

УДК 629.7.07

В.А. ШУЛЬГІН

Кіровоградська льотна академія Національного авіаційного університету, Україна

### НЕЧІТКА ЕНТРОПІЯ ЯК МІРА РОЗПІЗНАВАННЯ ПІЛОТАМИ ОЦІНОК ТОЧНОСТІ ПІЛОТУВАННЯ

Враховуючи можливість суттєвого позитивного впливу висококласного пілота на надійність системи «екіпаж – повітряне судно – середовище», перманентно актуальним є питання ефективності професійної підготовки членів льотного екіпажу. При цьому ступінь обґрунтованості рішення про відповідність кваліфікації пілота складності польотного завдання, що йому доручається, визначається надійністю використовуваних критеріїв оцінки рівня професійної підготовки та видачі сертифікатів, серед яких провідне місце займають нормативи точності пілотування. Узагальнені нечіткі моделі точності пілотування уявляють собою сімейство функцій належності відповідної лінгвістичної змінної, яка має 7-мирангову розмірність. Розв'язуючи проблему виявлення ступеня розрізнення відповідних оцінок як інструкторами, так і випробуваними пілотами, уперше введена і обчислена нечітка ентропія як спеціальна міра такого розрізнення. Встановлено, що найбільш помітними є найкраща і найгірша оцінка, що розглядається як мотивація на їх досягнення / запобігання.

**Ключові слова:** безпека польотів, людський чинник, рівень професійної підготовки пілотів, точність пілотування, ефективність шкали оцінювання, нечітка ентропія.

#### Актуальність досліджень

На теперішній час загально визнано, з одного боку, що пілот як «оператор переднього краю» є найбільш слабкою ланкою складної полієргатичної цілеспрямованої системи керування «пілот (льотний екіпаж в цілому) – повітряне судно (ПС) – орган обслуговування повітряного руху (ОПР) – середовище». Ось чому людський чинник (ЛЧ) впродовж десятиліть складає абсолютну більшість причин авіаційних пригод (АП). Тільки по даних статистики Міждержавного Авіаційного Комітету (МАК) в СНД саме «відхилення в діях авіаційного персоналу» приводять більш ніж у 80% випадків до АП. З іншого боку, висококласний пілот, який має льотну майстерність на найвищому рівні операторської діяльності - так званого «синхронного генератора» [1], може суттєво збільшити надійність зазначеної ергатичної системи, активно втручаючись в додання наслідків відмов її технічної частини [2, 3]. І саме тому ІКАО здійснила вже одинадцяте (!) видання Додатку 1 до Конвенції [4], в якому проведена подальша деталізація вимог до рівнів професійної підготовки (ПП) і критеріїв сертифікації авіаційного персоналу.

Виходячи з наведеного проблему вдосконалення процедур ПП і сертифікації льотного персоналу слід вважати перманентно актуальною, оскільки недостатня (низька) професійна готовність пілота до льотної експлуатації ПС, тим більше в особливих випадках польоту (ОВП) включає [5]:

- слабкі теоретичні знання, у т.ч. дій в ОВП;

- недостатню сформованість професійних навичок і вмінь, у т.ч. при діях в ОВП;
- невідповідність рівня ПП рівню складності польотного завдання.

#### 1. Аналіз досліджень і публікацій

Таким чином, зрозуміло, що ступінь обґрунтованості рішення про відповідність кваліфікації пілота складності польотного завдання, що йому доручається як в період початкового навчання чи переучування з одного типу ПС на інший, так і в період виконання професійних обов'язків, визначається надійністю використовуваних критеріїв оцінки рівня ПП та видачі сертифікатів, серед яких провідне місце займають нормативи точності пілотування (ТП).

Відомі різноманітні підходи до оцінювання ТП, які останнім часом найбільш повно і всебічно були розглянуті і узагальнені в праці [6]. Однак, уперше в практиці ПП і сертифікації пілотів відповідні нормативи були визначені з нечітких моделей ТП, котрі склали сімейство функцій належності (ФН) лінгвістичної змінної (ЛЗ) «ТП» літака Ан-24/26 [6], яка має 7-мирангову розмірність (рис. 1):

$$T^M(ТП) = \begin{matrix} \tilde{R}_{НВ} & & \tilde{R}_{ДВ} \\ \tilde{R}_{В} & & \tilde{R}_{С} \\ \tilde{R}_{Н} & & \tilde{R}_{ДН} & & \tilde{R}_{НН} \end{matrix} \begin{matrix} \text{незвичайно висока} \\ \text{висока} \\ \text{низька} \end{matrix} + \begin{matrix} \text{дуже висока} \\ \text{середня} \\ \text{дуже низька} \end{matrix} + \begin{matrix} \text{незвичайно низька} \end{matrix} \quad (1)$$

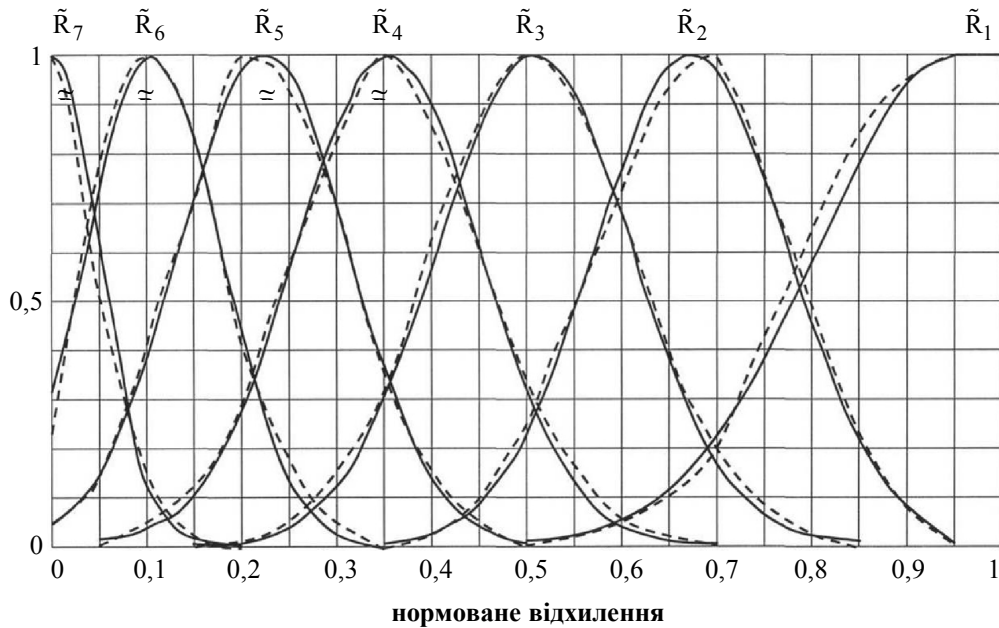


Рис. 1. Агреговані функції належності лінгвістичної змінної «точність пілотування»:  
 - - - - - – емпіричні; ————— – аналітичні

де « + » – позначка логічного поєднання окремих термів у шкалу.

В праці [6], спираючись на основні положення теорії якості і теорії вимірювань, результати відповідних досліджень, а також рекомендації ІКАО, було доведено переваги шкали оцінювання ТП саме такої розмірності, серед яких слід особливо вказати на можливість:

- *по-перше*, виявлення специфіки і закономірностей формування навичок пілотування і,
- *по-друге*, вивчення мотивації пілотів на ПП і льотну діяльність.

Зазначимо, що ефективність будь-якої шкали вимірювань визначається, насамперед, ступенем розрізненості її показників в уяві користувачів, в нашому випадку йдеться про інструкторський склад та випробуваних пілотів. І оскільки нормативи ТП визначалися нами з нечітких моделей, то було б логічно застосувати з зазначеною метою методологію саме нечітких множин і ЛЗ.

З аналізу наукових джерел [7 – 12 та ін.] витікає різноманіття відповідних нечітких мір. Однак, вважаємо доцільним орієнтуватися саме на нечітку ентропію, оскільки її вимірність для оцінки ефективності шкали відповідності тактико-технічних характеристик тренажера і літака початкового навчання уперше була переконливо доведена у праці [13].

## 2. Постановка завдання досліджень

Виходячи з проведеного аналізу, метою цієї статті є визначення нечіткої ентропії оцінок прийня-

тої шкали «ТП» як міри їх розрізнення / нерозрізнення інструкторським та льотним персоналом під час ПП чи професійної діяльності.

## 3. Визначення нечіткої ентропії оцінок шкали «точність пілотування»

Як відомо, ентропія системи вимірює ступінь безладу компонентів системи щодо імовірності стану [7, 8, 14]. Розглянемо  $N$  станів  $E_1, E_2, \dots, E_N$  системи з якими зв'язані імовірності  $p_1, p_2, \dots, p_N$ . Тоді ентропія системи визначається виразом:

$$H(p_1, p_2, \dots, p_N) = - \sum_{i=1}^N p_i \ln p_i. \quad (2)$$

Нескладно довести, що:

- 1)  $H = 0$ , тобто ентропія мінімальна, якщо

$$\forall \left\{ \begin{array}{l} p_r = 1, \\ r \in \{1, 2, \dots, N\} \\ i \neq r \end{array} \right\} : p_i = 0; \quad (3)$$

- 2)  $H = 1$ , тобто ентропія максимальна, якщо

$$p_1 = p_2 = \dots = p_N = \frac{1}{N}. \quad (4)$$

Якщо ми скористаємося формулою

$$H(p_1, p_2, \dots, p_N) = - \frac{1}{\ln N} \sum_{i=1}^N p_i \ln p_i, \quad (5)$$

то ентропія буде змінюватися в нормованому інтервалі  $[0, 1]$ , тобто:

$$H_{\min} = 0, \quad H_{\max} = 1. \quad (6)$$

Розглянемо, спираючись на [7], як застосувати ці поняття для оцінки нечіткості деякої підмножини.

Отже, якщо маємо нечітку підмножину, то спираючись на значення ФН, можна ввести такий показник:

$$\pi_{\tilde{R}_j}(x_i) = \mu_{\tilde{R}_j}(x_i) / \sum_{i=1}^{N_j} \mu_{\tilde{R}_j}(x_i), \quad (7)$$

де  $\mu_{\tilde{R}_j}(x_i)$  – значення ФН j-ої оцінки ЛЗ «ТП» (1), що отримане для i-го інтервалу;

$N_j$  – кількість значень ФН j-ої оцінки ЛЗ «ТП», що були отримані в процесі досліджень.

Тоді загальну формулу, яка дозволяє обчислити ентропію по нечіткості розрізнення кожної оцінки ТП, можна подати у такому вигляді:

$$H(\pi_{\tilde{R}_j}(x_1), \pi_{\tilde{R}_j}(x_2), \dots, \pi_{\tilde{R}_j}(x_{N_j})) = -\frac{1}{\ln N_j} \sum_{i=1}^{N_j} \pi_{\tilde{R}_j}(x_i) \cdot \ln \pi_{\tilde{R}_j}(x_i) = \frac{1}{\ln N_j \sum_{i=1}^{N_j} \mu_{\tilde{R}_j}(x_i)} \times (8) \times \left[ \left( \sum_{i=1}^{N_j} \mu_{\tilde{R}_j}(x_i) \right) \cdot \left( \ln \sum_{i=1}^{N_j} \mu_{\tilde{R}_j}(x_i) \right) - \right.$$

$$\left. - \sum_{i=1}^{N_j} \left( \mu_{\tilde{R}_j}(x_i) \cdot \ln \mu_{\tilde{R}_j}(x_i) \right) \right]$$

Як вже було зазначено вище, дослідження, що подаються у цій статті, проводилися на матеріалах, що були безпосередньо отримані автором і стосуються ТП літака Ан-24/26 [6].

Враховуючи формули (6), (7) для зручності подальших міркувань, подамо рис. 1 у вигляді матриці значень ФН (табл. 1).

Як витікає з табл. 1, ФН терма «НВ ТП» має чотири значення ( $N_{НВ} = 4$ ).

Тоді, користуючись формулою (7) та даними передостаннього рядка таблиці, нескладно провести такі обчислення:

$$\pi_{\tilde{R}_{НВ}}(x_1) = \frac{1}{1,69} = 0,59;$$

$$\pi_{\tilde{R}_{НВ}}(x_2) = \frac{0,52}{1,69} = 0,31;$$

$$\pi_{\tilde{R}_{НВ}}(x_3) = \frac{0,15}{1,69} = 0,09;$$

$$\pi_{\tilde{R}_{НВ}}(x_4) = \frac{0,02}{1,69} = 0,01.$$

Таблиця 1

Ентропія термів лінгвістичної змінної «точність пілотування»

$x_i$	Значення функцій належності $\mu_i$ термів						
	$\tilde{R}_{НВ}$	$\tilde{R}_{ДВ}$	$\tilde{R}_В$	$\tilde{R}_С$	$\tilde{R}_Н$	$\tilde{R}_{ДН}$	$\tilde{R}_{НН}$
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
1	1	0,23	0,04	0	0	0	0
2	0,52	0,77	0,15	0	0	0	0
3	0,15	1	0,4	0,05	0	0	0
4	0,02	0,84	0,69	0,11	0	0	0
5	0	0,42	1	0,28	0,01	0	0
6	0	0,17	0,93	0,58	0,05	0	0
7	0	0,05	0,7	0,81	0,16	0	0
8	0	0	0,37	1	0,31	0	0
9	0	0	0,15	0,85	0,63	0,03	0
10	0	0	0,05	0,61	0,87	0,11	0
11	0	0	0	0,35	1	0,26	0
12	0	0	0	0,16	0,92	0,48	0,01
13	0	0	0	0,06	0,69	0,73	0,05
14	0	0	0	0,02	0,39	0,95	0,1
15	0	0	0	0	0,2	1	0,2
16	0	0	0	0	0,08	0,76	0,43
17	0	0	0	0	0,04	0,49	0,65
18	0	0	0	0	0	0,23	0,85
19	0	0	0	0	0	0,08	0,95
20	0	0	0	0	0	0	1
<b><math>\Sigma</math></b>	<b>1,69</b>	<b>3,48</b>	<b>4,48</b>	<b>4,88</b>	<b>5,35</b>	<b>5,12</b>	<b>4,24</b>
$H(\tilde{R}_j)$	<b>0,68</b>	<b>0,86</b>	<b>0,86</b>	<b>0,85</b>	<b>0,83</b>	<b>0,87</b>	<b>0,82</b>

Далі, застосовуючи формулу (8), отримуємо таке значення нечіткої ентропії уявлення в свідомості досвідченіших пілотів-інструкторів, які були залучені до випробувань, ступеня (міри) розрізнення такої оцінки ТП, як «НВ»:

$$H(\pi_{\tilde{R}_{HB}}(x_1), \pi_{\tilde{R}_{HB}}(x_2), \pi_{\tilde{R}_{HB}}(x_3), \pi_{\tilde{R}_{HB}}(x_4)) = -\frac{1}{\ln N_{HB}} \sum_{j=1}^{N_{HB}=4} \pi_{\tilde{R}_{HB}}(x_j) \cdot \ln \pi_{\tilde{R}_{HB}}(x_j) = -\frac{1}{\ln 4} (0,59 \ln 0,59 + 0,31 \ln 0,31 + 0,09 \ln 0,09 + 0,01 \ln 0,01) = 0,68.$$

За аналогією обчислені та подані в останньому рядку табл. 1 значення нечіткої ентропії розрізнення й інших оцінок шкали оцінювання ТП (1).

Як можна побачити, найменшу ентропію (найбільшу міру розрізненості) мають найкраща та найгірша оцінки прийнятої шкали оцінювання ТП, що свідчить про прагнення-мотивацію випробуваних на їх досягнення / запобігання.

## Висновки

Узагальнюючи отримані та подані у цій статті нові наукові результати, вкажемо на такі найбільш суттєві положення. Враховуючи важливість проблеми виявлення ступеня розрізнення відповідних оцінок як інструкторами, так і випробуваними пілотами, уперше в практиці ПП льотного персоналу введена і обчислена нечітка ентропія як спеціальна міра такого розрізнення. Встановлено, що найбільш помітними є найкраща і найгірша оцінка, що може розглядатися як мотивація на їх досягнення / запобігання. Наведений результат був отриманий для узагальнених показників ТП, однак Керівництво з льотної експлуатації літака Ан-24/26, для якого саме й проводилися дослідження, визначає 35 елементів і параметрів польоту, для яких вводиться обмеження (норматив). Ось чому має інтерес подальше дослідження питання щодо ступеня розрізнення оцінок ТП по окремих елементах польоту. Тим більше, що з точки зору забезпечення безпеки польоту для деяких з них є неадекватними відхилення у бік збільшення / зменшення.

## Література

1. Рева, О.М. Проблеми формування у пілота навичок долавання наслідків відмов авіаційної техніки в режимі синхронного генератора [Текст] / О.М. Рева, С.О. Дмитрієв, О.М. Дмитрієв // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2009. – № 2(59). – С. 97-102.

2. Рева, А.Н. Человеческий фактор и безопасность полетов: (Проактивное исследование влияния) [Текст]: моногр. / А.Н. Рева, К.М. Тумьшев, А.А. Бекмухамбетов; науч. ред. А.Н. Рева. – Алматы, 2006. – 242 с.

3. Алдамжаров, К.Б. Роль человеческого фактора в гражданской авиации [Текст] / К.Б. Алдамжаров, С.А. Халдеев // *Актуальные вопросы психологии в области человеческого фактора: материалы 2-ой Междунар. науч.-практ. конф. - 20-22 марта 2008 г. / ГОУ ВПО Урал. гос. пед. ун-т; ГОУВПО Урал. ин-т гос. противопож. службы*. – Екатеринбург, 2008. – С. 44-46.

4. Выдача свидетельств авиационному персоналу [Текст]: Приложение 1 к Конвенции о международной гражданской авиации. – Монреаль: Канада, июль 2011. – 150 с.

5. Овчаров, В.Е. Человеческий фактор в авиационных происшествиях [Текст]: метод. материалы / В.Е. Овчаров. – М.: МАК, 2005. – 80 с.

6. Нечіткі моделі ергономічної кваліметриї точності пілотування [Текст]: моногр. / О.М. Рева, В.В. Камішин, В.А. Шульгін, С.В. Недбай; за ред. О.М. Реви. – Рівне: Овід, 2010. – 106 с.

7. Кофман, А. Введение в теорию нечетких множеств [Текст]: пер. с франц. В. Б. Кузьмина / А. Кофман; под ред. С.И. Травкина. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.

8. Нечеткие множества в задачах управления и искусственного интеллекта [Текст] / А.Н. Аверкин, И.З. Батыришин, А.Ф. Блишун, В.Б. Силов, В.Б. Тарасов; под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, 1986. – 312 с.

9. Нечеткие множества и теория возможностей [Текст]: последние достижения: пер. с англ. В. Б. Кузьмина; под ред. С. И. Травкина, Р. Р. Ягера. – М.: Сов. радио, 1986. – 408 с.

10. Ухоботов, В.И. Введение в теорию нечетких множеств и ее приложения [Текст]: учеб. пособие. / В.И. Ухоботов. – Челябинск: УрСЭИ АИ и СО, 2005. – 133 с.

11. Яхъяева, Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети [Текст]: учеб. пособие. / Г.Э. Яхъяева. – М.: Интернет-университет Информационных Технологий; БИНОМ, Лаборатория знаний, 2007. – 316 с.

12. Сявавко, М.С. Математика прихованих можливостей [Текст]: навч. посіб. / М.С. Сявавко. – Острог: Вид-во Нац. ун-ту «Острозька академія», 2011. – 396 с.

13. Рева А.Н. Эргономические основы первоначальной профессиональной подготовки пилотов [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.14 / Рева Алексей Николаевич; Киевский международный ун-т гражданской авиации. – К., 1996. – 376 с.

14. Шеридан, Т.Б. Системы человек-машина: Модели обработки информации, управления и принятия решений человеком-оператором [Текст]: пер.с англ. / Т.Б. Шеридан, У.Р. Феррел; под ред. К.В. Фролова. – М.: Машиностроение, 1980. – 400 с.

Поступила в редакцию 30.05.2013, рассмотрена на редколлегии 17.06.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри конструкції авіаційних двигунів С.В. Спіфанов, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "ХАІ", Харків.

## НЕЧЕТКАЯ ЭНТРОПИЯ КАК МЕРА РАСПОЗНАВАНИЯ ПИЛОТАМИ ОЦЕНОК ТОЧНОСТИ ПИЛОТИРОВАНИЯ

*В.А. Шульгин*

Учитывая возможность существенного позитивного влияния высококлассного пилота на надежность систем «экипаж – воздушное судно - среда», перманентно актуальным является вопрос эффективности профессиональной подготовки членов летного экипажа. При этом степень обоснованности решения о соответствии квалификации пилота сложности поручаемого ему полетного задания определяется надежностью используемых критериев оценки уровня профессиональной подготовки и выдачи сертификатов, среди которых ведущее место занимают нормативы точности пилотирования. Обобщенные нечеткие модели точности пилотирования представляют собой семейство функций принадлежности лингвистической переменной, которая имеет 7-миранговую размерность. Решая проблему выявления степени различия соответствующих оценок как инструкторами, так и испытуемыми пилотами, впервые введена и обчислена нечеткая энтропия как специальная мера такого различия. Установлено, что наиболее различимыми являются наилучшая и наихудшая оценки, что рассматриваются как мотивация на их достижение / избегание.

**Ключевые слова:** безопасность полетов, человеческий фактор, уровень профессиональной подготовки пилотов, точность пилотирования, эффективность шкалы оценивания, нечеткая энтропия.

## INDISTINCT ENTROPY AS A MEASURE OF PILOTING PRECISION APPRAISAL DISTINCTION, MADE BY PILOTS

*V.A. Shulgin*

Taking into account the possibility of considerable positive impact upon the “flight crew– aircraft environment” system reliability rendered by a highly skilled pilot, the efficiency of a flight crew member professional training remains permanently essential. Moreover, The degree of validity of decision, taken about a pilot’s qualification correspondence to the complexity of his flight mission is defined by the reliability of the criteria, used during professional qualification level appraisal and certificate issuing, among which the leading role is played by the standards of piloting precision. The generalized piloting precision indistinct models represent a group of functions of corresponding linguistic variable belonings, which have 7-degree measurements. Tackling the problem of defining the distinction degree among the corresponding appraisals, made by both the instructors and tested pilots, the indistinct entropy as a special measure of such a distinction has for the first time been introduced and calculated. It has been ascertained that the most prominent among the appraisals are the best and the worst ones, this fact is contemplated as motivation to strive for/to avoid them.

**Key words:** Safety of flights, human factors, professional qualification level of pilots, piloting precision, appraisal scale effectiveness, indistinct entropy.

**Шульгин Валерий Анатольевич** – канд. техн. наук, декан факультета летной эксплуатации Кировоградской летной академии Национального авиационного университета, e-mail: VAShulgin@ukr.net.