exp(-\underline{\lambda}t_1) \exp(-\bar{\lambda}(t^* - t_1)) = 1 - GEP(t^*), \quad (15)$$

или

$$t_1 = (\bar{\lambda}t^* + \ln(1 - GEP(t^*))) / (\bar{\lambda} - \underline{\lambda}). \quad (16)$$

Для заданных выше численных данных $t_1 = 0,945$. Таким образом, если $t_{fact} < t_1$, то

$$\underline{GEP}(t_{fact}) = 1 - \exp(-\underline{\lambda}t_{fact}), \quad (17)$$

а в противном случае

$$\underline{GEP}(t_{fact}) = 1 - \exp(-\underline{\lambda}t_1) \exp(-\bar{\lambda}(t_{fact} - t_1)). \quad (18)$$

Если, например, $t_{fact} = 2$ часа, то $\underline{GEP}(t_{fact}) = 0,132$.

Руководствуясь аналогичными соображениями и меняя при этом порядок следования интервалов непрерывности функции $f^*(t)$, находим верхнюю границу искомой вероятности ошибки для $t_{fact} = 2$ часа:

$$\overline{GEP}(t_{fact}) = 0,148.$$

Полученные таким образом величины нижней и верхней границы номинальной вероятности ошибки применительно к

$$\underline{HEP}(t_{fact}) = 0,132 * (0,7 * (3 - 1) + 1) * (0,3 * (1,3 - 1) + 1) = 0,34531,$$

$$\overline{HEP}(t_{fact}) = 0,148 * (0,7 * (3 - 1) + 1) * (0,3 * (1,3 - 1) + 1) = 0,38717.$$

Интервал между двумя найденными значениями вероятности ошибки характеризует реальную неопределенность в исходной информации при постановке задачи. Для планирования управленческих решений целесообразно ориентироваться на наихудший случай, т.е. на верхнюю границу этой вероятности.

Вывод

Данная публикация продолжает изложение результатов исследований авторов в области усовершенствования методик оценки вероятностей неблагоприятных событий, связанных с человеческим фактором как ком-

менту времени t_{fact} могут далее использоваться для расчета границ интервала результирующей вероятности $HEP(t_{fact})$ в соответствии с формулой (1). При этом

$$\underline{HEP}(t_{fact}) = \underline{GEP}(t_{fact}) \prod_{i=1}^n (R(i) (W(i) - 1) + 1), \quad (19)$$

$$\overline{HEP}(t_{fact}) = \overline{GEP}(t_{fact}) \prod_{i=1}^n (R(i) (W(i) - 1) + 1). \quad (20)$$

Так, если $t_{fact} = 2$ часа, $\underline{GEP}(t_{fact}) = 0,132$, $\overline{GEP}(t_{fact}) = 0,148$, (результат рассмотренного выше примера), и необходимо оценить вероятность $HEP(t_{fact})$ для действий ремонтника на шаге 4 общей процедуры замены клапана (пример предыдущего раздела данной статьи), то

понентом сложных технологических систем. В ней анализируется известная методика HEART, которая, как и рассмотренная в предыдущей статье [13] методика SPAR-N, базируется на достаточно большом количестве не вполне обоснованных допущений.

Авторы показывают, что здесь, в частности, можно избежать необходимости в целом ряде допущений, если применить методы, разработанные в рамках теории интервальнозначных вероятностей. При этом подход становится более адекватным реальным условиям, не теряя своей простоты и наглядности.

Список литературы

1. Williams J.C. HEART – a proposed method for achieving high reliability in process operation by means of human factors engineering technology / J.C. Williams // Proceedings of a Symposium on the Achievement of Reliability in Operating Plant, Safety and Reliability Society (Southport, NC, the USA). – Elsevier, 1985. – P. 87-109.
2. Williams J.C. A data-based method for assessing and reducing human error to improve operational performance // Proceedings of IEEE Fourth Conference on Human Factors in Power Plants (Monterey, CA, the USA). – IEEE Cat. No. 88CH2576-7. – 1988. – P. 436-450.

3. Calixto E. Gas and Oil Reliability Engineering: Modeling and Analysis / E. Calixto // Waltham (the USA): Gulf Professional Publishing, 2013. – 545 p.

4. Walley P. Statistical Reasoning with Imprecise Probabilities / P. Walley. – London: Chapman and Hall, 1991. – 719 p.

5. Кузнецов В.П. Интервальные статистические модели / В.П. Кузнецов. – М.: Советское радио. – 1991. – 352 с.

6. Utkin L.V. Kozine I.O. Different Faces of the Natural Extension // Proceedings of the 2nd International Symposium on Imprecise Probabilities and Their Applications. – Maastricht: Shaker Publ., 2001. – P. 316-323.

7. Krymsky V.G. Computing Interval Bounds for Statistical Characteristics Under Expert-Provided Bounds on Probability Density Functions // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2006. – Vol. 3732. — P. 151-160.

8. Kozine I.O. Krymsky V.G. Computing Interval-Valued Statistical Characteristics: What is the Stumbling Block for Reliability Applications? // *International Journal of General Systems*. – Vol. 38. – No. 5. – 2009. – P. 547-565.

9. Kozine I., Krymsky V.G. Bounded densities and their derivatives: extension to other domains // *Journal of Statistical Theory and Practice*. – Vol. 3. – No. 1. – 2009. – P. 25-38.

10. Kozine I., Krymsky V. An interval-valued reliability model with bounded failure rates // *International Journal of General Systems*. – Vol. 41. – No. 8. – 2012. – P. 760-773.

11. Krymsky V.G. Control Theory Based Uncertainty Model in Reliability Applications // *International Journal of Performability Engineering*. – Vol. 10. – No. 5. – 2014. – P. 477-486.

12. Kozine I. Krymsky V. Computing Interval-Valued Reliability Measures: Application of Optimal Control Methods // *International Journal of General Systems*. – Vol. 46. – No. 2. – 2017. – P. 144-157.

13. Ахмеджанов Ф.М., Крымский В.Г. Интервально-вероятностный алгоритм оценки человеческой надежности: новая модификация методики SPAR-H // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. – 2017. – Т. 13. - № 4. – С. 81-91.

14. Carlson D.A., Haurie A.B., Leizarowitz A. *Infinite Horizon Optimal Control: Deterministic and Stochastic Systems*. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1991. – 220 p.

References

1. Williams J.C. HEART – a proposed method for achieving high reliability in process operation by means of human factors engineering technology / J.C. Williams // *Proceedings of a Symposium on the Achievement of Reliability in Operating Plant, Safety and Reliability Society (Southport, NC, the USA)*. – Elsevier, 1985. – P. 87-109.

2. Williams J.C. A data-based method for assessing and reducing human error to improve operational performance // *Proceedings of IEEE Fourth Conference on Human Factors in Power Plants (Monterey, CA, the USA)*. –

IEEE Cat. No. 88CH2576-7. – 1988. – P. 436-450.

3. Calixto E. *Gas and Oil Reliability Engineering: Modeling and Analysis* / E. Calixto // Waltham (the USA): Gulf Professional Publishing, 2013. – 545 p.

4. Walley P. *Statistical Reasoning with Imprecise Probabilities* / P. Walley. – London: Chapman and Hall, 1991. – 719 p.

5. Kuznecov V.P. *Interval'nye statisticheskie modeli*. – M.: Sovetskoe radio. – 1991. – 352 p.

6. Utkin L.V. Kozine I.O. Different Faces of the Natural Extension // *Proceedings of the 2nd International Symposium on Imprecise Probabilities and Their Applications*. – Maastricht: Shaker Publ., 2001. – P. 316-323.

7. Krymsky V.G. Computing Interval Bounds for Statistical Characteristics Under Expert-Provided Bounds on Probability Density Functions // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2006. – Vol. 3732. — P. 151-160.

8. Kozine I.O. Krymsky V.G. Computing Interval-Valued Statistical Characteristics: What is the Stumbling Block for Reliability Applications? // *International Journal of General Systems*. – Vol. 38. – No. 5. – 2009. – P. 547-565.

9. Kozine I., Krymsky V.G. Bounded densities and their derivatives: extension to other domains // *Journal of Statistical Theory and Practice*. – Vol. 3. – No. 1. – 2009. – P. 25-38.

10. Kozine I., Krymsky V. An interval-valued reliability model with bounded failure rates // *International Journal of General Systems*. – Vol. 41. – No. 8. – 2012. – P. 760-773.

11. Krymsky V.G. Control Theory Based Uncertainty Model in Reliability Applications // *International Journal of Performability Engineering*. – Vol. 10. – No. 5. – 2014. – P. 477-486.

12. Kozine I. Krymsky V. Computing Interval-Valued Reliability Measures: Application of Optimal Control Methods // *International Journal of General Systems*. – Vol. 46. – No. 2. – 2017. – P. 144-157.

13. Ahmedzhanov F.M., Krymskij V.G. Interval'no-verojatnostnyj algoritm ocenki chelovecheskoj nadezhnosti: novaja modifikacija metodiki SPAR-H // *Elektrotehnicheskije i informacionnyje komplekсы i sistemy*. – 2017. – Т. 13. - № 4. – P. 81-91.

14. Carlson D.A., Haurie A.B., Leizarowitz A. *Infinite Horizon Optimal Control: Deterministic and Stochastic Systems*. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1991. – 220 p.