
УДК 62:331.101.1
ББК 30.17
Б 82

Боран-Кешишьян А.Л.

Кандидат технических наук, начальник кафедры судовождения Государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск, e-mail: keshishyan@mail.ru

Нечетко-возможностные модели надежности эргатических составляющих тренажерно-обучающих систем (Рецензирована)

Аннотация

Предложены нечетко-возможностные модели надежности эргатических составляющих тренажерно-обучающих систем. На основании предложенных моделей получен способ вычисления нечеткой вероятности безотказной работы тренажерных систем при условии, что время до отказа – нечеткая переменная.

Ключевые слова: *надежность тренажерной системы, нечетко-возможностные модели, эргатические составляющие, вычисление вероятности, нечеткая переменная, алгоритмы операторской деятельности, аппаратно-программные средства, учебно-тренировочные задачи, непрерывность процесса утомляемости обучающегося, функция плотности вероятности.*

Boran-Keshishyan A.L.

Candidate of Technical Sciences, Head of Navigation Department of Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, e-mail: keshishyan@mail.ru

Fuzzy possibilistic models for the ergatic component reliability of training systems

Abstract

This paper gives the fuzzy possibilistic models of ergatic component reliability of training simulation systems. On the basis of the proposed models, a method was developed for calculation of fuzzy probability of their non-failure operation provided the time until problem is fuzzy variable.

Keywords: *training simulation system reliability, fuzzy possibilistic models, ergatic components, calculation of probability, fuzzy variable, algorithms of operator's activity, hardware-software means, training objectives, continuity of fatiguability process, probability density function.*

В состав тренажерно-обучающих систем (ТОС), как правило, входят две составляющие в виде систем «человек-машина»: 1) система «руководитель обучения – аппаратно-программные средства автоматизированного рабочего места (АРМ)» и 2) системы «обучающийся – аппаратно-программные средства АРМ», которых может быть от одной до 15–25 в зависимости от конкретной ТОС. На каждом АРМ руководитель обучения и обучающиеся осуществляют наблюдение и контроль над ходом процесса практического обучения и выявляют ситуации, когда этот процесс нарушается. Если происходит отказ аппаратных средств или сбой в функционировании программного обеспечения (ПО), то руководитель обучения и обучающиеся на своих рабочих местах должны прервать процесс практического обучения для определения того, что необходимо сделать, чтобы ликвидировать возникший отказ или сбой. Для восстановления системы человек-оператор (руководитель обучения, обучающийся) вынужден затратить некоторое время для анализа возникновения отказа или сбоя, продолжительность которого во многом определяется его компетентностью. Однако компетенция человека-оператора является нечетким понятием, как и его опыт. Следовательно, поведение руководителя обучения и обучающихся в рамках ТОС является нечетким по своей природе [1–6].

Пусть при работе с ТОС руководитель обучения и обучающиеся выполняют в за-

данной последовательности некоторые функции, т.е. реализуют алгоритмы операторской деятельности (АОД) в некотором цикле, т.к. после выполнения n АОД происходит их повторение. Длительность периода обучения T может быть как постоянной (в сетке учебных занятий по расписанию), так и переменной (в ходе самоподготовки). При этом можно предположить, что надежность аппаратных и программных средств ТОС много выше, чем надежность операторов.

Ясно, что время решения учебно-тренировочных задач в рамках ТОС зависит от физических и психологических особенностей (мотивации, уровня подготовленности, соматического здоровья и др.) обучающегося и должно рассматриваться как нечеткое. Кроме того, любой обучающийся в ходе практической подготовки в рамках ТОС может совершать ошибки, которые могут привести к состоянию отказа. При этом время до отказа также можно считать нечетким.

Пусть состояние системы «обучающийся – аппаратно-программные средства АРМ» с номером j является работоспособным состоянием и соответствует успешному выполнению j -ой, $j = \overline{1, n}$, учебно-тренировочной задачи (УТЗ). Пусть в ходе выполнения $(j+1)$ -ой УТЗ происходит отказ (сбой). Пусть, кроме того, ζ_i – нечеткое время до ошибки j -го обучающегося, а n_j – нечеткое время решения j -ой УТЗ. Тогда $f_j(t)$ и $h_j(t)$ – функции распределения возможностей нечетких переменных ζ_j и n_j соответственно.

Можно обозначить

$$H_j(t) = \sup_{x \geq t} h_j(x), \quad R_j(t) = \sup_{x \geq t} f_j(x), \quad Q_j(t) = \sup_{x < t} f_j(x),$$

а также

$$\Phi(t) = \min(R_1, h_1) \oplus \dots \oplus (R_n(t), h_n(t)),$$

где знак \oplus – сумма нечетких чисел,

$$\Psi_j(t) = \min(R_1, h_1) \oplus \dots \oplus \min(R_{j-1}, h_{j-1}) \oplus \min(f_j(t), H_j(t)),$$

$$\Psi(t) = \max_{j=1, n} \Psi_j(t),$$

где $a \oplus b(t) = \sup_{x \leq t} \min\{a(x), b(t-x)\}$.

Тогда функция распределения возможностей времени до отказа системы определяется как

$$f(t) = \lim_{m \rightarrow \infty} \max_{k=0, m} \left\{ \underbrace{\Phi(t) \oplus \dots \oplus \Phi(t)}_{k \text{ раз}} \oplus \Psi(t) \right\},$$

что можно представить в виде простейшего граничного уравнения

$$f(t) = \max \left\{ \sup_{x \leq t} \min\{\Phi(t-x), f(x)\} \Psi(t) \right\},$$

которое можно решить приближенным методом [7].

Возможность безотказной работы системы $R(t)$ и возможность отказа $Q(t)$ определяется как

$$R(t) = \sup_{u > t} f(u), \quad Q(t) = \sup_{u \leq t} f(u). \quad (1)$$

Ясно, что надежность системы «обучающийся – аппаратно-программные средства

АРМ» существенно зависит от длительности решения УТЗ в ходе практической подготовки. Нужно так распределить УТЗ на отведенное время, чтобы максимизировать надежность системы. Задачу оптимизации можно представить в виде

$$\left. \begin{array}{l} R(kT), \text{ а } \text{ñ} \text{è} R(T) < 1, \\ 1 - Q(kT), \text{ а } \text{ñ} \text{è} R(T) = 1, \end{array} \right\} \rightarrow \max, \quad (2)$$

где k – число циклов решения УТЗ при ограничениях $\tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n = T$, $l_j \leq \tau_j \leq r_j$, $j = \overline{1, n}$, где τ_j – время решения j -ой УТЗ.

Следует обозначить

$$\Omega(t) = R_1 \oplus \dots \oplus R_n(t), \quad \Theta(t) = Q_1' \oplus \dots \oplus Q_n'(t),$$

где $Q_i'(t) = 1 - Q_i(t)$.

Из (1) следует, что при $k = 1$

$$R(kT) = R(t), \quad Q(kT) = Q(T).$$

Тогда можно записать целевую функцию в виде

$$G = \sup_{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n} \min_{i=1, n} \{R_i(\tau_i) | \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n = T\}.$$

Пусть $R(t) < 1$, тогда G можно представить как сумму n нечетких чисел $G = R_1 \oplus \dots \oplus R_n(T)$ с функциями принадлежности $\mu_1(t), \dots, \mu_n(t)$. В соответствии с [8] данная сумма может быть определена через α -срезы. Поскольку все функции $\mu_i(t)$, $i = \overline{1, n}$, являются монотонными невозрастающими по аргументу t , поскольку при $R(T) < 1$ существует такой набор (t_1, t_2, \dots, t_n) , то для α -срезов справедливы равенства $\alpha = \Omega(T)$, $t_1 + \dots + t_n = T$, $\mu_1(t_1) = \dots = \mu_n(t_n) = \alpha$. Набор (t_1, \dots, t_n) является решением оптимизационной задачи, т.е. $\tau_i^* = t_i$, $i = \overline{1, n}$. Следовательно,

$$\tau_i^* = \mu_i^{-1}(\alpha) = \mu_i^{-1}(\Omega(T)).$$

Если $\Omega(T) = 1$, то возникает неопределенность, которую можно снять, используя функцию $Q(t)$. Тогда

$$1 - G = \sup_{\tau_1, \dots, \tau_n} \min_{i=1, n} \{1 - Q_i(\tau_i) | \tau_1 + \dots + \tau_n = T\} = Q_1' \circ \dots \circ Q_n'(T).$$

Аналогично можно получить $\tau_i^* = Q_i^{-1}(\Theta(t))$.

Тогда оптимальное решение имеет вид:

$$\tau_i^* = \begin{cases} R_i^{-1}(\Omega(T)), & \text{а } \text{ñ} \text{è} \Omega(T) < 1, \\ Q_i^{-1}(\Theta(T)), & \text{а } \text{ñ} \text{è} \Omega(T) = 1. \end{cases}$$

Необходимо подчеркнуть, что функция $Q'(t) = 1 - Q(t)$ может рассматриваться как необходимость безотказной работы системы до момента времени t .

Естественно, что в процессе решения УТЗ у обучающихся, работающих на АРМ ТОС, наблюдается усталость, утомление и повышение возможности ошибок, т.е. снижение функциональной надежности. При этом время до отказа снижается, что вызывает изменение функции распределения возможностей $f_j(x)$ в процессе выполнения цик-

лов решения УТЗ. Т.к. время до отказа уменьшается с увеличением j , то можно записать $\zeta_{j+kn} \leq \zeta_{j+mn}$, если $k \leq m$. Необходимо ввести функцию $\zeta_{j+kn} = \varphi(k, \zeta_j)$, характеризующую снижение надежности обучающегося, работающего на АРМ ТОС, с ростом числа выполненных циклов решения УТЗ k . Предполагается, что функция $\varphi(k, \zeta_j)$ является монотонной и непрерывной, что соответствует непрерывности процесса утомляемости обучающегося. Тогда

$$f_{j+kn}(x) = f_j(z), \quad x = \varphi(k, z), \quad j = \overline{1, n}.$$

Пусть $t \in \left[\sum_{i=1}^{j-1} \tau_i, \sum_{i=1}^j \tau_i \right]$, $\tau_i = t - \sum_{i=1}^{j-1} \tau_i$. Тогда при $j < n$ можно записать для вероятности безотказной работы обучающегося

$$R(t) = \min\{R_1(\tau_1), R_2(\tau_2), \dots, R_j(\tau_j)\},$$

а если $j \geq n$, то

$$R(t) = \min\{R_{1+mn}(\tau_1), \dots, R_{n+mn}(\tau_n), R_{1+kn}(\tau_1), \dots, R_{j+kn}(\tau_j)\}. \quad (3)$$

Если функция $\varphi(k, \zeta_j)$ убывающая, то для любого $i \in \{1, \dots, n\}$ верно неравенство

$$R_{j+kn}(\tau_i) \geq R_{j+mn}(\tau_i) \quad \text{при } k \leq m.$$

Кроме того, $R_{j+kn}(\tau_i) <> R_{j+(k-1)n}(\tau_j)$, тогда выражение (3) можно представить как $R(t) = \min\{R_{1+kn}(\tau_1), \dots, R_{(j-1)+kn}(\tau_{j-1})\} \min\{R_{j+kn}(\tau_j), R_{j+(k-1)n}(\tau_j), R_{j+1+(k-1)n}(\tau_{j+1}), \dots, R_{n+(k-1)n}(\tau_n)\}$.

Так как для любого $i \in \{1, \dots, n\}$ верно неравенство $Q_{j+kn}(\tau_i) \leq Q_{j+mn}(\tau_i)$ при $k \leq m$, то выражение для вероятности отказа может быть получено аналогично

$$Q(t) = \max\{Q_{1+kn}(\tau_1), \dots, Q_{(j-1)+kn}(\tau_{j-1})\} \max\{Q_{j+kn}(\tau_j), Q_{j+(k-1)n}(\tau_j), Q_{j+1+(k-1)n}(\tau_{j+1}), \dots, Q_{n+(k-1)n}(\tau_n)\}.$$

Если $t = kT$, то окончательно

$$R(t) = \min\{R_{1+kn}(\tau_1), R_{2+kn}(\tau_2), \dots, R_{(k+1)n}(\tau_n)\},$$

$$Q(t) = \max\{Q_{1+kn}(\tau_1), Q_{2+kn}(\tau_2), \dots, Q_{(k+1)n}(\tau_n)\}.$$

Таким образом, получена оптимизационная задача, которая аналогична задаче (2), но с отличием, когда в качестве целевой функции следует рассматривать функции вида $F_{j+kn}(\tau_j)$ и $Q_{j+kn}(\tau_j)$ вместо $F_j(\tau_j)$ и $Q_j(\tau_j)$, $j = \overline{1, n}$.

Установлено, что если нечеткие переменные рассматривать как случайные функции распределения возможностей (ФРВ), которые являются нечеткими переменными, то в этом случае результатом анализа надежности ПО (технических средств) являются нечеткие вероятности его состояния. Эти вероятности – результат комбинации мер вероятности и возможности. Для этого нечеткая переменная должна рассматриваться как случайная переменная, функция плотности вероятности (ФПВ) которой тоже нечеткая. При этом нечеткая переменная считается вырожденной с плотностью распределения в виде стандартной импульсной функции нечеткой переменной с соответствующей ФРВоз. Это и задает вероятностно-возможностное представление нечеткой переменной.

На этой основе предложен способ вычисления нечеткой вероятности безотказной работы при условии, что время до отказа – нечеткая переменная с соответствующей ФРВоз, которая может рассматриваться как функция принадлежности нечеткого времени до отказа. Аналогично может быть вычислена нечеткая вероятность отказа.

Примечания:

1. Губинский А.Н., Евграфов В.Г. Эргономическое проектирование судовых систем управления. Л.: Судостроение, 1977. 224 с.
2. Рыльский Г.И. Анализ и оптимизация систем управления пилотируемых летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1981. 200 с.
3. Зараковский Г.М. Психологический анализ деятельности. М.: Наука, 1966. 150 с.
4. Ломов Б.Ф. Человек и техника. М.: Сов. радио, 1966. 265 с.
5. Попович П.Ф., Губинский А.И., Колесников Г.М. Эргономическое обеспечение деятельности космонавтов. М.: Машиностроение, 1985. 272 с.
6. Информационно-управляющие человеко-машинные системы: исследование, проектирование, испытания: справочник / под общ. ред. А.И. Губинского, В.Г. Ефграфова. М.: Машиностроение, 1993. 528 с.
7. Рябинин И.А., Черкасов Ю.Н. Логико-вероятностные методы анализа надежности структурно-сложных систем. М.: Радио и связь, 1980. 275 с.
8. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей: Приложения к представлению знаний в информатике: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1990. 288 с.

References:

1. Gubinskiy A.N., Evgrafov V.G. Ergonomic design of ship control systems. L.: Sudostroenie, 1977. 224 pp.
2. Rylskiy G.I. Analysis and optimization of control systems of piloted aircrafts. M.: Mashinostroenie, 1981. 200 pp.
3. Zarakovskiy G.M. Psychological analysis of activity. M.: Nauka, 1966. 150 pp.
4. Lomov B.F. Person and equipment. M.: Sov. radio, 1966. 265 pp.
5. Popovich P.F., Gubinskiy A.I., Kolesnikov G.M. Ergonomic ensuring of astronauts' activity. M.: Mashinostroenie, 1985. 272 pp.
6. Information control human-machine systems: research, design, tests: a directory / ed. by A.I. Gubinskiy, V.G. Efgrafov. M.: Mashinostroenie, 1993. 528 pp.
7. Ryabinin I.A., Tcherkasov Yu.N. Logic probabilistic methods of the analysis of reliability of structural and complex systems. M.: Radio and communications, 1980. 275 pp.
8. Dubois D., Prad A. Possibility theory: Appendices to representation of knowledge in informatics: transl. from English. M.: Radio and communications, 1990. 288 pp.