

УДК 004.415+658:621.56

С. Л. Волков, к.т.н., **Є. В. Вавілов**, к.т.н.

Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса

ТЕОРЕТИКО-МНОЖИННА МОДЕЛЬ ЯКІСНОГО СТАНУ ПРОМИСЛОВОЇ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ

В роботі запропоновано множинну модель якісного стану промислової кіберфізичної системи, заснованої на кваліметричній оцінці відповідності поточних показників якості датчиків її сенсорної інфраструктури, очікуваним значенням. Застосування «якісного» підходу, як універсального, тобто не пов'язаного з конкретним фізичним чи лінгвістичним значенням вимірюваної величини дає змогу оцінити вплив взаємозв'язків показників якості зовнішніх систем на поточний стан досліджуваної системи у процесі діагностування. Віднесення поточного стану датчиків сенсорної інфраструктури до певного піддіапазону шкали виконує функцію редуції складності і дає значне зниження обсягу даних для оперування. Модель надає змогу моніторингу стану у процесі затвердження в реальному часі як в умовах експлуатації, так і при тестуванні на стадіях виробництва (пусконалагоджувальні роботи і дослідна експлуатація) та підтримки системи.

Ключові слова: кіберфізична система, множинна модель, оцінка якості, якісний стан, показники якості, якісний підхід, сенсорна інфраструктура.

С. Л. Волков, к.т.н., **Е. В. Вавілов**, к.т.н.

ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ КАЧЕСТВЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В работе предложена множественная модель качественного состояния промышленной киберфизической системы, основанной на кваліметрической оценке соответствия текущих показателей качества датчиков ее сенсорной инфраструктуры, ожидаемым значением. Применение «качественного» подхода, как универсального, то есть не связанного с конкретным физическим или лингвистическим значением измеряемой величины позволяет оценить влияние взаимосвязей показателей качества внешних систем на текущее состояние исследуемой системы в процессе диагностирования. Отнесение текущего состояния датчиков сенсорной инфраструктуры к определенному поддиапазону шкалы выполняет функцию редуции сложности и дает значительное снижение объема данных для операции. Модель дает возможность мониторинга состояния в процессе утверждения в реальном времени как в условиях эксплуатации, так и при тестировании на стадиях производства (пусконаладочные работы и опытная эксплуатация) и поддержке системы.

Ключевые слова: киберфизическая система, множественная модель, оценка качества, качественное состояние, показатели качества, качественный подход, сенсорная инфраструктура.

S. Volkov, PhD, **E. Vavilov**, PhD

SET-THEORETICAL MODEL OF QUALITY STATE OF THE INDUSTRIAL CYBERPHYSICAL SYSTEM

In the work the set-theoretical model of quality state of the industrial cyberphysical system which is based on qualimetric evaluation of the compliance of the current quality indicators of sensors of its sensory infrastructure with the expected value. Model assignment is use in systems of monitoring and diagnostics. The model gives a possibility of building of monitoring of the state of cyberphysical systems in the process of affirmation in real time as in operating conditions as during testing at production stages (start-up and adjustment works and experimental exploitation) and system support. The main difference from existing systems based on “related models” is applying of the “quality” approach as an universal one, which is not connected with specific physical or linguistic meaning of the measured value. Quality indicators in the given expressions define the quality state of components of sensor infrastructure of the cyberphysical system according to the ISO/IEC 25000 series of standards and correspond to the problem-oriented functional proper-

ties of quality, which determine how well the system execute its functions. Attribution of the current state of the components of the sensor infrastructure to the certain subrange of quality scale performs the function of difficulty reduction and gives a significant decline of data volume for operating in diagnostic systems. The applied methods of qualimetric measurements and evaluating are based on the entropy determination of simple and complex quality indicators of components of sensory-hardware, sensory-functional and sensory-software infrastructure. Offered approach also gives a possibility of evaluation of influence of interconnections of quality indicators of outer systems on the current state of the explored system in process of diagnostics of complicated and critical situations. Set-theoretical expressions for determination of quality state of functional blocks, hardware units, structure levels and their components are given. The graphical visualization of model of quality state of generalized sensory infrastructure and qualitative state of the functional block is given.

Keywords: cyberphysical system, set-theoretical model, quality assessment, qualitative state, quality indicators, qualitative approach, sensory infrastructure

DOI 10.32684/2412-5288-2018-2-13-50-56

Вступ. Основою діагностування технічних, у тому числі кіберфізичних систем (КФС), є визначення їх поточного стану в реальному масштабі часу, яке полягає в зведенні і обробці великих обсягів різноманітної вимірювальної інформації для ідентифікації та інтерпретації складних подій і критичних ситуацій. Редукція складності, яка полягає в зменшенні обсягів даних для обробки є однією з актуальних завдань які стоять перед розробниками діагностичних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний час найбільш дієвою щодо визначення стану КФС є «пов'язана модель» яка може безперервно записувати та відслідковувати стан реальної системи. Основним недоліком такого підходу є оперування великою кількістю значень фізичних величин, та станів КФС, і, як результат – можливість моделювання і збору статистичних даних тільки на базі великих дата-центрів, і відсутність аналізу взаємозв'язків досліджуваної системи з зовнішніми системами (забезпечення та оперативне оточення) [1 – 4]. Альтернативою такого підходу є рішення пов'язані з визначенням стану досліджуваних систем заснованих на кваліметричній оцінці відповідності поточних показників якості їх складових очікуваним значенням. База альтернативи запропонована в роботах [5 – 7] представленням КФС у вигляді її сенсорної інфраструктури, а універсальний підхід до визначення якісного стану датчиків досліджено в [8, 9]. Аналіз і модель показників якості КФС, взаємозв'язки і можливий вплив якісних станів зовнішніх систем її життєвого циклу наведені в роботах [10, 11].

Мета. Метою роботи є розробка математичної моделі визначення якісного стану промислової кіберфізичної системи заснованої на її сенсорній інфраструктурі.

Виклад основного матеріалу. Звернемося до множинної моделі інформаційного стану кіберфізичної системи, визначеного її сенсорною інфраструктурою, складовими якої є сенсорно-

апаратна, сенсорно-функціональна і сенсорно-програмна інфраструктури [5 – 7]. У відповідності до [8] кількісне значення інформаційного стану довільного датчика як базової складової будь-якої сенсорної інфраструктури, відповідає кількості власної інформації його поточного стану отриманого в результаті експлуатаційного вимірювання

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

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

Відносне значення власної інформації стану датчика відповідає виразу:

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

де $I(s_{exp}) = -\log p(s_{exp})$ – апіорне (очікуване) значення результату вимірювання яке відповідає максимальному значенню $(p(s_{exp}) \rightarrow \max |s_{exp} = M_0)$ прийнятого ймовірнісного розподілу, M_0 – мода розподілу. Зворотнім значенням наведеного виразу є простий показник якості (ППЯ):

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

Інформаційний стан декількох датчиків по суті і визначенню, є об'єднанням інформаційних станів окремих датчиків, зворотне значення та-

кого об'єднання є комплексним показником якості (КПЯ) CQM_{Sen} датчиків відповідної сенсорної інфраструктури. В свою чергу зворотне значення об'єднання CQM_{Sen} , буде відповідати комплексному показнику функціонального блоку CQM_{FB} як показнику більш високого рівня [7, 9]:

$$CQM = \frac{1}{I_Z^\Delta} = \frac{\sum_z -\log(p(Z \sim z_{exp}) | \forall z_{exp} \in Z)}{\sum_z -\log(p(Z \sim z_{meas}) | \forall z_{meas} \in Z)},$$

$$CQM_{FB_\omega} = CQM \left\{ \begin{array}{l} CQM \left\{ (\lambda = (1: \nu)), SQM_{SenA_{\omega\lambda}} \right\}, \\ CQM \left\{ (\zeta = (1: r)), SQM_{SenF_{\omega\zeta}} \right\}, \\ CQM \left\{ (t = (1: p)), SQM_{SenP_{\omega t}} \right\} \end{array} \right\}, \quad (1)$$

де SQM_{SenA} , SQM_{SenF} , SQM_{SenP} – ППЯ сенсорів відповідної інфраструктури, CQM – КПЯ складових відповідних рівнів.

де Z – довільні множини (складові) моделі сенсорної інфраструктури, z_{exp} – очікуване (априорне) значення стану відповідної складової, z_{meas} – поточне (вимірне) значення стану відповідної складової.

Таким чином, стан функціонального блоку FB в термінах і визначеннях показників якості може бути визначений виразом:

Графічне представлення виразу (1) наведено на рис. 1.

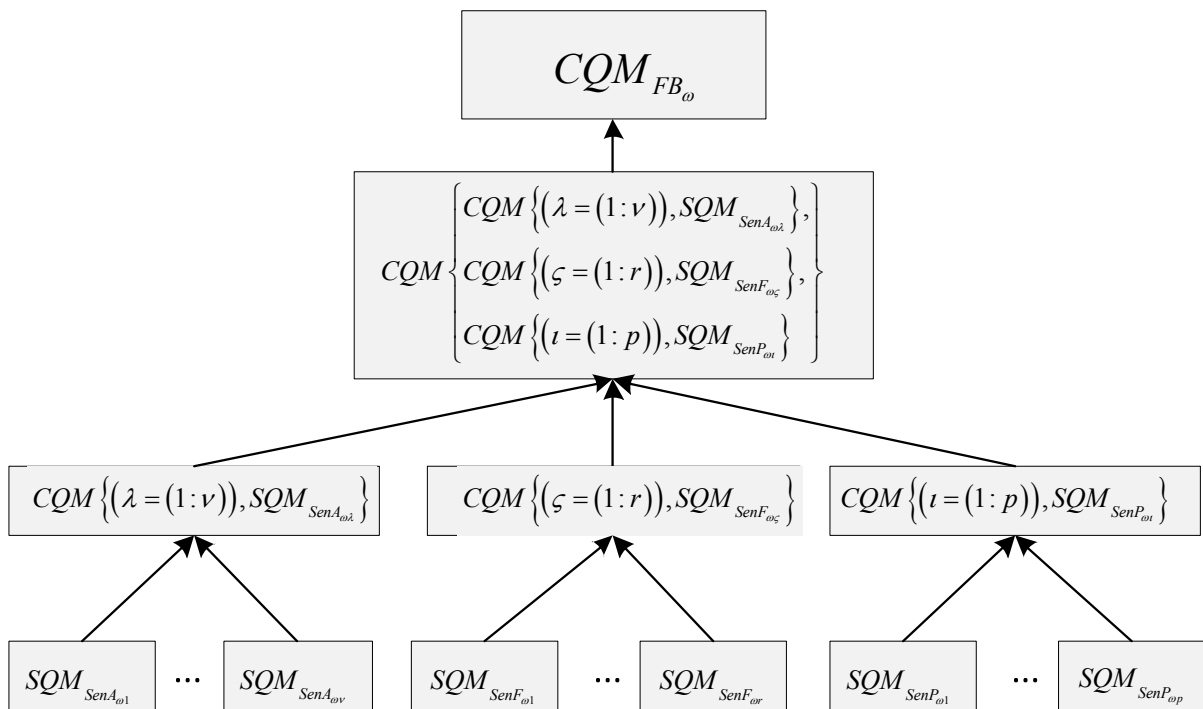


Рисунок 1 – Стан функціонального блоку FB_ω в термінах і визначеннях показників якості

Аналогічним чином, стан складових більш високих рівнів і самої кіберфізичної системи, сенсорна модель інформаційного стану яких дана

в [6, 7], може бути представлено в термінах і визначеннях показників якості виразами (2) і (3).

$$\begin{aligned}
 CQM_{SenSys} = & \\
 = C1 \left\{ C2 \left\{ C4 \left\{ \dots, \left\{ C6 \left\{ CQM_{Con_{\alpha\beta^1 \dots \beta^1}} \left(\beta^1 = (1:m^1) \right) \right\} \right\} \right\} \right\} \right\} & \\
 = C1 \left\{ C2 \left\{ C3 \left\{ C4 \left\{ C5 \left\{ CQM_{Dev_{\alpha\beta^\alpha \gamma^\alpha \beta^{(\alpha-1)} \gamma^{(\alpha-1)}}} \left(\gamma^{(\alpha-1)} = (1:n^{(\alpha-1)}) \right) \right\} \right\} \right\} \right\} \right\} & \\
 \dots, \left\{ C6 \left\{ C7 \left\{ CQM_{Dev_{\alpha\beta^\alpha \gamma^\alpha \dots \beta^1 \gamma^1}} \left(\beta^1 = (1:m^1) \right) \right\} \right\} \right\} \dots & \dots, \quad (2)
 \end{aligned}$$

де CQM_{SenSys} – КПЯ кіберфізичної системи виражений через модель сенсорної інфраструктури, CQM_x – КПЯ складових відповідних рівнів, α – індекс ПЯ рівня, β – індекс ПЯ складової рівня Con , γ – індекс структурних апаратних одиниць Dev складової рівня, $C\langle \cdot \rangle$ відповідає наступним ПЯ: $C1 \rightarrow CQM_\alpha$, $C2 \rightarrow CQM_{\alpha\beta^\alpha}$, $C3 \rightarrow CQM_{\alpha\beta^\alpha \gamma^\alpha}$, $C4 \rightarrow CQM_{\alpha\beta^\alpha \gamma^\alpha \beta^{(\alpha-1)}}$, $C5 \rightarrow CQM_{\alpha\beta^\alpha \gamma^\alpha \beta^{(\alpha-1)} \gamma^{(\alpha-1)}}$, $C6 \rightarrow CQM_{\alpha\beta^\alpha \gamma^\alpha \dots \beta^1}$,

$C7 \rightarrow CQM_{\alpha\beta^\alpha \gamma^\alpha \dots \beta^1 \gamma^1}$, x – індекс відповідного рівня.

Кваліметричні вимірювання, оцінка і належність стану об’єктів з (1-3) до шкали якості здійснюється за правилами наведеними в [8, 9]. Можливість оцінки впливу зовнішніх систем на працездатність КФС забезпечується аналізом взаємозв’язків показників якості всіх складових Системи систем до складу якої входить досліджувана система [10].

$$\begin{aligned}
 & CQM_{Dev} = \\
 & = D1 \left\{ D2 \left\{ \left(\zeta^g = (1:k^g) \right), CQM_{ConF_{\gamma\zeta^g}} \right\} \right\} = \\
 & \left\{ D5 \left\{ \left(\zeta^{(g-1)} = (1:k^{(g-1)}) \right), CQM_{ConF_{\gamma\zeta^g \zeta^{(g-1)}}} \right\} \right\} \\
 & \left\{ \dots \left\{ D8 \left\{ \left(\zeta^1 = (1:k^1) \right), CQM_{ConF_{\gamma\zeta^g \dots \zeta^1}} \right\} \right\} \right\} \\
 & = D1 \left\{ D2 \left\{ \left(\zeta^g = (1:k^g) \right), \right. \right. \\
 & \left. \left. D3 \left\{ \left(\psi^g = (1:e^g) \right), CQM_{App_{\gamma\zeta^g \psi^g}} \right\}, \right. \right. \\
 & \left. \left. D4 \left\{ \left(\omega^g = (1:t^g) \right), CQM_{FB_{\gamma\zeta^g \psi^g \omega^g}} \right\} \right\} \right\} \\
 & \left\{ D5 \left\{ \left(\zeta^{(g-1)} = (1:k^{(g-1)}) \right), \right. \right. \\
 & \left. \left. D6 \left\{ \left(\psi^{(g-1)} = (1:e^{(g-1)}) \right), CQM_{App_{\gamma\zeta^g \zeta^{(g-1)} \psi^{(g-1)}}} \right\}, \right. \right. \\
 & \left. \left. D7 \left\{ \left(\omega^{(g-1)} = (1:t^{(g-1)}) \right), CQM_{FB_{\gamma\zeta^g \zeta^{(g-1)} \psi^{(g-1)} \omega^{(g-1)}}} \right\} \right\} \right\} \\
 & \left\{ \dots \left\{ D8 \left\{ \left(\zeta^1 = (1:k^1) \right), \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. D9 \left\{ \left(\psi^1 = (1:e^1) \right), CQM_{App_{\gamma\zeta^g \dots \zeta^1 \psi^1}} \right\}, \right. \right. \\
 & \left. \left. D10 \left\{ \left(\omega^1 = (1:t^1) \right), CQM_{FB_{\gamma\zeta^g \dots \zeta^1 \psi^1 \omega^1}} \right\} \right\} \right\} \right\}, \quad (3)
 \end{aligned}$$

де CQM_{Dev} – КПЯ структурної апаратної одиниці рівня, CQM_g – КПЯ програмно-функціонального рівня, g – індекс програмно-функціонального рівня, ζ – індекс складової *ConF* програмно-функціонального рівня, ψ – індекс додатка *App*, ω – індекс функціонального блоку, $D(\cdot)$ відповідає наступним ПЯ:
 $D1 \rightarrow CQM_{\gamma^g}$, $D2 \rightarrow CQM_{\gamma\zeta^g}$, $D3 \rightarrow CQM_{\gamma\zeta^g \psi^g}$,
 $D4 \rightarrow CQM_{\gamma\zeta^g \psi^g \omega^g}$, $D5 \rightarrow CQM_{\gamma\zeta^g \zeta^{(g-1)}}$,

$D6 \rightarrow CQM_{\gamma\zeta^g \zeta^{(g-1)} \psi^{(g-1)}}$,
 $D7 \rightarrow CQM_{\gamma\zeta^g \zeta^{(g-1)} \psi^{(g-1)} \omega^{(g-1)}}$,
 $D8 \rightarrow CQM_{\gamma\zeta^g \zeta^{(g-1)} \dots \zeta^1}$, $D9 \rightarrow CQM_{\gamma\zeta^g \zeta^{(g-1)} \dots \zeta^1 \psi^1}$,
 $D10 \rightarrow CQM_{\gamma\zeta^g \zeta^{(g-1)} \dots \zeta^1 \psi^1 \omega^1}$.

Візуалізацію якісного стану узагальненої сенсорної інфраструктури технічної системи побудованого згідно (1-3) наведено на рис. 2.



Рисунок 2 – Дерево якісного стану узагальненої сенсорної інфраструктури технічної системи

Висновок

Показники якості в наведених виразах вказують на якісний стан складових сенсорної інфраструктури кіберфізичної системи, який згідно [11] можна віднести до проблемно-орієнтованих функціональних властивостей якості, які визначають наскільки добре система виконує свої функції.

Моніторинг стану відбувається у процесі затвердження в реальному часі як в умовах експлуатації, так і при тестуванні на стадіях виробництва (пусконаладжувальні роботи і дослідна експлуатація) та підтримки системи. Віднесення поточного стану датчиків сенсорної інфраструктури до певного піддіапазону шкали якості, виконує функцію редукції складності і дає значне зниження обсягу даних для оперування. Застосування «якісного» підходу, як універсального, тобто не пов'язаного з конкретним фізичним чи лінгвістичним значенням вимірюваної величини дає змогу оцінки впливу взаємозв'язків показників якості зовнішніх систем на поточний стан досліджуваної системи у процесі діагностування.

Список використаних джерел

1. Lee E. A. and Seshia S. A., Introduction to Embedded Systems – A Cyber-Physical Systems Approach, <http://LeeSeshia.org>, 2011.
2. Colombo A. W., Karnouskos S. and Bangemann T., Towards the Next Generation of Industrial Cyber-Physical Systems, in Industrial Cloud-based Cyber-Physical Systems: The IMC-AESOP Approach, Springer, 2014.
3. Киселев М. И. «Индустрия 4.0»: некоторые проблемные вопросы / М. И. Киселев, С. В. Новиков // Станкоинструмент. – 2016. – Вып. № 2. – С. 42–46. – Режим доступа: www.stankoinstrument.ru/journal/2016/2.
4. Lee, Jay; Bagheri, Behrad; Kao, Hung-An (2014). «Recent Advances and Trends of Cyber-Physical Systems and Big Data Analytics in Industrial Informatics». IEEE Int. Conference on Industrial Informatics (INDIN) – 2014.
5. Волков С. Л. Теоретичні засади побудови моделі структури експертної системи якості кіберфізичних систем / Збірник наукових праць 6-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Метрологія, технічне регулювання,

якість: досягнення та перспективи» (Одеса, 11-12 жовтня). Одеса: ОДАТРА, 2016. – С. 139–141.

6. Волков С. Л. Модель сенсорно-апаратної інфраструктури кіберфізичної системи / Збірник наукових праць сьомої міжнародної науково-практичної конференції «Технічне регулювання, метрологія та інформаційні технології» (Одеса, 12-13 жовтня). Одеса: ОДАТРА, 2017. – С. 157–159.

7. Volkov S. Set-theoretic model of the information state of the industrial cyberphysical system / Scientific journal of the Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, 2018. – № 1(89). – С. 132–138.

8. Волков С. Л., Волков К. С. Функція і шкала ентропійної оцінки якісного стану датчика / Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості. – 2018. – Вип. 1(12). – С. 10–15.

9. Volkov, S. Volkov K., Frazze-Frazenko O., Kazakova N. Prerequisites of entropy quality assessment function and scale use for technical systems qualitative condition definition / monograph published on the VIII International Conference of Students, PhD Students and Young Scientists “Engineer of XXI Century” materials, 7 december 2018, BielskoBiala, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Bialej, 2018 : materiały konf. (Tom 1). – P. 377–384.

10. Волков С. Л., Кисельова О. І. Dual-v процесна модель якості штучного об'єкту / Метрологія та прилади (спецвипуск до 100 річчя П. П. Орнатського). – 2017. – № 6. – С. 62–65.

11. ДСТУ ISO/IEC 25010:2015 Інженерія програмних засобів і систем. Вимоги щодо якості та оцінювання систем і програмного продукту (SQuaRE). Моделі якості системи та програмних засобів (ISO/IEC 25010:2011, IDT).

References

1. Lee E. A. and Seshia S. A., Introduction to Embedded Systems — A Cyber-Physical Systems Approach, <http://LeeSeshia.org>, 2011.

2. Colombo A. W., Karnouskos S. and Bangemann T., Towards the Next Generation of Industrial Cyber-Physical Systems, in Industrial Cloud-based Cyber-Physical Systems: The IMC-AESOP Approach, Springer, 2014.

3. Kiselev M. I. «Industry 4.0»: some problematic issues [«Industriya 4.0»: nekotorye problemnye voprosy] / Stankoinstrument. 2016. № 2. – P. 42–46. – Mode of access: www.stankoinstrument.ru/journal/2016/2.

4. Lee, Jay; Bagheri, Behrad; Kao, Hung-An (2014). «Recent Advances and Trends of Cyber-Physical Systems and Big Data Analytics in Indus-

trial Informatics». IEEE Int. Conference on Industrial Informatics (INDIN) 2014.

5. Volkov S. L. Theoretical principles of construction of the model of the structure of the expert system of quality of cyberphysical systems [Teoretychni zasady pobudovy modeli struktury ekspertnoyi systemy yakosti kiberfizychnykh system] / Collection of scientific papers of the 6th International Scientific and Practical Conference «Metrology, Technical Regulation, Quality: Achievements and Prospects» (Odesa, October 11-12). Odesa: OSATRQ, 2016. – P. 139–141.

6. Volkov S. L. Model of sensory-hardware infrastructure of the cyberphysical system [Model sensorno-aparatnoi infrastruktury kiberfizychnoi systemy] / Collection of scientific works of the seventh international scientific and practical conference «Technical regulation, metrology and information technologies» (Odesa, October 12-13). Odesa: OSATRQ, 2017. – P. 157–159.

7. Volkov S. Set-theoretic model of the information state of the industrial cyberphysical system / Scientific journal of the Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University. – 2018. – # 1(89). – P. 132–138.

8. Volkov S. L., Volkov K. S. The function and scale of the entropy assessment of the quality of the sensor [Funktsiya i shkala entropiynoyi otsinky yakisnoho stanu datchyka] / Collection of scientific works of the Odesa State Academy of Technical Regulation and Quality. – 2018. – # 1(12). – P. 10–15.

9. Volkov, S. Volkov K., Frazze-Frazenko O., Kazakova N. Prerequisites of entropy quality assessment function and scale use for technical systems qualitative condition definition / monograph published on the VIII International Conference of Students, PhD Students and Young Scientists “Engineer of XXI Century” materials, 7 december 2018, BielskoBiala, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Bialej, 2018 : materiały konf. (Tom 1). – P. 377–384.

10. Volkov S. L., Kiseleva O. I. Dual-v Process Model for the Quality of an Artificial Object [Dual-v protsesna model yakosti shtuchnoho ob'iektu] / Metrology and Instruments (special edition of the 100th anniversary of P. Ornatsky). – 2017. – # 6. – P. 62–65.

11. DSTU ISO / IEC 25010: 2015 Software engineering and systems engineering. System and Software Quality and Assessment Requirements (SQuaRE). System quality and software quality models (ISO / IEC 25010: 2011, IDT).

Надійшла до редакції 19.09.2018