

С. Л. Волков<sup>1</sup>, к.т.н., К. С. Волков<sup>2</sup><sup>1</sup>Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса<sup>2</sup>Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, м. Одеса

## ФУНКЦІЯ І ШКАЛА ЕНТРОПІЙНОЇ ОЦІНКИ ЯКІСНОГО СТАНУ ДАТЧИКА

У статті запропоновано функцію і шкалу ентропійної оцінки якості поточного стану датчиків технічної системи, яка відповідає вимогам універсальності та максимальної незалежності від людського фактору. Доведено відповідність запропонованої функції вимогам до функцій оцінки якості. На відміну від існуючих психофізичних шкал, пропонується шкала ентропійної оцінки якості має динамічний діапазон оцінювання, тобто межі піддіапазонів будуть автоматично змінюватися в залежності від нормативно-технічних вимог до стану досліджуваного датчика. Запропонована шкала адаптується під конкретні вимоги, що дозволяє більш достовірно оцінити якісний стан досліджуваного об'єкта. Наведено результати моделювання якісного стану датчика. Можливим практичним застосуванням запропонованої функції і шкали є використання в системах моніторингу і діагностики, для визначення поточного якісного стану досліджуваної технічної системи.

**Ключові слова:** функція і шкала ентропійної оцінки, якість поточного стану датчиків, технічна система, динамічний діапазон оцінювання, моделювання якісного стану датчика.

DOI 10.32684/2412-5288-2018-1-12-12-17

**Вступ.** Кваліметрична оцінка якості досліджуваних об'єктів, тобто кількісне визначення показників якості, як правило, здійснюється на основі теорії нечіткої логіки із застосуванням психофізичних шкал. Основним недоліком такого підходу є суб'єктивний характер відношення експертом результатів функції вимірювання до прийнятої шкали якості. Найбільш відомою і застосованою для оцінки якості є функція і відповідна шкала бажаності Харрінгтона, яка була розроблена з метою оцінки контролю якості масової продукції.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На даний час функція Харрінгтона застосовується як універсальна від оцінки якості окремих товарів та послуг до оцінки якості технічних, економічних і соціальних систем, і це визиває деяку настороженість, оскільки функція і шкала були розроблені Харрінгтоном на базі емпіричних досліджень експертних висновків тільки для товарів масового виробництва і коректність їх застосування для інших об'єктів ніхто не довів [1–7].

**Завданням дослідження** є розробка функції і шкали оцінки якісного стану датчиків технічної системи, які задовольняють вимогам універсальності та максимальної незалежності від впливу людського фактору.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Визначимо основні вимоги до методу і функції оцінки якості стосовно технічних систем:

- універсальність, тобто можливість застосування для оцінки якості будь якої технічної

системи і її складової;

- максимальна незалежність від людського фактору, тобто суб'єктивного рішення експерта.

З метою визначення функції оцінки якості звернемося до [8], де були сформульовані принципи єдиного (універсального) підходу до ідентифікації поточного інформаційного стану кіберфізичної (технічної) системи заснованого на визначенні стану її сенсорної інфраструктури (СИ), та роботи [9] де було визначено, що будь-яку інформацію про об'єкт дослідження, суб'єкт отримує на основі даних про стан датчиків за результатами вимірювання.

Прийmemo за інформаційний стан довільного датчика СИ технічної системи (ТС) кількість власної інформації [10] його поточного стану отриманого в результаті вимірювання:

$$I(s_{meas}) = -\log p(s_{meas}), \quad (1)$$

де  $(s_{meas} \in S)$  – результат вимірювання,  $S$  – алфавіт станів датчика,  $p(s_{meas})$  – ймовірність прийняття датчиком стану  $(S \sim s_{meas})$ .

Для кожного експлуатаційного вимірювання, в залежності від стадії технологічного (технічного, програмного) процесу існує очікуваний (апріорний) стан датчика  $(S \sim s_{exp} | s_{exp} \in S)$  отриманий в результаті аналітичних розрахунків або шляхом моделювання відповідного процесу. Апріорна ймовірність такого стану для даного

вимірювання відповідає максимальному значенню  $(p(s_{exp}) \rightarrow \max | s_{exp} = M_0)$  прийнятого ймовірнісного розподілу, де  $M_0$  – мода розподілу. Кількість очікуваної власної інформації апіорного стану датчика:

$$I(s_{exp}) = -\log p(s_{exp}). \quad (2)$$

Відносне значення власної інформації стану датчика, у відповідності до (1, 2) може бути представлено виразом:

$$I_S^\Delta = \frac{I(s_{meas})}{I(s_{exp})} = \frac{\log p(s_{meas})}{\log p(s_{exp})}. \quad (3)$$

У відповідності до стандарту ISO 25021 [11], елементом показника якості (ЕПЯ) є показник, визначений у термінах властивості і методу вимірювання для кількісного визначення цієї властивості, а показник якості – це показник отриманий як функція вимірювання не менш ніж двох показників. Таким чином, прийнявши за один ЕПЯ результат вимірювання (кількість власної інформації поточного стану датчика)  $I(s_{meas})$ , а за другий кількість власної інформації очікуваного стану датчика  $I(s_{exp})$ , у відповідності до (3) визначимо простий показник якості (ППЯ) як функцію ЕПЯ, яка дорівнює зворотному значенню відносного значення власної інформації стану датчика:

$$SQM = \frac{1}{I_S^\Delta} = \frac{I(s_{exp})}{I(s_{meas})} = \frac{\log p(s_{exp})}{\log p(s_{meas})}. \quad (4)$$

Загалом функція оцінки якості повинна відповідати наступним вимогам: область значень  $0 \leq f_{quality} \leq 1$ , безперервність, монотонність, гладкість [2]. Розглянемо вираз (4) щодо відповідності зазначеним вимогам.

Оскільки очікуване значення повідомлення  $s_{exp}$  має максимальну ймовірність, його власна інформація буде мінімальною  $I(s_{exp}) \rightarrow \min | p(s_{exp}) \rightarrow \max$ , тобто  $I(s_{exp}) \leq I(s_{meas})$ , причому рівняння буде тільки у випадку, коли очікуване значення дорівнює вимірюваному ( $s_{exp} = s_{meas}$ ). Звідси маємо

$$\frac{1}{I_S^\Delta} = \frac{I(s_{exp})}{I(s_{meas})} \leq 1.$$

Розглянемо випадок, коли розподіл ймовірності випадкової величини ( $s \in S$ ) відноситься до абсолютно безперервних розподілів. В виразі (4) приймемо, що  $p(s_{exp}) \neq 1$ , а функція  $p(s_{meas})$  диференційована на всій множині визначення  $S = \{s_{min} : s_{max}\}$ , зростає на проміжку  $[s_{min} : s_{exp}]$ , спадає на проміжку  $[s_{exp} : s_{max}]$ , з чого слідує, що  $p'(s_{meas}) \geq 0$  на  $[s_{min} : s_{exp}]$  і  $p'(s_{meas}) \leq 0$  на  $[s_{exp} : s_{max}]$ . Якщо для деякого  $s_{meas}$ ,  $p(s_{meas}) = 0$ , то маємо

$$SQM(s_{meas}) = \lim_{p(s_{meas}) \rightarrow 0} \frac{\ln(p(s_{exp}))}{\ln(p(s_{meas}))} = \left[ \frac{const}{\infty} \right] = 0,$$

доповнюючи значення функції граничним значенням, що забезпечує неперервність функції у цій точці. В інших точках  $s_{meas} \in S$  функція неперервна як відношення неперервних, знаменник якого не дорівнює нулю ( $\ln(p(s_{meas})) \neq 0$ ) (знаменник і числівник неперервні як композиція неперервних). В усіх точках  $s_{meas} \in S | p(s_{meas}) \neq 0$  функція диференційована як відношення диференційованих, знаменник якого не дорівнює нулю (числівник і знаменник диференційовані як композиція диференційованих), а похідна функції

$$SQM'(s_{meas}) = \frac{-\ln(p(s_{exp}))}{\ln^2(p(s_{meas})) p(s_{meas})} p'(s_{meas}),$$

з чого слідує, що знак  $SQM'$  визначається знаком  $p'$ . Функція ймовірності, а значить і функція  $SQM$  може приймати значення нуль тільки в деякій околиці точок  $s_{min}$  та  $s_{max}$ , в усіх інших точках  $SQM$  диференційована, а значить її монотонність визначається монотонністю функції ймовірності. Тепер враховуючи, що  $SQM \geq 0$  остаточно маємо, що  $SQM$  зростає на  $[s_{min} : s_{exp}]$  та спадає на  $[s_{exp} : s_{max}]$ .

Розглянемо тепер випадок, коли розподіл ймовірності  $p(s)$  відноситься до дискретних розподілів випадкової величини  $s \in S = \{s_1, \dots, s_M, \dots, s_m\}$ , де  $s_M = M_0$  – мода роз-

поділу. Вважаємо, що 
$$\begin{cases} p(s_j) \leq p(s_{j+1}) | \forall j < M \\ p(s_{j-1}) \geq p(s_j) | \forall j > M \end{cases}$$

Застосовуючи Ермітову інтерполяцію задамо на  $[s_1 : s_m]$  поліном  $g(s)$  ступеня  $2m-1$  так, що  $g'(s_j) \geq 0 | \forall j < M$ ,  $g'(s_j) \leq 0 | \forall j > M$ ,  $g'(s_j) = 0 | j = M$ . Тоді функція  $g(s)$  в околицях точок дискретного розподілу  $p(s)$  буде поводитися як безперервна і до неї можна застосувати аналіз для безперервних розподілів з попереднього абзацу.

Таким чином, запропонована функція оцінки якості (4) задовольняє всім висунутим вище вимогам.

Кількісне значення ППЯ, отримане за виразом (4) не несе інформації про якісний стан об'єкта (датчика). Процес оцінки якості полягає в оцінці приналежності отриманого значення до деякої шкали оцінювання. Існує досить велика множина запропонованих шкал, однак всі вони відносяться до психофізичних і їх основний недолік це суб'єктивізм відображення «значення  $\rightarrow$  шкала» [1], [4].

Згідно зазначених вище вимог до методу і функції оцінки якості, пропонується шкала яка заснована на нормативно-технічних (проектних, конструкторських) вимогах щодо оцінюваного об'єкта (датчика). За основу побудови шкали взяті принципи технічного регулювання, визначення станів технічних об'єктів в стандартах та вимоги до шкали якості [4], [12–15].

Шкала ентропійної оцінки якості  $L^A$  (рис. 1), у відповідності до області значень функції ентропійної оцінки якості простого показника  $SQM$ , має діапазон  $0 \leq L^A \leq 1$  ( $SQM = 1$  відповідає максимальному, а  $SQM = 0$  – мінімальному значенню якості), який розбивається на три піддіапазони:

1. Справний стан (good state) – стан об'єкта, при якому він відповідає всім нормативно-технічним (проектним, конструкторським) вимогам.

2. Працездатний стан (up state) – стан об'єкта, при якому від здатен виконувати потрібну функцію (можливість експлуатації), але стійка робота і потрібна продуктивність не гарантується.

3. Непрацездатний стан (down state) – стан об'єкта, при якому він не здатний виконувати потрібну функцію.

Приналежність до піддіапазонів шкали визначається наступними виразами:

- Справний стан, якщо

$$SQM(s_{exp}, s_{meas}) \in [SQM(s_{exp}, x)],$$

де  $(s_{exp} - b \leq x \leq s_{exp} + a)$ ,  $(a, b)$  – допустиме максимальне і мінімальне відхилення від очікуваного значення, відповідно.

1	Справний стан $SQM(s_{exp}, s_{meas}) \in [SQM(s_{exp}, x)]$
	Працездатний стан $SQM(s_{exp}, s_{meas}) \in [SQM(s_{exp}, y)]$
	Непрацездатний стан $SQM(s_{exp}, s_{meas}) \notin \{[SQM(s_{exp}, x)] \cup [SQM(s_{exp}, y)]\}$
0	

Рисунок 1 – Шкала ентропійної оцінки якості простого показника

- Працездатний стан, якщо

$$SQM(s_{exp}, s_{meas}) \in [SQM(s_{exp}, y)],$$

де  $\begin{cases} s_{exp} + a < y \leq s_{exp} + a + c \\ s_{exp} - b - d \leq y < s_{exp} - b \end{cases}$ ,  $(c, d)$  – максима-

льне і мінімальне відхилення від допустимих значень відхилень  $(a, b)$ , відповідно.

- Непрацездатний стан

$$SQM(s_{exp}, s_{meas}) \notin \{[SQM(s_{exp}, x)] \cup [SQM(s_{exp}, y)]\}$$

в інших випадках.

На рис. 2 (а, б, в) наведено результати моделювання якісного стану датчика з алфавітом  $S$ , розподілом  $N(3, 2)$  та нормативно-технічними вимогами:

- Справний стан:

$$0 \leq \text{значення алфавіту } S \leq 5.$$

- Працездатний стан:

$$\begin{cases} -5 \leq \text{значення алфавіту } S < 0 \\ 5 < \text{значення алфавіту } S \leq 10 \end{cases}$$

- Непрацездатний стан:

$$\begin{cases} \text{значення алфавіту } S < -5 \\ \text{значення алфавіту } S > 10 \end{cases}$$

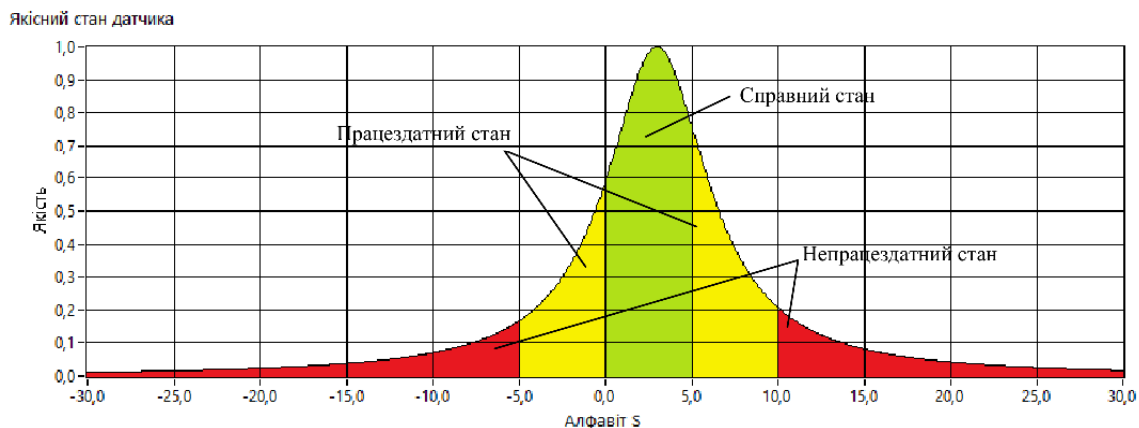
### Висновки

У статті запропоновано функцію і шкалу ентропійної оцінки якості поточного стану датчиків технічної системи, яка відповідає вимогам універсальності та максимальної незалежності від людського фактору. Доведено відповідність запропонованої функції вимогам до функцій

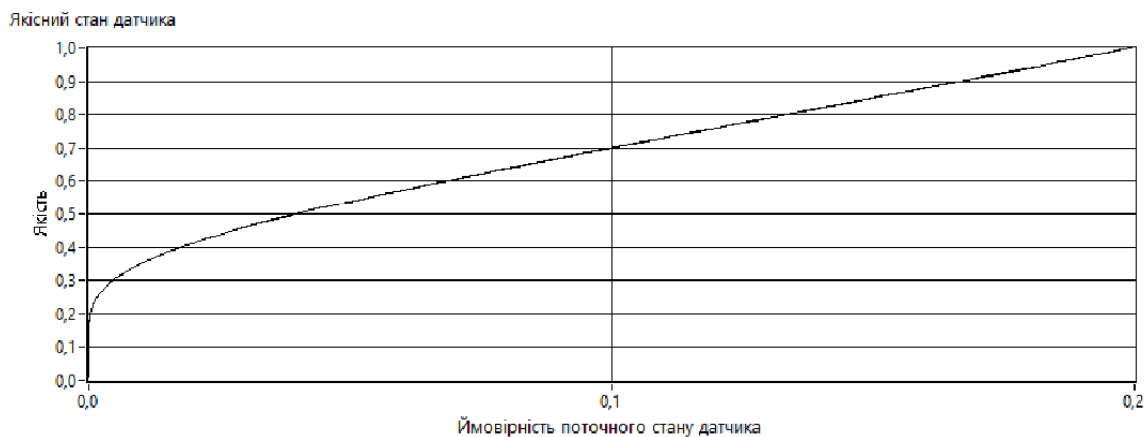
оцінки якості. На відміну від існуючих психофізичних шкал пропонується шкала ентропійної оцінки якості має динамічний діапазон оцінювання, тобто межі піддіапазонів будуть автоматично змінюватися в залежності від нормативно-технічних вимог до стану досліджуваного датчика. Можна сказати, що шкала адаптується під конкретні вимоги, що дозволяє більш достовірно

оцінити якісний стан об'єкта. Наведено результати моделювання якісного стану датчика.

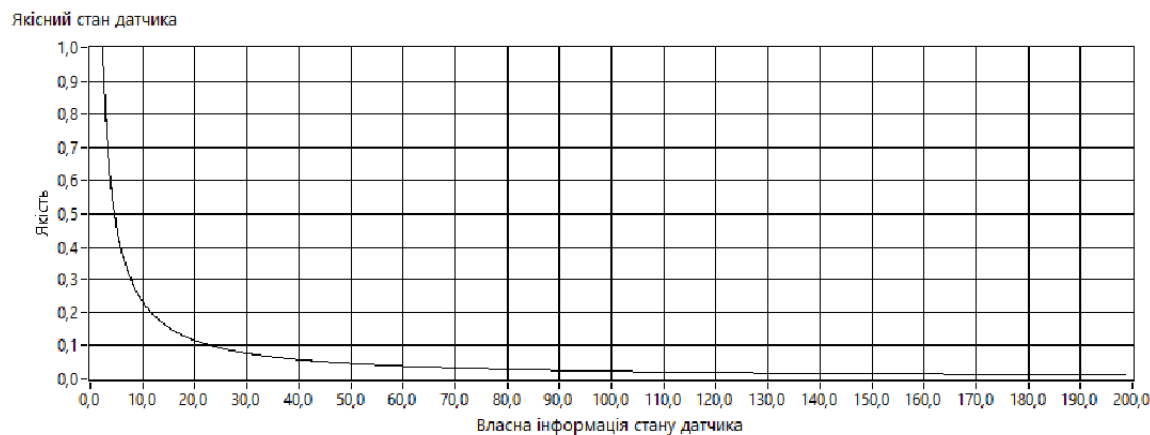
Можливим практичним застосуванням запропонованої функції і шкали є використання в системах моніторингу і діагностики, для визначення поточного якісного стану досліджуваної технічної системи.



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Візуалізація результатів моделювання якісного стану датчика:

- а) якісний стан датчика відносно значень алфавіту  $S$  датчика;
- б) якісний стан датчика відносно ймовірності прийняття датчиком стану  $s_j$  з алфавіту  $S$  ;
- в) якісний стан датчика відносно власної інформації стану датчика

## Список використаних джерел

1. Волков К. С. Удосконалення розрахунків показників якості за функцією бажаності Харрінгтона / К. С. Волков, С. Л. Волков, Н. Ф. Казакова // Сучасний захист інформації. – 2017. – № 1. – С. 103–108.
2. Пичкалев А. В. Обобщенная функция желательности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств / А. В. Пичкалев // Исследования наукограда. – 2012. – № 1. – С. 25–28.
3. Шутяк Ю. В. Використання функції бажаності для оцінки економічної безпеки підприємства / Ю. В. Шутяк // Наукові студії. – 2010. – Випуск 7. – С. 147–154.
4. Бубнов Е. А. Шкалирование входной информации / Е. А. Бубнов, Д. А. Скороходов // Портал : Изд-во Гринда. URL: <http://grinda.info/control/skalir/skalir.htm>.
5. Harrington Edwin C., Jr. The Desirability Function / Industrial Quality Control. – 1965, April. – P. 494–498.
6. Величко О. М. Метрологія, технічне регулювання та забезпечення якості: підручник: у 5 т. – Т. 4: Забезпечення якості та системи управління, за заг. ред. О. М. Величка. – Одеса: ВМВ, 2014. – 508 с.
7. Куць В. Р. Кваліметрія / В. Р. Куць, П. Г. Столярчук, В. М. Друзюк. – Л.: Вид-во Нац. ун-т «Львів. політехніка», 2012. – 256 с.
8. Volkov S. Set-theoretic model of the information state of the industrial cyberphysical system / S. Volkov // Scientific journal of the Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University. – 2018. – № 1(89). – P. 132–138.
9. Волков С. Л. Філософський аспект інформаційного стану штучних систем / С. Л. Волков, О. І. Кисельова // Метрологія та прилади. – 2017. – № 5. – С. 119–122.
10. Кудряшов Б. Д. Теория вероятностей: учеб. для вузов / Б. Д. Кудряшов. – СПб.: Питер, 2009. – 320 с.
11. ДСТУ ISO/IEC 25021:2016 Інженерія програмних засобів і систем. Вимоги щодо якості та оцінювання систем і програмного продукту (SQuaRE). Елементи показника якості (ISO/IEC 25021:2012, IDT).
12. Величко О. М. Метрологія, технічне регулювання та забезпечення якості : підручник у 5 т. – Т. 2: Технічне регулювання / за заг. ред. О. М. Величка. – Одеса: ВМВ, 2014. – 509 с.
13. Кириллов В. И. Кваліметрія и системный анализ: учебн. пособие / В. И. Кириллов. – Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2011. – 440 с.
14. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике.

Основные понятия. Термины и определения.

15. IEC 60050 (191):1990-12 «Dependability and quality of service», NEQ.

## References

1. Volkov K. S. Udoskonalennia rozrakhunkiv pokaznykiv yakosti za funktsiieiu bazhanosti Khar-rinhtona / K. S. Volkov, S. L. Volkov, N. F. Kazakova // Suchasnyi zakhyst informatsii. – 2017. – # 1. – S. 103–108.
2. Pichkalev A. V. Obobshhennaya funkciya zhelatel'nosti Xarringtona dlya sravnitel'nogo analiza texnicheskix sredstv / A. V. Pichkalev // Issledovaniya naukograda. – 2012. – № 1. – S. 25–28.
3. Shutiak Yu. V. Vykorystannia funktsii bazhanosti dlia otsinky ekonomichnoi bezpeky pidpriemstva / Yu. V. Shutiak // Naukovi studii. – 2010. – Vypusk 7. – S. 147–154.
4. Bubnov E. A. Shkalirovanie vxodnoj informacii / E. A. Bubnov, D. A. Skoroxodov // Portal : Izd-vo Grinda. URL: <http://grinda.info/control/skalir/skalir.htm>.
5. Harrington Edwin C., Jr. The Desirability Function / Industrial Quality Control. – 1965, April. – P. 494–498.
6. Velychko O. M. Metrolohiia, tekhnichne rehuliuвання ta zabezpechennia yakosti: pidruchnyk: u 5 t. – T. 4: Zabezpechennia yakosti ta systemy upravlinnia, za zah. red. O. M. Velychka. – Odesa: VMV, 2014. – 508 s.
7. Kuts V. R. Kvalimetriia / V. R. Kuts, P. H. Stoliarchuk, V. M. Druziuk. – L.: Vyd-vo Nats. un-t «Lviv. politehnika», 2012. – 256 s.
8. Volkov S. Set-theoretic model of the information state of the industrial cyberphysical system / S. Volkov // Scientific journal of the Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University. – 2018. – № 1(89). – P. 132–138.
9. Volkov S. L. Filosofskyi aspekt informatsiinoho stanu shtuchnykh system / S. L. Volkov, O. I. Kyselova // Metrolohiia ta prylady. – 2017. – # 5. – S. 119–122.
10. Kudryashov B. D. Teoriya veroyatnostej: ucheb. dlya vuzov / B. D. Kudryashov. – SPb.: Piter, 2009. – 320 s.
11. DSTU ISO/IEC 25021:2016 Inzheneriia prohramnykh zasobiv i system. Vymohy shchodo yakosti ta otsiniuvannia system i prohramnoho produktu (SQuaRE). Elementy pokaznyka yakosti

(ISO/IEC 25021:2012, IDT).

12. Velychko O. M. Metrolohiiia, tekhnichne rehuliuвання ta zabezpechennia yakosti: pidruchnyk u 5 t. – T. 2: Tekhnichne rehuliuвання / za zah. red. O. M. Velychka. – Odesa: VMV, 2014. – 509 s.

13. Kirillov V. I. Kvalimetriya i sistemnyj analiz: uchebn. posobie / V. I. Kirillov. – Minsk: Novoe

znanie; M.: INFRA-M, 2011. – 440 s.

14. GOST 27.002-89 Nadezhnost' v tekhnike. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya.

15. IEC 60050 (191):1990-12 «Dependability and quality of service», NEQ.

*Надійшла до редакції 21.05.2018*

**С. Л. Волков, к.т.н., К. С. Волков**

### **ФУНКЦИЯ И ШКАЛА ЭНТРОПИЙНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДАТЧИКА**

*В статье предложена функция и шкала энтропийной оценки качества текущего состояния датчиков технической системы, соответствующей требованиям универсальности и максимальной независимости от человеческого фактора. Доказано соответствие предложенной функции требованиям к функциям оценки качества. Предлагаемая шкала имеет динамический диапазон оценки, что обеспечивает ее адаптацию под конкретные требования и позволяет более достоверно оценить качественное состояние объекта. Возможным практическим применением является использование в системах мониторинга и диагностики, для определения текущего качественного состояния исследуемой технической системы.*

**Ключевые слова:** функция и шкала энтропийной оценки, качество текущего состояния датчиков, техническая система, динамический диапазон оценки, моделирование качественного состояния датчика.

**S. L. Volkov, PhD, K. S. Volkov**

### **FUNCTION AND SCALE FOR THE ENTROPY EVALUATION OF THE CURRENT STATE OF SENSORS QUALITY**

*In the article the function and the scale for the entropy evaluation of the current state of sensors quality in the technical system which fits the requirements of universality and maximal independency from the human factor are offered. It is highlighted that the available methods of the determination of the quality of the technical systems have essential flaws which consist in both subjectivism because the dominant role in the evaluation belongs to experts and legitimacy of providing them properties of universality which was proved by nobody.*

*The offered function of the quality evaluation, the parameter of which is the quantity of own information of the explored sensor, provides the declared universality approach according to the principles of the information theory. The conformity to all requirements for the functions of the evaluation of the quality: continuity, monotonicity and smoothness over the whole range of definition regardless of the probability distribution function, which is measured by the random value sensor was proved. The conformity to all requirements for the functions of the quality evaluation: continuity, monotonicity and smoothness over the whole range of definition regardless of the probability distribution function, which is measured by the random value sensor is proved.*

*The proposed scale of the entropy evaluation of the quality fits to standard settings of the diagnostic of the technical systems and has three subranges which determine the state of the sensors: good state, up state, and down state. Unlike the existing psychophysical scales the offered scale has dynamic range of the evaluation so the limits of the subranges will automatically change depending on the regulatory and technical requirements for the state of the explored sensor. Such approach provides adaptation of the scale to specific requirements which gives a chance to evaluate the qualitative state of the object more reliably. The results of modeling of the qualitative state of the sensor are given. The possible practical application of the offered function and scale is usage in the systems of monitoring and diagnostic for determination of the current qualitative state of the explored technical system.*

**Keywords:** the function and the scale of the entropy evaluation, the quality of the current state of the sensors, technical system, dynamic range of the evaluation, modeling of the qualitative state of the sensor.