

Фірсов С. М.¹, Резнікова О. В.²

¹Канд. техн. наук, доцент, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «ХАІ», Україна

²Асистент, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «ХАІ», Україна

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІДМОВОСТІЙКОСТІ СИСТЕМИ ОРІЄНТАЦІЇ ТА СТАБІЛІЗАЦІЇ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

Сформована структура системи орієнтації та стабілізації, яка забезпечує її активну відмовостійкість. Параметризовані види відмов функціональних елементів системи, що характеризуються зміною властивостей перетворювальних елементів. Отримано діагностичні функціональні моделі для вирішення задач виявлення, пошуку місця та визначення класу відмови системи. Розроблено моделі і методи системного підходу до відмовостійкості з метою ефективного використання сигнальної, параметричної та структурної надлишковості та обрані інструменти парирования. Проведено експериментальні дослідження макетного зразка автоматичної системи орієнтації та стабілізації для дослідження властивостей активної відмовостійкості в аварійних режимах роботи.

Ключові слова: система стабілізації та орієнтації космічного апарату, відмовостійкість, двигун маховик, датчик кутової швидкості.

REFERENCES

1. Alekseev Yu. S., Belous E. V., Belyaev G. V. i dr./ pod obshhej red. Alekseeva Yu. S., Zlatkina Yu. M., Krivcova V. S., Kulika A. S., Chumachenko V. I. Proektirovanie i e'ksperimental'naya otrabotka sistem upravleniya ob'ektov raketno-kosmicheskoy tekhniki. T. 2. Proektirovanie sistem upravleniya kosmicheskix apparatov i modulej orbital'nyx stancij [Tekst]: uchebnik v 3 t. Har'kov: Nac. ae'rokosm. un-t im. N. E. Zhukovskogo «Хар'к. авіац. ін-т», NPP Харtron-Arkos, 2012, 680 p.
2. Kulik A. S., Luchenko O. A., Firsov S. N. Algoritmicheskoe obespechenie modulej diagnostirovaniya i vosstanovleniya rabotosposobnosti sputnikovoy sistemy orientacii i stabilizacii [Tekst], *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2012, No. 1 (26), pp. 112–122.
3. Postnikov V. N., Taran A. N., Firsov S. N. Kriterii ocenki svojstv izbytochnyx maxovichnyx sistem [Tekst], *Radioelektronni ta kompiuterni systemy*, 2011, No. 4 (52), pp. 82–87.
4. Kulik A. S., Luchenko O. A., Firsov S. N. Konceptiya obespecheniya zhivuchesti sputnikovyx sistem upravleniya orientaciej i stabilizaciej, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2011, No. 2 (25), pp. 41–47.
5. Kulik A. S., Subbota A. M., Reznikova O. V. E'ffektivnost' izbytochnyx sistem stabilizacii i orientacii kosmicheskix apparatov s dvigatelyami-maxovikami [Tekst], *Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i texnologiya*, 2008, No. 3 (50), pp. 18–25.
6. Firsov S. N. Obespechenie funkcional'noj ustojchivosti izmeritelej parametrov dvizheniya sputnikovyx sistem stabilizacii i orientacii, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2013, No. 1 (28), pp. 144–150.
7. Kulik A. S., Firsov S. N., Do Kuok Tuan, Zlatkin O. Yu. Vosstanovlenie izmerenij navigacionnoj sistemy v rezhime real'nogo vremeni [Tekst], *Radioelektronni i komp'yuterni sistemi*, 2008, Vyp. 5 (59), pp. 28–33.
8. Firsov S.N., Do Tuan Kuok Obespechenie glubokogo diagnostirovaniya bloka akselerometrov pri ploskostnom dvizhenii letatel'nogo apparata [Tekst], *Radioelektronni i komp'yuterni sistemi*, 2009, Vyp. 3 (60), pp. 33–38.

AN ATTEMPT FOR 2-LAYER PERCEPTRON HIGH PERFORMANCE IN CLASSIFYING SHIFTED MONOCHROME 60-BY-80-IMAGES VIA TRAINING WITH PIXEL-DISTORTED SHIFTED IMAGES ON THE PATTERN OF 26 ALPHABET LETTERS

Object classification problem is considered, where neocognitron and multilayer perceptron may be applied. As neocognitron, solving almost any classification problem, performs too slowly and expensively, then for recognizing shifted monochrome images there is attempted the 2-layer perceptron, being fast only for pixel-distorted monochrome images, though. Having assumed the original images set of 26 monochrome 60-by-80-images of the English alphabet letters, there is formulated the task to clear out whether the 2-layer perceptron is capable to ensure high performance in classifying shifted monochrome images. Thus it is disclosed that the 2-layer perceptron performs as the good classifier of shifted monochrome images, when in training its input is fed with training samples from shifted images, being pixel-distorted. For this, however, it may need more passes of training samples through the 2-layer perceptron, but nevertheless the total traintime will be shorter than for training the 2-layer perceptron with only pixel-distortion-free shifted monochrome images.

Keywords: object classification, neocognitron, perceptron, pixel distortion, shift, monochrome images, shifted monochrome images.

PROBLEM OF SHIFT-TURN-SCALE PERCEPTRON RECOGNITION

Object recognition is an up-to-date technical problem, dealing with a lot of aspects in its formalization and solving it. The mathematical principle for recognizing objects lies in clustering and classifying them. Neural network, being the universal approximator, is the finest model of clusterization and classification [1, 2]. It needs neither architecture creation, nor training algorithm development. Only the appropriate architecture must be selected among the available ones [1, 3], and the corresponding training algorithm should be enabled [4, 5]. There nonetheless stands an important question of ensuring the high productivity up with low resources consumption and short response delay. The highest productivity is ensured by neocognitron, which is the smartest neural network, performing slowly, though [6, 7]. It also takes too much of memory and data space for clusterization and classification. The multilayer perceptron, consuming memory not so significantly, works much faster, but its productivity is ensured high only for objects or noised objects, which are not shifted, turned (skewed) or scaled against the training objects sample [8]. Certainly, this is unreal situation in world of real events and processes. And if the object, being under classification, is shifted, turned or scaled against its original in the training sample, then perceptron cannot recognize it and classifies this object erroneously. Therefore the problem of shift-turn-scale (STS) object recognition may be solved with making neocognitron perform easier and faster or with making perceptron just recognize STS-property objects better.

WAY OF INVESTIGATION

Clearly that both the said tasks of constructing fast neocognitron and training perceptron STS-classifier are tough for implementation [4, 6, 7]. Besides, neocognitron is very huge model to try optimizing it in speed and resources consumption. So, there is a tenable way of trying to prepare multilayer perceptrons for classifying objects just with one from the three STS-properties: shift, turn or scale. The shift-property is the easiest to program it, while turn or scale is tougher to be modeled [6]. The simplest objects are plane objects like monochrome images. However, even for shifted monochrome images (SMI) multilayer perceptrons perform poorly. Although, multilayer perceptrons perform well [4, 8] for pixel-noised monochrome images (PNMI). It outlines the way to investigate possibility of increasing multilayer perceptron performance in classifying SMI, whether they are PNMI or not.

TASK FORMULATION

Will be considering the original set of 26 monochrome 60-by-80-images which are 26 letters of the English alphabet. An alphabet letter, feeding the classifier input, may be shifted as it occurs usually while scanning and retrieving the text information. The classifier must recognize it at high performance. Cases with letters, being PNMI, are not excluded, but the main case is that input objects are SMI. The extent of shift is going to be featured with a shift constant. The task is to clear out whether the 2-layer perceptron (2LP) is capable to ensure high performance for SMI. For that the model of PNMI and shift-noised

monochrome images (SNMI) must be formalized, whereupon 2LP is trained to become the classifier.

MODEL OF PNMI

It is known that 2LP is trained with blocks of feature-vectorized objects, so q -th image as matrix $\mathbf{A}_q = (a_{uv}^{(q)})_{60 \times 80}$ is reshaped into 4800-length-column before processing it, where $a_{uv}^{(q)} \in \{0, 1\}$ by $q = \overline{1, 26}$. Denote $\mathbf{A} = (\bar{a}_{jq})_{4800 \times 26}$ as the matrix of all original 26 monochrome 60-by-80-images, reshaped into 26 columns. Then model of PNMI is just the matrix

$$\mathbf{A}_{\text{pixel}}^{(k)} = \mathbf{A} + \sigma_{\text{pixel}}^{(k)} \cdot \mathbf{\Xi} \tag{1}$$

by standard deviation

$$\sigma_{\text{pixel}}^{(k)} = \frac{\sigma_{\text{pixel}}^{(\max)}}{F} \cdot k \quad \forall k = \overline{1, F} \tag{2}$$

and its maximum $\sigma_{\text{pixel}}^{(\max)} > 0$ at 4800×26 -matrix $\mathbf{\Xi}$ of values of normal variate with zero expectation and unit variance, where number F indicates at smoothness in training the perceptron [9]. While being trained, the input of 2LP is fed with the set

$$\tilde{P}_{\text{train}} = \{ \tilde{\mathbf{P}}_i \}_{i=1}^{C+F} = \left\{ \left\{ \mathbf{A} \right\}_{l=1}^C, \left\{ \mathbf{A}_{\text{pixel}}^{(k)} \right\}_{k=1}^F \right\} \tag{3}$$

of original images and pixel-distorted images by the set of identifiers (targets)

$$T = \{ \mathbf{T}_i \}_{i=1}^{C+F} = \{ \mathbf{I} \}_{i=1}^{C+F} \tag{4}$$

with identity 26×26 -matrix \mathbf{I} , where number C indicates at how many replicas of undistorted images should be recognized in the training process. The set (3), being formed by (1) and (2), is passed through 2LP with identifiers (4) for Q_{pass} times.

One of the fastest program implementations of 2LP can be built within MATLAB with using the training function «traingda». For setting the size of hidden layer of 2LP to 250 neurons at $\sigma_{\text{pixel}}^{(\max)} = 1, C = 2, F = 8, Q_{\text{pass}} = 10$, the results of classifying SMI, when 2LP is trained with PNMI, appear quite unacceptable (figure 1). These results are obtained in routine of the batch testing of 2LP. The results of the letter-by-letter testing of 2LP at some fixed standard deviation for (1) disclose the trend in distribution of recognition errors percentage over letters (figure 2). This trend is seen that there exist letters that are recognized better than others. For instance, letters «I» and «J» are more recognizable, where letter «I» is classified wrong only in every fourth case, roughly. But the averaged recognition errors percentage nonetheless remains inadmissibly high.

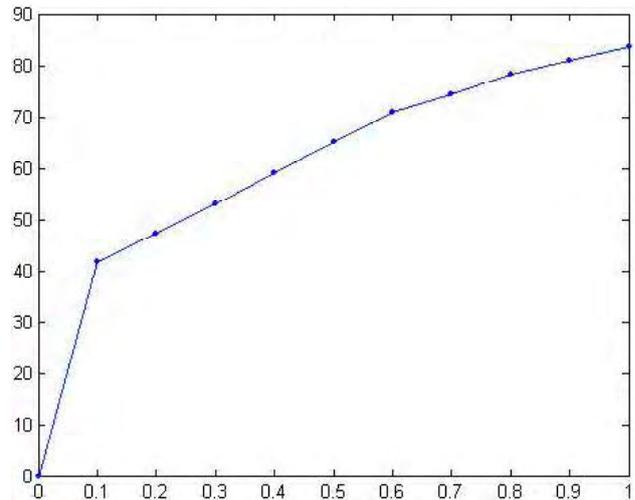


Fig. 1. Percentage of recognition errors p_{error} over standard deviation range $\left[0; \sigma_{\text{shift}}^{(\max)} \right]$ of the shift intensity in SMI by

250 neurons in 2LP hidden layer and $\sigma_{\text{shift}}^{(\max)} = 1, \sigma_{\text{pixel}}^{(\max)} = 0$ (derived from 1000 batch testings of the trained 2LP with PNMI by $\sigma_{\text{pixel}}^{(\max)} = 1, C = 2, F = 8, Q_{\text{pass}} = 10$)

MODEL OF SNMI

Just like in (1), model of PNMI consists in adding the normal noise to the matrix of all 26 images. For one from the three STS-properties, every image should be processed separately. In model of SNMI each image is shifted horizontally and vertically for some number of pixels. Thus the shift constant is from two components, horizontal and vertical, though there may be used the same standard deviation

$$\sigma_{\text{shift}}^{(k)} = \frac{\sigma_{\text{shift}}^{(\max)}}{F} \cdot k \quad \forall k = \overline{1, F} \tag{5}$$

and $\sigma_{\text{shift}}^{(\max)} > 0$ at k -th part of forming the set that feeds the input of 2LP. As there are considered 60-by-80-images then horizontal pixel shift (HPS) is

$$s_{\text{hor}} \left(\sigma_{\text{shift}}^{(k)} \right) = \varphi \left(8 \sigma_{\text{shift}}^{(k)} \cdot \xi_{\text{hor}}(k) \right) \times \frac{1 - \text{sign} \left(\left| \varphi \left(8 \sigma_{\text{shift}}^{(k)} \cdot \xi_{\text{hor}}(k) \right) \right| - 80 \right)}{2} + 80 \cdot \frac{1 + \text{sign} \left(\left| \varphi \left(8 \sigma_{\text{shift}}^{(k)} \cdot \xi_{\text{hor}}(k) \right) \right| - 80 \right)}{2}, \tag{6}$$

where $\xi_{\text{hor}}(k)$ is value of normal variate with zero expectation and unit variance, raffled at the k -th stage for

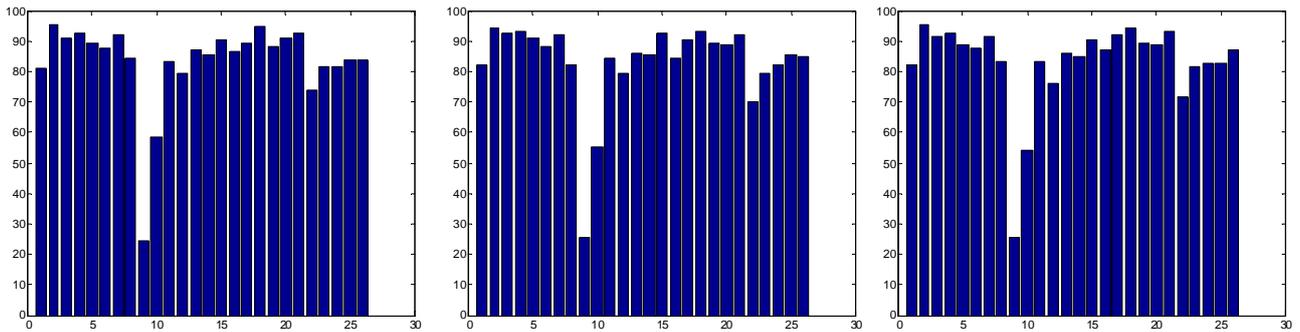


Fig. 2. Distributions of recognition errors percentage over letters at fixed standard deviation $\sigma_{\text{shift}}^{\langle \max \rangle} = 1$ for $\sigma_{\text{pixel}}^{\langle \max \rangle} = 0$ (derived from 1000 testings of the PNMI-trained-and-loaded 2LP at $\sigma_{\text{pixel}}^{\langle \max \rangle} = 1$, $C = 2$, $F = 8$, $Q_{\text{pass}} = 10$)

HPS, and function $\varphi(x)$ rounds x to the nearest integer less than or equal to x . Concurrently, vertical pixel shift (VPS) is

$$s_{\text{ver}}\left(\sigma_{\text{shift}}^{\langle k \rangle}\right) = \varphi\left(6\sigma_{\text{shift}}^{\langle k \rangle} \cdot \xi_{\text{ver}}(k)\right) \times \frac{1 - \text{sign}\left(\left|\varphi\left(6\sigma_{\text{shift}}^{\langle k \rangle} \cdot \xi_{\text{ver}}(k)\right)\right| - 60\right)}{2} + 60 \cdot \frac{1 + \text{sign}\left(\left|\varphi\left(6\sigma_{\text{shift}}^{\langle k \rangle} \cdot \xi_{\text{ver}}(k)\right)\right| - 60\right)}{2}, \quad (7)$$

where $\xi_{\text{ver}}(k)$ is value of normal variate with zero expectation and unit variance, raffled at the k -th stage for VPS.

It is necessarily to mind that the image background is white, whereas in MATLAB the white color is coded with ones. So, contour and filling of letters, being black, are coded with zeros. By the way, the filling is not continuous (figure 3), and the letter black cast is sprinkled with white specks. Hence, adding the horizontal shift noise to q -th image as matrix $\mathbf{A}_q = \left(a_{uv}^{\langle q \rangle}\right)_{60 \times 80}$ changes its elements into the

following. For $s_{\text{hor}}\left(\sigma_{\text{shift}}^{\langle k \rangle}\right) > 0$ these new elements are

$$\tilde{a}_{uv}^{\langle q \rangle}(k) = 1 \text{ for } u = \overline{1, 60} \text{ and } v = \overline{1, s_{\text{hor}}\left(\sigma_{\text{shift}}^{\langle k \rangle}\right)} \quad (8) \quad \text{by}$$

by

$$\tilde{a}_{uv}^{\langle q \rangle}(k) = a_{ut}^{\langle q \rangle} \text{ at } t = v - s_{\text{hor}}\left(\sigma_{\text{shift}}^{\langle k \rangle}\right) \text{ for } u = \overline{1, 60} \text{ and } v = \overline{s_{\text{hor}}\left(\sigma_{\text{shift}}^{\langle k \rangle}\right) + 1, 80}. \quad (9)$$

For $s_{\text{hor}}\left(\sigma_{\text{shift}}^{\langle k \rangle}\right) < 0$ new elements are

A B C W X Y Z

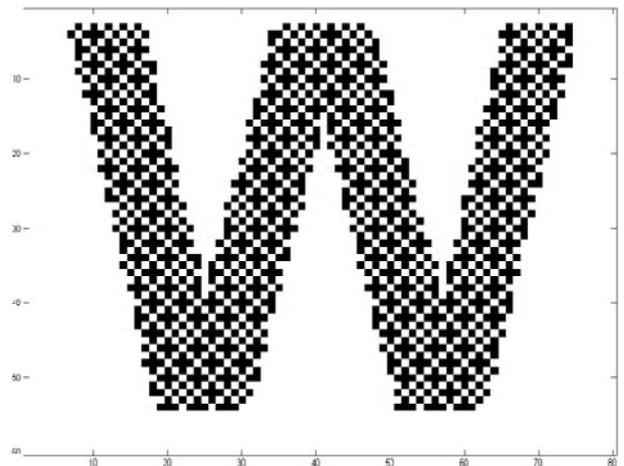


Fig. 3. Monochrome 60-by-80-images of letters, viewed as bitmap files, and the letter «W», viewed within MATLAB, where it can be seen that the letter black cast is sprinkled crosshatch-regularly with white specks

$$\tilde{a}_{uv}^{\langle q \rangle}(k) = a_{ut}^{\langle q \rangle} \text{ at } t = v - s_{\text{hor}}\left(\sigma_{\text{shift}}^{\langle k \rangle}\right)$$

$$\text{for } u = \overline{1, 60} \text{ and } v = \overline{1, 80 + s_{\text{hor}}\left(\sigma_{\text{shift}}^{\langle k \rangle}\right)} \quad (10)$$

$$\tilde{a}_{uv}^{\langle q \rangle}(k) = 1 \text{ for}$$

$$u = \overline{1, 60} \text{ and } v = \overline{80 + s_{\text{hor}}\left(\sigma_{\text{shift}}^{\langle k \rangle}\right) + 1, 80}. \quad (11)$$

Clearly, for $s_{\text{hor}}\left(\sigma_{\text{shift}}^{\langle k \rangle}\right) = 0$ the q -th image is not shifted horizontally:

$$\tilde{a}_{uv}^{\langle q \rangle}(k) = a_{uv}^{\langle q \rangle} \text{ for } u = \overline{1, 60} \text{ and } v = \overline{1, 80}. \quad (12)$$

After that horizontal shift is accomplished, adding the vertical shift noise to the horizontally shifted q -th image as matrix $\tilde{\mathbf{A}}_q(k) = \left[\tilde{a}_{uv}^{(q)}(k) \right]_{60 \times 80}$ changes its elements into the following. For $s_{\text{ver}} \left(\sigma_{\text{shift}}^{(k)} \right) > 0$ these refreshed elements are

$$\tilde{a}_{uv}^{(q)}(k) = \tilde{a}_{rv}^{(q)}(k) \text{ at } r = u + s_{\text{ver}} \left(\sigma_{\text{shift}}^{(k)} \right)$$

$$\text{for } u = \overline{1, 60 - s_{\text{ver}} \left(\sigma_{\text{shift}}^{(k)} \right)} \text{ and } v = \overline{1, 80} \quad (13)$$

by

$$\tilde{a}_{uv}^{(q)}(k) = 1 \text{ for}$$

$$u = \overline{60 - s_{\text{ver}} \left(\sigma_{\text{shift}}^{(k)} \right) + 1, 60} \text{ and } v = \overline{1, 80}. \quad (14)$$

For $s_{\text{ver}} \left(\sigma_{\text{shift}}^{(k)} \right) < 0$ new elements are

$$\tilde{a}_{uv}^{(q)}(k) = 1 \text{ for } u = \overline{1, -s_{\text{ver}} \left(\sigma_{\text{shift}}^{(k)} \right)} \text{ and } v = \overline{1, 80} \quad (15)$$

by

$$\tilde{a}_{uv}^{(q)}(k) = \tilde{a}_{rv}^{(q)}(k) \text{ at } r = u + s_{\text{ver}} \left(\sigma_{\text{shift}}^{(k)} \right)$$

$$\text{for } u = \overline{-s_{\text{ver}} \left(\sigma_{\text{shift}}^{(k)} \right) + 1, 60} \text{ and } v = \overline{1, 80}. \quad (16)$$

Clearly, for $s_{\text{ver}} \left(\sigma_{\text{shift}}^{(k)} \right) = 0$ the q -th horizontally shifted image is not shifted vertically:

$$\tilde{a}_{uv}^{(q)}(k) = \tilde{a}_{uv}^{(q)}(k) \text{ for } u = \overline{1, 60} \text{ and } v = \overline{1, 80}. \quad (17)$$

After all 26 images have become SNMI, each q -th image as matrix $\tilde{\mathbf{A}}_q(k) = \left[\tilde{a}_{uv}^{(q)}(k) \right]_{60 \times 80}$ is reshaped into 4800-length-column, $q = \overline{1, 26}$. Then the matrix $\mathbf{A}_{\text{shift}}^{(k)} = \left[\tilde{a}_{jq}^{(k)} \right]_{4800 \times 26}$ of all 26 SNMI, reshaped into 26 columns, is included into the training set

$$\tilde{\mathbf{P}}_{\text{train}} = \left\{ \tilde{\mathbf{P}}_i \right\}_{i=1}^{C+F} = \left\{ \left\{ \mathbf{A} \right\}_{l=1}^C, \left\{ \mathbf{A}_{\text{shift}}^{(k)} \right\}_{k=1}^F \right\} \quad (18)$$

that feeds the input of 2LP, passing through 2LP with identifiers (4) for Q_{pass} times.

Once again, for setting the size of hidden layer of 2LP to 250 neurons at $\sigma_{\text{shift}}^{(\max)} = 1$, $C = 2, F = 8$, $Q_{\text{pass}} = 10$, and using the training MATLAB-function «traingda», the results of classifying SMI, when 2LP is trained with SNMI and batch-tested, still appear unsatisfactory (figure 4). However, now these results are much better than those ones, derived from 1000 batch testings of the PNMI-trained 2LP in figure 1. But the training process for SNMI is running very lingeringly. Besides, this process may frequently be non-convergent, where some performance goals aren't met, or minimum gradient is reached just after the first pass (in this case 2LP cannot be called the trained with SNMI). The results of the letter-by-letter testing of the SNMI-trained 2LP at some fixed standard deviation for (6) and (7) disclose the peculiar trend in distribution of recognition errors percentage over letters (figure 5), where letters «I» and «L» are the most recognizable, whereas letters «G», «K», «O», «R», «V» are classified wrong in every second case, roughly. The averaged recognition errors percentage, being lower than for the PNMI-trained 2LP, nonetheless remains high.

Having analyzed the performance of the SNMI-lingering-trained 2LP, there is a proposition to shorten the training process by modifying the type of noise. It is verisimilar that adding some pixel noise along with not increasing or lowering the shift intensity may relatively accelerate the training process of 2LP. Also it may decrease the recognition errors percentage. So, the following model is for making pixel-shift-noised monochrome images (PSNMI) to feed the input of 2LP, as neither PNMI-trained 2LP, nor SNMI-trained 2LP is the good classifier of SMI.

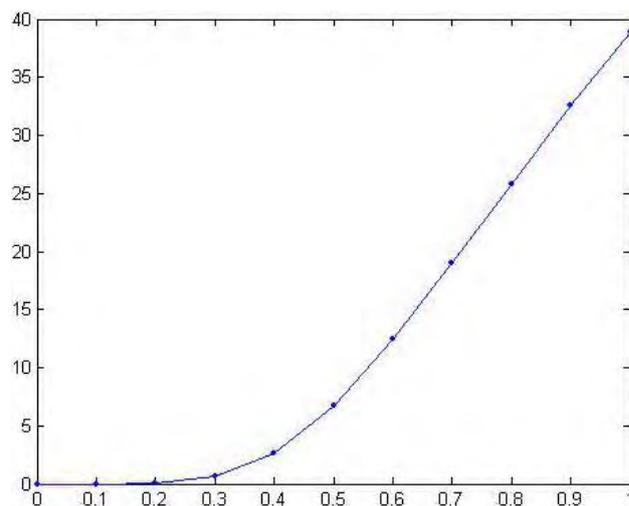


Fig. 4. Percentage of recognition errors p_{error} over standard deviation range $\left[0; \sigma_{\text{shift}}^{(\max)} \right]$ by 250 neurons in 2LP hidden layer and $\sigma_{\text{shift}}^{(\max)} = 1$, $\sigma_{\text{pixel}}^{(\max)} = 0$ (derived from 1000 batch testings of the trained 2LP with SNMI by $\sigma_{\text{shift}}^{(\max)} = 1$, $C = 2$, $F = 8$, $Q_{\text{pass}} = 10$)

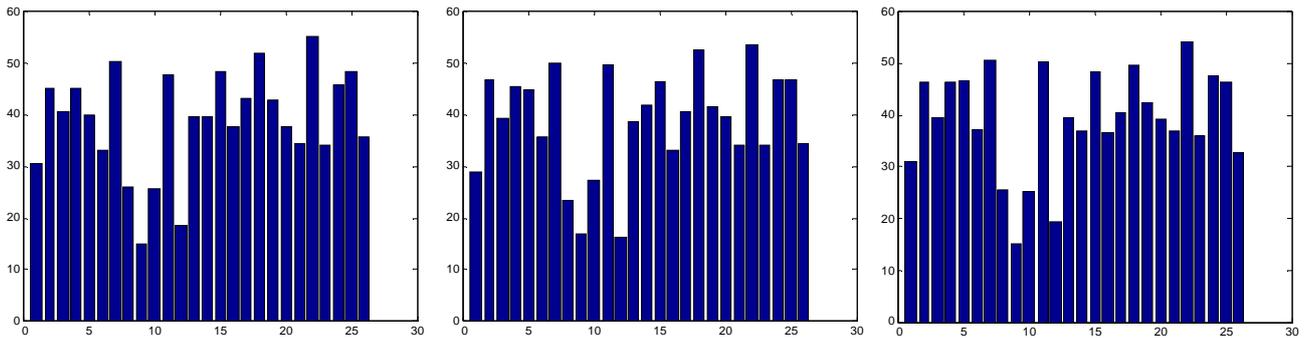


Fig. 5. Distributions of recognition errors percentage over letters at fixed standard deviation $\sigma_{\text{shift}}^{\langle \max \rangle} = 1$ for $\sigma_{\text{pixel}}^{\langle \max \rangle} = 0$ (derived from 1000 testings of the SNMI-trained-and-loaded 2LP at $\sigma_{\text{shift}}^{\langle \max \rangle} = 1$, $C = 2$, $F = 8$, $Q_{\text{pass}} = 10$)

MODEL OF PSNMI

The main principle in modeling PSNMI is that there firstly should be accomplished HPS (6) and VPS (7) for consecutive

transformation of matrices $\{\mathbf{A}_q\}_{q=1}^{26} = \left\{ \left[a_{uv}^{(q)} \right]_{60 \times 80} \right\}_{q=1}^{26}$

through $\{\tilde{\mathbf{A}}_q(k)\}_{q=1}^{26} = \left\{ \left[\tilde{a}_{uv}^{(q)}(k) \right]_{60 \times 80} \right\}_{q=1}^{26}$ and

$\{\tilde{\tilde{\mathbf{A}}}_q(k)\}_{q=1}^{26} = \left\{ \left[\tilde{\tilde{a}}_{uv}^{(q)}(k) \right]_{60 \times 80} \right\}_{q=1}^{26}$ into the matrix

$\mathbf{A}_{\text{shift}}^{(k)} = \left[\tilde{\tilde{a}}_{jq}^{(k)} \right]_{4800 \times 26}$ at k -th part of forming the set

that feeds the input of 2LP by (5). With the matrix $\mathbf{A}_{\text{shift}}^{(k)}$ there follows the model of PNMI (1), that is

$$\mathbf{A}_{\text{pixel-shift}}^{(k)} = \mathbf{A}_{\text{shift}}^{(k)} + \sigma_{\text{pixel}}^{(k)} \cdot \Xi \quad (19)$$

by (2) and (5). For PSNMI the input of 2LP is fed with the training set

$$\tilde{\mathbf{P}}_{\text{train}} = \{\tilde{\mathbf{P}}_i\}_{i=1}^{C+F} = \left\{ \left\{ \mathbf{A} \right\}_{l=1}^C, \left\{ \mathbf{A}_{\text{pixel-shift}}^{(k)} \right\}_{k=1}^F \right\} \quad (20)$$

of C replicas of undistorted images and pixel-shift-distorted images by the set of identifiers (4).

Let $\sigma_{\text{shift}}^{\langle \max \rangle} = \sigma_{\text{pixel}}^{\langle \max \rangle} = 1$. The training process under such relationship is pretty hard: there are needed many passes, lasting for great numbers of epochs; the weak convergence is very likely, and the hang-up is observed after first 20–30 passes are completed. That means that for covering the bad shift noise (shift noise of high intensity) the standard deviations $\sigma_{\text{shift}}^{\langle \max \rangle}$ and $\sigma_{\text{pixel}}^{\langle \max \rangle}$ mustn't be equal. Truly, here pixel distortion should be either strengthened or loosened. Thus let $\sigma_{\text{shift}}^{\langle \max \rangle} = 1 = \frac{2}{3} \sigma_{\text{pixel}}^{\langle \max \rangle}$. Unfortunately,

under this ratio the training process has the same weak convergence, and its hopeless hang-up is observed after first 20–30 passes are completed. Moreover, if to vary the ratio between $\sigma_{\text{shift}}^{\langle \max \rangle}$ and $\sigma_{\text{pixel}}^{\langle \max \rangle}$ by setting strictly

$\sigma_{\text{shift}}^{\langle \max \rangle} = 1$ then the training process hangs for any $\sigma_{\text{pixel}}^{\langle \max \rangle} > 0,5$. Letting $\sigma_{\text{shift}}^{\langle \max \rangle} = 1 = 2\sigma_{\text{pixel}}^{\langle \max \rangle}$, after having been trained with the set (20) for $Q_{\text{pass}} > 100$, the PSNMI-trained 2LP produces yet higher performance, which is still unsatisfactory. For $\sigma_{\text{shift}}^{\langle \max \rangle} = 1 = 4\sigma_{\text{pixel}}^{\langle \max \rangle}$ and $Q_{\text{pass}} > 150$, the PSNMI-trained 2LP produces yet higher performance than the SNMI-trained 2LP (figure 6) over standard deviation range $\left[0; \sigma_{\text{shift}}^{\langle \max \rangle} \right] = [0; 1]$. Testing the PSNMI-trained 2LP for classifying SMI letter-by-letter at the highest noise intensity certifies it (figure 7).

Clearly that the greater Q_{pass} the lower p_{error} over standard deviation range $\left[0; \sigma_{\text{shift}}^{\langle \max \rangle} \right]$ is, although it lingers the training process almost to the long while as it for the SNMI-trained 2LP is (and much longer). However, for the PSNMI-trained 2LP by $\sigma_{\text{shift}}^{\langle \max \rangle} = 4\sigma_{\text{pixel}}^{\langle \max \rangle} = 1$ almost 30–40 passes performance goals are met, and 2LP can be trained with SNMI with many unmet performance goals. Letting standard deviations $\sigma_{\text{shift}}^{\langle \max \rangle}$ and $\sigma_{\text{pixel}}^{\langle \max \rangle}$ be different from their relationship $\sigma_{\text{shift}}^{\langle \max \rangle} = 4\sigma_{\text{pixel}}^{\langle \max \rangle} = 1$ may slightly change trends in figures 6 and 7, but upon the whole, the trained 2LP with PSNMI by $Q_{\text{pass}} = 234$ is the good classifier of SMI, especially when the shift intensity is defined within standard deviation range $(0; 0,4]$. The averaged recognition errors percentage doesn't exceed 3,5 %, and this 2LP performs well in classifying shifted monochrome 60-by-80-images at maximal intensity shift noise, when HPS and VPS are about 10–20 pixels and $p_{\text{error}} \approx 15$ with nearly

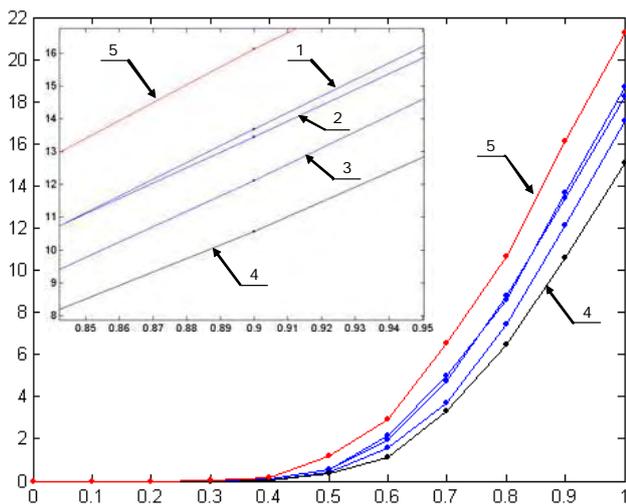


Fig. 6. Percentage of recognition errors p_{error} over standard deviation range $[0; \sigma_{\text{shift}}^{\langle \max \rangle}]$ by 250 neurons in 2LP hidden

layer and $\sigma_{\text{shift}}^{\langle \max \rangle} = 1, \sigma_{\text{pixel}}^{\langle \max \rangle} = 0$:

1 – derived from 1000 batch testings of the trained 2LP with

PSNMI by $\sigma_{\text{shift}}^{\langle \max \rangle} = 4\sigma_{\text{pixel}}^{\langle \max \rangle} = 1, C = 2, F = 8,$

$Q_{\text{pass}} = 175$ (total traintime is 278548 epochs); 2 – derived from 1000 batch testings of the trained 2LP with PSNMI

by $\sigma_{\text{shift}}^{\langle \max \rangle} = 4\sigma_{\text{pixel}}^{\langle \max \rangle} = 1, C = 2, F = 8, Q_{\text{pass}} = 200$ (total traintime is 315134 epochs) 3 – derived from 1000 batch testings of the trained 2LP with PSNMI by

$\sigma_{\text{shift}}^{\langle \max \rangle} = 4\sigma_{\text{pixel}}^{\langle \max \rangle} = 1, C = 2, F = 8, Q_{\text{pass}} = 225$ (total traintime is 329376 epochs); 4 – derived from 1000 batch testings of the trained 2LP with PSNMI by

$\sigma_{\text{shift}}^{\langle \max \rangle} = 4\sigma_{\text{pixel}}^{\langle \max \rangle} = 1, C = 2, F = 8, Q_{\text{pass}} = 234$ (total traintime is 339971 epochs); 5 – derived from 1000 batch

testings of the trained 2LP with SNMI by $\sigma_{\text{shift}}^{\langle \max \rangle} = 1, C = 2, F = 8, Q_{\text{pass}} = 100$ (total traintime is 229646 epochs)

every seventh letter is classified wrong (note that letter «I» is the most recognizable, but letter «D» is classified wrong in every fourth case).

CONCLUSION

Problems of classification of SMI are more widespread than problems of classifying PNMI. But the PSNMI-trained 2LP may classify SMI with pixel distortion successfully also, as the training set (20) contains modeled PNMI. The pattern for a monochrome 60-by-80-image, used here, is obviously not general. Nevertheless, the letter is just a model of image, wherewith 2LP can be tested for SMI classifier. And those tests proved that introducing the model of PNMI into the model of SNMI shortens the training process of 2LP and improves its performance in classifying SMI or SMI with pixel distortion. Hence, 2LP is capable to ensure high performance for SMI. There only stays the question of in what ratio standard deviations $\sigma_{\text{shift}}^{\langle \max \rangle}$ and $\sigma_{\text{pixel}}^{\langle \max \rangle}$ should be taken, that is how badly SMI must be distorted to reach the optimal traintime and recognition errors percentage. This question will be examined in further investigations.

SPISOK LITERATURY

1. *Arulampalam, G.* A generalized feedforward neural network architecture for classification and regression / G. Arulampalam, A. Bouzerdoum // *Neural Networks*. – 2003. – Volume 16, Issues 5–6. – P. 561–568.
2. *Hagan, M. T.* Neural Networks for Control / M. T. Hagan, H. B. Demuth // *Proceedings of the 1999 American Control Conference, San Diego, CA*. – 1999. – P. 1642–1656.
3. *Benardos, P. G.* Optimizing feedforward artificial neural network architecture / P. G. Benardos, G.-C. Vosniakos // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2007. – Volume 20, Issue 3. – P. 365–382.
4. *Hagan, M. T.* Training feedforward networks with the Marquardt algorithm / M. T. Hagan, M. B. Menhaj // *IEEE Transactions on Neural Networks*. – 1994. – Volume 5, Issue 6. – P. 989–993.
5. *Yu, C.* An efficient hidden layer training method for the multilayer perceptron / C. Yu, M. T. Manry, J. Li, P. L. Narasimha // *Neurocomputing*. – 2006. – Volume 70, Issues 1 – 3. – P. 525–535.

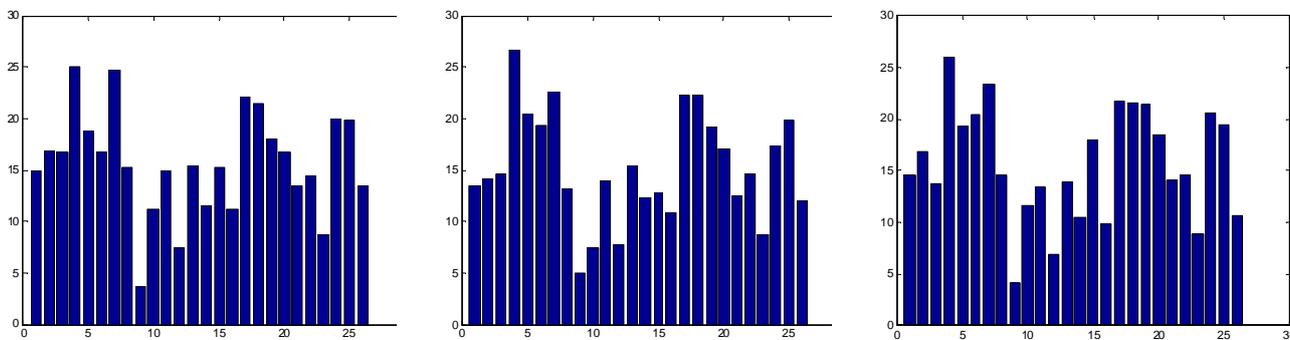


Fig. 7. Distributions of recognition errors percentage over letters at fixed standard deviation $\sigma_{\text{shift}}^{\langle \max \rangle} = 1$ for $\sigma_{\text{pixel}}^{\langle \max \rangle} = 0$ (derived from 1000 testings of the PSNMI-trained-and-loaded 2LP at $\sigma_{\text{shift}}^{\langle \max \rangle} = 4\sigma_{\text{pixel}}^{\langle \max \rangle} = 1, C = 2, F = 8, Q_{\text{pass}} = 234$)

6. *Fukushima, K.* Neocognitron: A self-organizing neural network model for a mechanism of pattern recognition unaffected by shift in position / *K. Fukushima // Biological Cybernetics.* – 1980. – Volume 36, Issue 4. – P. 193–202.
7. *Fukushima, K.* Neocognitron: A hierarchical neural network capable of visual pattern recognition / *K. Fukushima // Neural Networks.* – 1988. – Volume 1, Issue 2. – P. 119–130.
8. *Hagiwara, K.* Upper bound of the expected training error of neural network regression for a Gaussian noise sequence / *K. Hagiwara, T. Hayasaka, N. Toda, S. Usui, K. Kuno // Neural Networks.* – 2001. – Volume 14, Issue 10. – P. 1419–1429.
9. *Романюк, В. В.* Зависимость производительности нейросети с прямой связью с одним скрытым слоем нейронов от гладкости ее обучения на зашумленных копиях алфавита образов / *В. В. Романюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.* – 2013. – № 1. – С. 201–206.

Стаття надійшла до редакції 10.10.2013.

Романюк В. В.

Канд. техн. наук, доцент, Хмельницький національний університет, Україна

ВЫСОКАЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ДВУХСЛОЙНОГО ПЕРСЕПТРОНА В КЛАССИФИКАЦИИ МОНОХРОМНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ФОРМАТА 60-НА-80 СО СДВИГОМ НА ОСНОВЕ ОБУЧЕНИЯ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ СО СДВИГОМ И ПИКСЕЛЬНЫМИ ИСКАЖЕНИЯМИ В НАБОРЕ ИЗ 26 АЛФАВИТНЫХ БУКВ

Рассматривается задача объектной классификации, где могут применяться неокогнитрон и многослойный перцептрон. Поскольку неокогнитрон, решая практически любую задачу классификации, работает слишком медленно и затратно, то для распознавания монохромных изображений со сдвигом предлагается испробовать двухслойный перцептрон, хотя он является быстродействующим только для монохромных изображений с пиксельными искажениями. Предложив набор оригинальных изображений из 26 монохромных изображений букв английского алфавита формата 60-на-80, формулируется задача выяснить, способен ли двухслойный перцептрон обеспечить высокую производительность при классификации монохромных изображений со сдвигом. Соответственно обнаруживается, что двухслойный перцептрон работает как хороший классификатор монохромных изображений со сдвигом, когда при обучении на его вход поступают обучающие выборки из изображений со сдвигом, пиксели которых искажены. Для этого, однако, может потребоваться больше проходов обучающих выборок через двухслойный перцептрон, но тем не менее общее время обучения будет меньше, чем для обучения двухслойного перцептрона лишь на монохромных изображениях со сдвигом без пиксельных искажений.

Ключевые слова: объектная классификация, неокогнитрон, перцептрон, пиксельное искажение, сдвиг, монохромные изображения, монохромные изображения со сдвигом.

Романюк В. В.

Канд. техн. наук, доцент, Хмельницький національний університет, Україна

ВИСОКА ПРОДУКТИВНІСТЬ ДВОШАРОВОГО ПЕРСЕПТРОНУ В КЛАСИФІКАЦІЇ МОНОХРОМНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ФОРМАТУ 60-НА-80 ЗІ ЗСУВОМ НА ОСНОВІ НАВЧАННЯ ПО ЗОБРАЖЕННЯМ ЗІ ЗСУВОМ ТА ПІКСЕЛЬНИМИ СПОТВОРЕННЯМИ У НАБОРІ З 26 АЛФАВИТНИХ ЛІТЕР

Розглядається задача об'єктної класифікації, де можуть застосовуватись неокогнітрон і багатосаровий перцептрон. Оскільки неокогнітрон, розв'язуючи практично будь-яку задачу класифікації, працює занадто повільно і затратно, то для розпізнавання монохромних зображень зі зсувом пропонується випробувати двошаровий перцептрон, хоча він є швидкодіючим тільки для монохромних зображень з пиксельними спотвореннями. Запропонувавши набір оригінальних зображень з 26 монохромних зображень літер англійського алфавіту формату 60-на-80, формулюється задача в'яснити, чи здатен двошаровий перцептрон забезпечити високу продуктивність при класифікації монохромних зображень зі зсувом. Відповідно виявляється, що двошаровий перцептрон працює як хороший класифікатор монохромних зображень зі зсувом, коли при навчанні на його вхід поступають навчальні вибірки зображень зі зсувом, пікселі яких спотворені. Для цього, однак, може знадобитись більше проходів навчальних вибірок через двошаровий перцептрон, але тим не менше загальний час навчання буде меншим, ніж для навчання двошарового перцептрону лише на монохромних зображеннях зі зсувом без піксельних спотворень.

Ключові слова: об'єктна класифікація, неокогнітрон, перцептрон, піксельне спотворення, зсув, монохромні зображення, монохромні зображення зі зсувом.

REFERENCES

1. Arulampalam G., Bouzerdoum A. A generalized feedforward neural network architecture for classification and regression, *Neural Networks*, 2003, Vol. 16, Iss. 5–6, pp. 561–568.
2. Hagan M. T., Demuth H. B. *Neural Networks for Control, Proceedings of the 1999 American Control Conference*, San Diego, CA, 1999, pp. 1642–1656.
3. Benardos P. G., Vosniakos G.-C. Optimizing feedforward artificial neural network architecture, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2007, Vol. 20, Iss. 3, pp. 365–382.
4. Hagan M. T., Menhaj M. B. Training feedforward networks with the Marquardt algorithm, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1994, Vol. 5, Iss. 6, pp. 989–993.
5. Yu C., Manry M. T., Li J., Narasimha P. L. An efficient hidden layer training method for the multilayer perceptron, *Neurocomputing*, 2006, Vol. 70, Iss. 1 – 3, pp. 525–535.
6. Fukushima K. Neocognitron: A self-organizing neural network model for a mechanism of pattern recognition unaffected by shift in position, *Biological Cybernetics*, 1980, Vol. 36, Iss. 4, pp. 193–202.
7. Fukushima K. Neocognitron: A hierarchical neural network capable of visual pattern recognition, *Neural Networks*, 1988, Vol. 1, Iss. 2, pp. 119–130.
8. Hagiwara K., Hayasaka T., Toda N., Usui S., Kuno K. Upper bound of the expected training error of neural network regression for a Gaussian noise sequence, *Neural Networks*, 2001, Vol. 14, Iss. 10, pp. 1419–1429.
9. Romanuk V. V. Dependence of performance of feed-forward neuronet with single hidden layer of neurons against its training smoothness on noised replicas of pattern alphabet, *Bulletin of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 2013, No. 1, pp. 201–206.

¹Ph. D. student in Artificial Intelligence, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine, E-mail: alinashafronenko@gmail.com

²Ph.D. (Candidate of Technical Science), Leading Researcher, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine

³Professor, Dr.-Ing. habil., Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine

THE EVOLVING ADAPTIVE NEURAL NETWORK FOR DATA PROCESSING WITH MISSING OBSERVATIONS

The problem of computational intelligence systems synthesis in on-line mode, capable for processing stochastic signals with missing observations in the data is considered. An adaptive approach based on using of orthogonal polynomials is developed.

Keywords: neural network, orthogonal polynomials, Chebyshev polynomials, incomplete data with missing observations.

INTRODUCTION

Artificial neural networks, neuro-fuzzy systems, hybrid systems of computational intelligence currently are widespread for solving data processing problems, Data Mining, prediction, identification and control of nonlinear stochastic and chaotic objects and systems [1–5].

The most attractive properties of these systems are their universal approximation properties and learning ability, usually understood as a possibility of tuning the parameters by optimizing some quality criterion (objective function, learning criterion). In a wider sense, it is possible to configure the system architecture too. Currently, there exist number of approaches, but the most widely used is so-called constructive approach in which the system of computational intelligence, starting with the simplest architecture, gradually increasing its complexity and at the same time tuning their parameters to achieve the desired quality of the solution. This approach has formed a new direction in computational intelligence, known as evolving systems [6, 7]. At the same time, most of these systems process information in a batch mode, which makes them difficult to use in cases where the data for processing are fed in on-line mode in the form of time series.

In many practical applications involving the processing of sequences of real data, there exists situation when some observations of the controlled time series, for whatever reasons, are missing (lost). It is understood that for the normal operation of the neural network or a hybrid system, these missing data must somehow be restored. The problem of restoring the missing values has received sufficient attention [8–10], in this case as the most effective are neural networks [11–14]. However, the known approaches for restoration of missing values in time series are effective only in cases when the whole data set is given a priori, the amount of missing values is known, and the time series has a fixed number of observations. It is natural that in problems where data are fed for processing in real time, the number of missing values is unknown beforehand and the sequence has nonstationary character, the known approaches are ineffective.

So, the problem of synthesis of computational intelligence systems in on-line mode, capable for processing stochastic signals with missing observation in the data is interesting and useful.

SEQUENTIAL RESTORATION OF MISSING OBSERVATIONS IN THE TIME SERIES

The proposed approach is based on the use of classical orthogonal polynomials [15] and first of all Chebyshev polynomials (T-systems) [16, 17], that have a number of good properties in terms of the approximation problem using quadratic criterion [16].

Generally Chebyshev polynomials can be compactly represented using trigonometric functions

$$T_l(x) = \cos(l \arccos x), \quad x \in [-1, 1], \quad l = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

or using recurrent relation

$$T_l(x) = 2xT_{l-1}(x) - T_{l-2}(x). \quad (2)$$

In some situations it is easier to solve the problem in the interval $x \in [0, 1]$, which can be used with biased Chebyshev polynomials:

$$T_l^B(x) = T_l(2x - 1), \quad (3)$$

$$T_l^B(x) = (4x - 2)T_{l-1}^B(x) - T_{l-2}^B(x). \quad (4)$$

It is also easy to write biased polynomials for any interval $x \in [x_{\min}, x_{\max}]$.

To approximate arbitrary function of a scalar argument $y = f(x)$ given on a set of nodes $x_1, x_2, \dots, x_N; y_1, y_2, \dots, y_N$, let us transform the original data using simple relations

$$\tilde{x}_k = 2 \frac{x_k - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} - 1;$$

$$\tilde{y}_k = 2 \frac{y_k - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} - 1, \quad k = 1, 2, \dots, N$$

for the polynomials (1), (2) and

$$\tilde{x}_k = \frac{x_k - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}; \quad \tilde{y}_k = \frac{y_k - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}}, \quad k = 1, 2, \dots, N$$

for (3), (4) and write approximating T-system as

$$T_h^\Sigma(\tilde{x}) = \sum_{l=0}^h w_l T_l(\tilde{x}),$$

whose parameters w_l are determined by the simple relation

$$w_l = \frac{\sum_{k=1}^N \tilde{y}_k T_l(\tilde{x}_k)}{\sum_{k=1}^N T_l^2(\tilde{x}_k)},$$

with conditions of orthogonality.

It is easy to see that these expressions are standard estimates of least squares. The values $T_l(\tilde{x}_k)$ are calculated using the recurrent relations

$$T_0(\tilde{x}_k) = \tilde{x}_k - b_1,$$

$$T_l(\tilde{x}_k) = (\tilde{x}_k - b_l)T_{l-1}(\tilde{x}_k) - a_l T_{l-2}(\tilde{x}_k),$$

$$a_l = \frac{\sum_{k=1}^N \tilde{x}_k^{l-1} T_{l-1}(\tilde{x}_k)}{\sum_{k=1}^N \tilde{x}_k^{l-2} T_{l-2}(\tilde{x}_k)},$$

$$b_l = \frac{\sum_{k=1}^N \tilde{x}_k^l T_{l-1}(\tilde{x}_k)}{\sum_{k=1}^N \tilde{x}_k^{l-1} T_{l-1}(\tilde{x}_k)} - \frac{\sum_{k=1}^N \tilde{x}_k^{l-1} T_{l-2}(\tilde{x}_k)}{\sum_{k=1}^N \tilde{x}_k^{l-2} T_{l-2}(\tilde{x}_k)},$$

and achievable accuracy of approximation – based on the variance

$$\sigma_h^2 = \sigma_{h-1}^2 - w_h^2 \sum_{k=1}^N \tilde{x}_k^h T_h(\tilde{x}_k),$$

$$\sigma_0^2 = \sum_{k=1}^N \tilde{y}_k^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{k=1}^N \tilde{y}_k \right)^2.$$

Next, consider the time series \tilde{x}_k , $k = 1, 2, \dots, N$ and introduce approximating T-system

$$T_h^\Sigma(k) = \sum_{l=0}^h w_l T_l(k), \quad (5)$$

but in this case, we assume that at some moments in the discrete time k measurements or have not been done or lost.

Let's introduce two subsets: $X_P = \{\tilde{x}_k, k\}$, that contains $N_P \leq N$ available observations and $X_G = \{k\}$, contains moments with missing observations.

Then the coefficients of the approximating polynomial can be calculated using the following relations:

$$w_l = \frac{\sum_{\substack{k=1 \\ k \in X_P}}^N \tilde{x}_k T_{lN}(k)}{\sum_{\substack{k=1 \\ k \in X_P}}^N T_{lN}^2(k)},$$

$$w_0 = \frac{1}{N_P} \sum_{\substack{k=1 \\ k \in X_P}}^N \tilde{x}_k,$$

where index N in T_{lN} means that the corresponding polynomials are orthogonal on the interval $k \in [1, N]$.

After this it is easy to restore the missing observations in the form

$$\hat{x}_k = \sum_{l=0}^h w_l T_{lN}(k) \quad \forall k \in X_G.$$

Combining the available ($\tilde{x}_k \in X_P$) and restored ($\hat{x}_k \in X_G$) values of the time series, it's possible to form a sequence containing all N values, referred $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_N$.

Next, let's introduce the parameter vector $w = (w_0, w_1, \dots, w_h)^T$ and T-system of orthogonal polynomials $T_N(k) = (T_{0N}(k), T_{1N}(k), \dots, T_{hN}(k))^T$ and rewrite (5) in vector form

$$T_h^\Sigma(k) = w^T T_N(k),$$

where vector w is calculated by the standard method of least squares

$$w(N) = \left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \in X_P}}^N T_N(k) T_N^T(k) \right)^{-1} \sum_{\substack{k=1 \\ k \in X_P}}^N T_N(k) \tilde{x}_k =$$

$$= P(N) \sum_{\substack{k=1 \\ k \in X_P}}^N T_N(k) \tilde{x}_k. \quad (6)$$

After that we can finally write

$$\begin{cases} \hat{x}_k = w^T(N) T_N(k) \forall k \in X_G, \\ \hat{x}_k = \tilde{x}_k \forall k \in X_P. \end{cases} \quad (7)$$

Using relations (6) and (7) processing is realized in batch mode for a fixed number of points N . If the data are fed to the processing sequentially we have to organize on-line data processing. In [17] for this purpose it was proposed to use recurrent least-squares method in the form

$$\begin{cases} w(N) = w(N-1) + \frac{P(N-1)(\tilde{x}_N - w^T(N-1)T_N(N))}{1 + T_N^T(N)P(N-1)T_N(N)} T_N(N), \\ P(N) = P(N-1) - \frac{P(N-1)T_N(N)T_N^T(N)P(N-1)}{1 + T_N^T(N)P(N-1)T_N(N)}, \end{cases} \quad (8)$$

but it should be noted that with the arrival of the new $(N + 1)$ -th observation \tilde{x}_{N+1} , the structure of the approximating polynomials essentially changes, so that $T_N(k) \neq T_{N+1}(k)$. It is clear that this fact significantly complicates the realization of on-line processing. To keep the structure of the approximating polynomials, we can organize data processing on a sliding window s , with at each moment k , we will use the computer time $\tilde{k} = 1, 2, \dots, s$, connected with real time so that the calculations are provided only in moments $k - s + 1, k - s + 2, \dots, k$,

$$\begin{cases} T_{0s}(\tilde{k}) = \frac{1}{\sqrt{s}}, \\ T_{1s}(\tilde{k}) = \sqrt{\frac{3}{s(s^2-1)}}(2\tilde{k}-s-1), \\ T_{ls}(\tilde{k}) = (a_l\tilde{k} + b_l)T_{l-1,s}(\tilde{k}) - c_lT_{l-2,s}(\tilde{k}), l = 2, 3, \dots, h, \\ a_l = \frac{2}{l} \sqrt{\frac{d_l(d_l-2)}{g_l}}, \\ b_l = -\frac{s+1}{l} \sqrt{\frac{d_l(d_l-2)}{g_l}} = -\frac{s+1}{2} a_l, \\ c_l = \frac{l-1}{l} \sqrt{\frac{d_l(d_l+g_l-2)}{(d_l-4)g_l}}, \\ d_l = 2l+1, \\ g_l = s^2 - l^2. \end{cases} \quad (9)$$

Then the estimate of type (6) with the fixed structure of the polynomials $T_s(N)$ can be written as

$$\begin{aligned} w_s(N) &= \left(\sum_{\substack{\tilde{k}=1, \\ k=N-s+1 \\ k \in X_p}}^{s,N} T_s(\tilde{k})T_s^T(\tilde{k}) \right)^{-1} \sum_{\substack{\tilde{k}=1, \\ k=N-s+1 \\ k \in X_p}}^{s,N} T_s(\tilde{k})\tilde{x}_k = \\ &= P_s(N) \sum_{\substack{\tilde{k}=1, \\ k=N-s+1 \\ k \in X_p}}^{s,N} T_s(\tilde{k})T_s^T(\tilde{k}) \end{aligned} \quad (10)$$

and estimates of missing observations

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{\tilde{k}} = w_s^T(N)T_s(\tilde{k}) \quad \forall k \in X_G.$$

Implementation of the described approach is very convenient with the apparatus of artificial neural networks using ortho-synapse [18], shown in Fig. 1 and trained by the algorithm (10). Ortho-synapse on the structure coincides with the nonlinear synapse of neo-fuzzy neuron [19, 20], but instead of the membership functions it contains the orthogonal activation functions T_{ls} , making the learning process easier and quicker. It is also important that due to using of a sliding window, these activation functions are not changed in the learning process. The value of the sliding window is selected from empirical considerations $s \geq h + 1$. Thus if approximating sequence is nonstationary, the value should not significantly exceed the number of parameter estimates.

ARCHITECTURE OF ORTHOGONAL NEURAL NETWORK

Using orthogonal polynomials as activation functions leads to the creation of a whole group of orthogonal neural networks [21–29] possessing good approximating properties and high speed learning of synaptic weights. In [30–33] growing orthogonal networks based on the ortho-synapses and ortho-neurons have been proposed [18]. These networks are characterized by simplicity of learning of synaptic weights and architecture.

Fig. 2 shows the architecture of orthogonal neural network for data processing with the lost observations that implements a nonlinear mapping

$$\hat{y}_k = \hat{f}(\hat{x}_k) = \sum_{i=1}^n \sum_{l=0}^h w_{li} T_{li}(\hat{x}_{ki}), \quad (11)$$

where $k = 1, 2, \dots$ – current discrete time, w_{li} – tuned synaptic weights, $T_{li}(\bullet)$ – l -th orthogonal activation function of the type (1) or (3) for the input signal \hat{x}_{ki} , $i = 1, 2, \dots, n$.

At the zero (receptive) layer of the network series of observations \tilde{x}_{ki} containing a priori unknown number of missing values are fed. Note also that the external training signal \tilde{y}_k also can contain gaps.

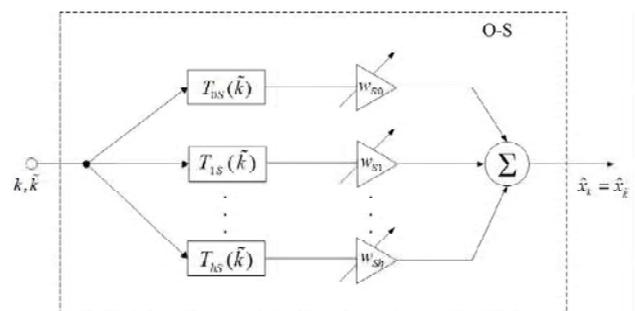


Fig. 1. Ortho-synapse

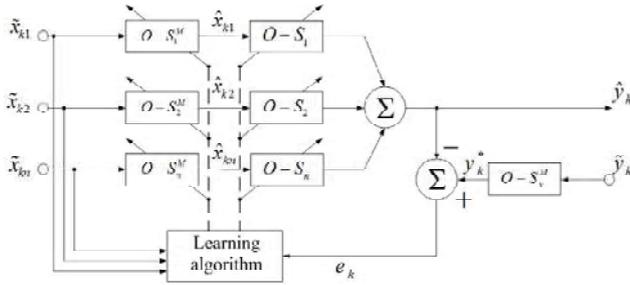


Fig. 2. The orthogonal neural network for data processing with the lost observations

The first hidden layer of the network is formed by n ortho-synapses $O-S_i^M$ and serves to restore missing observations.

The same function for the reference training signal \tilde{y}_k performs ortho synapse $O-S_y^M$. As a result, in on-line mode the time series formed us \hat{x}_{ki}, y_k^* . The output layer is formed by ortho-neuron that coincides with the architecture of neo-fuzzy neuron, but with orthogonal activation functions instead of the usual membership functions. Error

$$e_k = y_k^* - \hat{y}_k$$

is used by learning algorithm to tune both the weights and architecture.

The present architecture contains $2n+1$ ortho-synapses and $(h+1)(2n+1)$ synaptic weights to be estimated at the same time it is very important that the output signal \hat{y}_k depends linearly on the weights.

SYNAPTIC ADAPTATION

Let's introduce the standard criterion of learning

$$E_k = \sum_{k=1}^N e_k^2 = \sum_{k=1}^N \left(y_k^* - \sum_{i=1}^n \sum_{l=0}^h w_{li} T_{li}(\hat{x}_{ki}) \right)^2,$$

$(h+1)n \times 1$ – vectors of activation functions

$$T(\hat{x}_k) = (T_{01}(\hat{x}_{k1}), T_{11}(\hat{x}_{k1}), \dots, T_{h1}(\hat{x}_{k1}),$$

$$T_{02}(\hat{x}_{k2}), \dots, T_{h2}(\hat{x}_{k2}), \dots, T_{hn}(\hat{x}_{kn}))^T =$$

$$= (T_1^T(\hat{x}_{k1}), T_2^T(\hat{x}_{k2}), \dots, T_n^T(\hat{x}_{kn}))^T$$

and synaptic weights

$$w = (w_{01}, w_{11}, \dots, w_{h1}, w_{02}, w_{h2}, \dots, w_{hn})^T = (w_1^T, w_2^T, \dots, w_n^T)^T$$

and rewrite the output network (11) in a compact form

$$\hat{y}_k = w^T T(\hat{x}_k) = \sum_{i=1}^N w_i^T T_i(\hat{x}_k). \quad (12)$$

To tune the vector of synaptic weights w in a sequential mode it's possible to use a recurrent least squares method (8) processing non-stationary signals is using adaptive procedures that have tracking properties, such as the same method of least squares on the sliding window, which in this situation, can be written as

$$\left\{ \begin{aligned} \tilde{w}(N) &= w(N-1) + \frac{P(N-1)(y_N^* - w^T(N-1)T(\hat{x}_N))}{1 + T^T(\hat{x}_N)P(N-1)T(\hat{x}_N)} T(\hat{x}_N), \\ \tilde{P}(N) &= P(N-1) - \frac{P(N-1)T(\hat{x}_N)T^T(\hat{x}_N)P(N-1)}{1 + T^T(\hat{x}_N)P(N-1)T(\hat{x}_N)}, \\ P(N) &= \tilde{P}(N) + \frac{\tilde{P}(N)T(\hat{x}_{N-s})T^T(\hat{x}_{N-s})\tilde{P}(N)}{1 - T^T(\hat{x}_{N-s})\tilde{P}(N)T(\hat{x}_{N-s})}, \\ w(N) &= \tilde{w}(N) - \frac{\tilde{P}(N)(y_{N-s}^* - \tilde{w}^T(N)T(\hat{x}_{N-s}))}{1 - T^T(\hat{x}_{N-s})\tilde{P}(N)T(\hat{x}_{N-s})} T(\hat{x}_{N-s}) \end{aligned} \right. \quad (13)$$

or

$$\begin{aligned} w(N) &= \left(\sum_{k=N-s+1}^N T(\hat{x}_k)T^T(\hat{x}_k) \right)^{-1} \sum_{k=N-s+1}^N T(\hat{x}_k)y_k^* = \\ &= P_s(N) \sum_{k=N-s+1}^N T(\hat{x}_k)y_k^*, \end{aligned} \quad (14)$$

thus, due to the diagonality of matrix $P_s(N)$ calculation of estimation (14) even at large n and h does not cause difficulty.

ARCHITECTURAL ADAPTATION

The number of activation functions $h+1$ in each ortho-synapse $O-S_i$ of output layer is chosen rather arbitrarily, so if it is found that the synthesized neural network does not provide the required quality of the information processing, the number of these functions can be increased (or decreased, if necessary) in on-line mode directly in the learning process. Thus network evolutionary properties by adapting the structure, due to orthogonality with activation functions for the calculated correction synaptic weights made simply.

Suppose that at the instant $N = N^*$ it was decided that each ortho-synapse $O-S_i$ need to add an activation function $T_{h+1,i}$ so that to the network should be introduced n additional synaptic weights $w_{h+1,i}$.

The estimate $w(N)$ (14) should be corrected in this situation as follows:

$$w^*(N) = \begin{pmatrix} \sum_{k=N-s+1}^N T(\hat{x}_k)T^T(\hat{x}_k) & R_{l,h+1}(\hat{x}_k) \\ \hline R_{l,h+1}^T(\hat{x}_k) & R_{h+1,h+1}(\hat{x}_k) \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} \sum_{k=N-s+1}^N T(\hat{x}_k)y_k^* \\ \hline r_{h+1}(\hat{x}_k) \end{pmatrix}, \quad (15)$$

where $((h+1)n \times n)$ -matrix $R_{l,h+1}(\hat{x}_k)$ formed by elements $\sum_{k=N-s+1}^N T_{li}(\hat{x}_{ki})T_{h+1,j}(\hat{x}_{kj})$, $l = 0, 1, \dots, h$; $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, n$; $(n \times n)$ -matrix $R_{h+1,h+1}(\hat{x}_k)$ – formed by elements $\sum_{k=N-s+1}^N T_{h+1,i}(\hat{x}_{ki})T_{h+1,j}(\hat{x}_{kj})$; $(n \times 1)$ – the column $r_{h+1,i}(\hat{x}_{ki})$ – formed by elements $\sum_{k=N-s+1}^N T_{h+1,i}(\hat{x}_{ki})y_k^*$.
Applying the Frobenius formula, estimate (15) can be rewritten as

$$w^*(N) = \begin{pmatrix} P_s(N) + P_s(N)R_{l,h+1}(\hat{x}_k)H^{-1}(\hat{x}_k)R_{l,h+1}^T(\hat{x}_k)P_s(N) & -P_s(N)R_{l,h+1}(\hat{x}_k)H^{-1}(\hat{x}_k) \\ \hline -H^{-1}(\hat{x}_k)R_{l,h+1}(\hat{x}_k)P_s(N) & H^{-1}(\hat{x}_k) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \sum_{k=N-s+1}^N T(\hat{x}_k)y_k^* \\ \hline r_{h+1}(\hat{x}_k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w(N) + P_s(N)R_{l,h+1}(\hat{x}_k)H^{-1}(\hat{x}_k)R_{l,h+1}^T(\hat{x}_k)w(N) - P_s(N)R_{l,h+1}(\hat{x}_k)H^{-1}(\hat{x}_k)r_{h+1}(\hat{x}_k) \\ \hline -H^{-1}(\hat{x}_k)R_{l,h+1}^T(\hat{x}_k)w(N) + H^{-1}(\hat{x}_k)r_{h+1}(\hat{x}_k) \end{pmatrix},$$

where

$$H^{-1}(\hat{x}_k) = R_{h+1,h+1}^{-1}(\hat{x}_k) - R_{l,h+1}^T(\hat{x}_k)P_s(N)R_{l,h+1}(\hat{x}_k).$$

It's obvious that architectural adaptation is more difficult than synaptic. The possibility of its implementation in on-line mode, by using of orthogonal activation functions, can achieve the required approximating properties in the learning process.

CONCLUSION

The evolving neural network that due to using orthogonal activation functions tunes the synaptic weights and structure in the learning process is proposed. Another important feature of the proposed network is connected with the possibility to process in on-line mode information, spoiled by missing values in the data. The neural network under consideration is characterized by high speed and can to process distorted nonlinear nonstationary stochastic and chaotic signals in real time.

SPISOK LITERATURY

1. Jang, J.-S. Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence / J.-S. Jang, C.-T. Sun, E. Mizutani. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 1997. – 640 p.
2. Haykin, S. Neural Networks. A Comprehensive Foundation / S. Haykin. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 1999. – 842 p.

3. Nelles, O. Nonlinear System Identification / O. Nelles. – Berlin : Springer, 2001. – 585 p.
4. Rutkowska, D. Neuro-Fuzzy Architectures and Hybrid Learning / D. Rutkowska. – Berlin : Springer, 2002. – 288 p.
5. Rutkowski, L. Computational Intelligence. Methods and Techniques / L. Rutkowski. – Berlin-Heidelberg : Springer-Verlag, 2008. – 514 p.
6. Kasabov, N. Evolving Connectionist Systems / N. Kasabov. – London : Springer-Verlag, 2003. – 307 p.
7. Lughofer, E. Evolving Fuzzy Systems – Methodologies, Advanced Concepts and Applications / E. Lughofer. – Berlin-Heidelberg : Springer-Verlag, 2011. – 454 p.
8. Загоруйко, Н. Г. Эмпирические предсказания / Н. Г. Загоруйко. – Новосибирск : Наука, 1979. – 120 с.
9. Han, J. Data Mining : Concepts and Techniques / J. Han, M. Kamber. – Amsterdam : Morgan Kaufman Publ., 2006. – 743 p.
10. Gorban, A. Principal Manifolds for Data Visualization and Dimension Reduction / A. Gorban, B. Kegl, B. Wunch, A. Zinovyev (Eds.). – LNCS. – V. 58. – Berlin-Heidelberg. – New York : Springer, 2007. – 330 p.
11. Bishop, C. M. Neural Networks for Pattern Recognition. – Oxford : Clarendon Press, 1995. – 482 p.
12. Gorban, A. N. Neural network modeling of data with gaps / A. N. Gorban, A. A. Rossiev, D. C. Wunch II // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2000. – No. 1 (3). – С. 47–55.

13. Tkacz, M. Artificial neural networks in incomplete data sets processing / In: Eds. M. A. Klopotek, S. T. Wierzchon, K. Trojanowski Intelligent Information Processing and Web Mining. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. – P. 577–583.
14. Marwala, T. Computational Intelligence for Missing Data Imputation, Estimation, and Management: Knowledge Optimization Techniques. Hershey-New York : Information Science Reference, 2009. – P. 303.
15. Суєтин, П. К. Классические ортогональные многочлены / П. К. Суєтин. – М. : Наука, 1976. – 328 с.
16. Karlin, S. Tchebycheff Systems with Applications in Analysis and Statistics / S. Karlin, W. J. Studden. – N. Y. – London – Sydney : Interscience Publishes, 1966. – 586 p.
17. Семесенко, М. П. Методи обробки та аналізу измерений в научних дослідженнях. – Київ-Донець : Вища школа, 1983. – 240 с.
18. Бодянский Е. В. Ортоинапс, ортонейроны и нейропродиктор на их основе / Е. В. Бодянский, Е. А. Викторов, А. Н. Слипенченко // Системи обробки інформації. – 2007. – Вип. 4 (62). – С. 139–143.
19. Uchino, E. Soft computing based signal prediction, restoration and filtering / E. Uchino, T. Yamakawa Ed. Da Ruan «Intelligent Hybrid Systems: Fuzzy Logic, Neural Networks and Genetic Algorithms». – Boston : Kluwer Academic Publisher, 1997. – P. 331–349.
20. Miki, T. Analog implementation of neo-fuzzy neuron and its on-board learning / T. Miki, T. Yamakawa Ed. N. E. Mastorakis «Computational Intelligence and Applications». – Piraeus : WSES Press, 1999. – P. 144–149.
21. Yang, S.-S. An orthonormal neural network for function approximation / S.-S. Yang, C.-S. Tseng // IEEE Trans. on Syst., Man, and Cybern. – 1996. – No. 10. – P. 779–784.
22. Lee, T. T. The Chebychev polynomial-based unified model neural networks for functional approximation / T. T. Lee, J. T. Jeng // IEEE Trans. on Syst., Man, and Cybern. – 1998. – Vol. 28, No. 12. – P. 925–935.
23. Andras, P. Orthogonal RBF neural network approximation / P. Andras // Neural Processing Letters. – 1999. – Vol. 9, No. 2. – P. 141–151.
24. Chien F. Sh. Properties and performance of orthogonal neural network in function approximation / F. Sh. Chien, Ch.-Ch. Tseng, Ch.-S. Chen // Int. J. Intelligent Systems. – 2001. – Vol. 16. – P. 1377–1392.
25. Patra, J. C. Nonlinear dynamic system identification using Chebyshev functional link artificial neural networks / J. C. Patra, A. C. Kot // IEEE Trans. on Syst., Man, and Cybern. – 2002. – Vol. 32, No. 4. – P. 505–511.
26. Bodyanskiy, Ye. Artificial neural network with orthogonal activation functions for dynamic system identification / Ye. Bodyanskiy, V. Kolodyazhnyi, O. Slipchenko Eds. by O. Sawodny, P. Scharff «Sinergies between Information Processing and Automation». – Aachen : Shaker-Verlag, 2004. – P. 122–127.
27. Statiak, B. Fast orthogonal neural network / B. Statiak, M. Yatsymirskyy // Artificial Intelligence and Soft Computing. – 2006. – No. 4029. – P. 142–149.
28. Rodriguez, N. Orthogonal neural network based prediction for OFDM systems / N. Rodriguez, C. Cubillos // Proc. Electronics, Robust, and Automotive Mechanics Conf., 2007. – P. 225–228.
29. Hongwei, W. Tracking control of robot manipulators based on orthogonal neural network / W. Hongwei, Yu. Shuanghe // Int. J. Modeling, Identification, and Control. – 2010. – No. 11 (1–2). – P. 130–136.
30. Bodyanskiy, Ye. Structural and synaptic adaptation in the artificial neural networks with orthogonal activation functions / Ye. Bodyanskiy, V. Kolodyazhnyi, O. Slipchenko // Sci. Proc. of Riga Technical University. Comp. Sci., Inf. Technology and Management Sci. – 2004. – No. 20. – P. 69–76.
31. Bodyanskiy, Ye. Ontogenic neural networks using orthogonal activation functions / Ye. Bodyanskiy, O. Slipchenko // Prace naukowe Akademii Ekonomicznej we Wroclawiu. – 2006. – No. 21. – P. 13–20.
32. Bodyanskiy, Ye. Growing neural networks using nonconventional activation functions / Ye. Bodyanskiy, I. Pliss, O. Slipchenko // Int. J. Information Theories & Applications. – 2007. – Vol. 14, No. 3. – P. 275.
33. Bodyanskiy, Ye. The cascade orthogonal neural network / Ye. Bodyanskiy, A. Dolotov, I. Pliss, Ye. Victorov // In «Advanced Research in Artificial Intelligence». – Vol. 2. – Sofia : FOI ITHEA, 2008. – P. 13–20.

Стаття надійшла до редакції 16.10.2013.

Шафроненко А.¹, Плісс І.², Бодянский Є.³

¹Аспірантка, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна

²Канд. техн. наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна

³Д-р техн. наук, професор, науковий керівник, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна

ЕВОЛЮЦІОНУЮЧА АДАПТИВНА НЕЙРОННА МЕРЕЖА ДЛЯ ОБРОБКИ ДАНИХ ІЗ ВТРАЧЕНИМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ

Розглянуто задачу синтезу еволюціонуючої в on-line режимі системи обчислювального інтелекту, здатної обробляти стохастичні сигнали, що містять пропуски в даних. Запропоновано адаптивний підхід, в основі якого полягає використання ортогональних поліномів.

Ключові слова: нейронна мережа, ортогональні поліноми, поліноми Чебишева, неповні дані з втраченими спостереженнями.

Шафроненко А.¹, Плісс І.², Бодянский Є.³

¹Аспірантка, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна

²Канд. техн. наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна

³Д-р техн. наук, професор, науковий керівник, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна

ЭВОЛЮЦИОНИРУЮЩАЯ АДАПТИВНАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ С ПОТЕРЯННЫМИ НАБЛЮДЕНИЯМИ

Рассмотрена задача синтеза эволюционирующей в on-line режиме системы вычислительного интеллекта, способной обрабатывать стохастические сигналы, содержащие пропуски в данных. Предложен адаптивный подход, в основе которого лежит использование ортогональных полиномов.

Ключевые слова: нейронная сеть, ортогональные полиномы, полиномы Чебышева, неполные данные с потерянными наблюдениями.

REFERENCES

- Jang J.-S., Sun C.-T., Mizutani E. *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*, Upper Saddle River: Prentice Hall, 1997, 640 p.
- Haykin S. *Neural Networks. A Comprehensive Foundation*. Upper Saddle River, Prentice Hall, 1999, 842 p.
- Nelles O. *Nonlinear System Identification*, Berlin, Springer, 2001, 585 p.
- Rutkowska D. *Neuro-Fuzzy Architectures and Hybrid Learning*. Berlin, Springer, 2002, 288 p.
- Rutkowski L. *Computational Intelligence. Methods and Techniques*. Berlin-Heidelberg, Springer-Verlag, 2008, 514 p.
- Kasabov N. *Evolving Connectionist Systems*. London, Springer-Verlag, 2003, 307 p.
- Lughofer E. *Evolving Fuzzy Systems – Methodologies, Advanced Concepts and Applications*. Berlin-Heidelberg, Springer-Verlag, 2011, 454 p.
- Zagoruyko N. G. *Empiricheskiye predskazaniya*. Novosibirsk, Nauka, 1979, 120 p.
- Han J., Kamber M. *Data Mining, Concepts and Techniques*. Amsterdam, Morgan Kaufman Publ., 2006, 743 p.
- Gorban A., Kegl B., Wunch B., Zinovyev A. (Eds.) *Principal Manifolds for Data Visualization and Dimension Reduction*, LNCS, V.58, Berlin-Heidelberg, New York, Springer, 2007, 330 p.
- Bishop C. M. *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford, Clarendon Press, 1995, 482 p.
- Gorban A. N., Rossiev A. A., Wunch II D. C. Neural network modeling of data with gaps, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2000, No. 1 (3), pp. 47–55.
- Tkacz M. Artificial neural networks in incomplete data sets processing, In: Eds. Kłopotek M. A., Wierzchon S. T., Trojanowski K. *Intelligent Information Processing and Web Mining*. Berlin- Heidelberg, Springer-Verlag, 2005, pp. 577–583.
- Marwala T. *Computational Intelligence for Missing Data Imputation, Estimation, and Management, Knowledge Optimization Techniques*. Hershey-New York, Information Science Reference, 2009, pp. 303.
- Suetin P. K. *Klassicheskiye ortogonal'nye mnogochleny*. Moscow, Nauka, 1976, 328 p.
- Karlin S., Studden W. J. *Tchebycheff Systems with Applications in Analysis and Statistics*. N.Y. London, Sydney, Interscience Publishes, 1966, 586 p.
- Semesenko M. P. *Metody obrabotki i analiza izmereniy v nauchnykh issledovaniyakh*, Kiyev-Donetsk, Vishcha shkola, 1983, 240 p.
- Bodyanskiy Ye. V., Viktorov Ye. A., Slipchenko A. N. *Ortosinaps, ortoneyrony i neyroprediktor na ikh osnove, Sistemi obrobki informatsii*, 2007. Vip.4 (62), pp.139–143.
- Uchino E., Yamakawa T. Soft computing based signal prediction, restoration and filtering. Ed. Da Ruan *«Intelligent Hybrid Systems: Fuzzy Logic, Neural Networks and Genetic Algorithms»*, Boston, Kluwer Academic Publisher, 1997, pp. 331–349.
- Miki T., Yamakowa T. Analog implementation of neo-fuzzy neuron and its on-board learning, Ed. N. E. Mastorakis *«Computational Intelligence and Applications»*. Piraeus, WSES Press, 1999, pp. 144–149.
- Yang S.-S., Tseng C.-S. An orthonormal neural network for function approximation, *IEEE Trans. on Syst., Man, and Cybern*, 1996, No. 10, pp. 779–784.
- Lee T. T., Jeng J. T. The Chebychev polynomial-based unified model neural networks for functional approximation, *IEEE Trans. on Syst., Man, and Cybern*, 1998, vol. 28, No. 12, pp. 925–935.
- Andras P. Orthogonal RBF neural network approximation, *Neural Processing Letters*, 1999, 9(2), pp. 141–151.
- Chien F. Sh., Tseng Ch.-Ch., Chen Ch.-S. Properties and performance of orthogonal neural network in function approximation, *Int. J. Intelligent Systems*, 2001, 16, pp. 1377–1392.
- Patra J. C., Kot A. C. Nonlinear dynamic system identification using Chebyshev functional link artificial neural networks, *IEEE Trans. on Syst., Man, and Cybern*, 2002, vol. 32, No. 4, pp. 505–511.
- Bodyanskiy Ye., Kolodyazhniy V., Slipchenko O. Artificial neural network with orthogonal activation functions for dynamic system identification, Eds. by O. Sawodny, P. Scharff *«Sinergies between Information Processing and Automation»*, Aachen, Shaker-Verlag, 2004, pp. 122–127.
- Statiak B., Yatsymirskyy M. Fast orthogonal neural network, *Artificial Intelligence and Soft Computing*, 2006, 4029, pp. 142–149.
- Rodriguez N., Cubillos C. Orthogonal neural network based prediction for OFDM systems, *Proc. Electronics, Robust, and Automotive Mechanics Conf.*, 2007, pp. 225–228.
- Hongwei W., Shuanghe Yu. Tracking control of robot manipulators based on orthogonal neural network, *Int. J. Modeling, Identification, and Control*, 2010, No. 11 (1–2), pp. 130–136.
- Bodyanskiy Ye., Kolodyazhniy V., Slipchenko O. Structural and synaptic adaptation in the artificial neural networks with orthogonal activation functions, *Sci. Proc. of Riga Technical University. Comp. Sci., Inf. Technology and Management Sci*, 2004, No. 20, pp. 69–76.
- Bodyanskiy Ye., Slipchenko O. Ontogenic neural networks using orthogonal activation functions, *Prace naukowe Akademii Ekonomicznej we Wroclawiu*, 2006, No. 21, pp. 13–20.
- Bodyanskiy Ye., Pliss I., Slipchenko O. Growing neural networks using nonconventional activation functions, *Int. J. Information Theories & Applications*, 2007, vol. 14, No. 3, pp. 275.
- Bodyanskiy Ye., Dolotov A., Pliss I., Viktorov Ye. The cascade orthogonal neural network, In *«Advanced Research in Artificial Intelligence»*, Vol. 2, Sofia, FOI ITHEA, 2008, pp. 13–20.

ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ПРОГРЕССИВНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

PROGRESSIV INFORMATICS TECHNOLOGIES

UDC 004.021

Dubrovin V. I.¹, Tverdohleb J. V.², Kharchenko V. V.³¹Ph.D. in Engineering, professor, Zaporozhye national technical university, Ukraine²Aspirant, Zaporozhye national technical university, Ukraine³Student, Zaporozhye national technical university, Ukraine, E-mail: kharchenkoviktorya@yandex.ua

R-PEAKS DETECTION USING WAVELET TECHNOLOGY

The given work presents the methodology of R-peaks detection in an electrocardiogram signal based on Discrete Wavelet Transformation. The optimal level decomposition of the detail coefficients can be determined by energy, frequency and cross-correlation analyses. The effectiveness of the proposed algorithm has been tested by using records obtained from the MIT/BIH Physionet arrhythmia database.

Keywords: ECG, wavelet transformation, R-peaks detection.

INTRODUCTION

An electrocardiogram (ECG) is a graphic record of the direction and magnitude of electrical activity of the heart that is generated by depolarization and repolarization of the atria and ventricles [1]. ECG gives information about the current state of the cardiovascular system and the pathological changes in the heart. Automatic analysis of the ECG signal is complex theoretical problem. It is closely related to the signal's physiological origin, which is the cause of its non-determination, diversity, variability, unpredictability, non-stationarity and susceptibility to many kinds of noise. A number of modern mathematics methods have been developed for non-stationary signals' analysis. The most famous one is wavelet transformation, which allows to work with non-stationary signals, detect their features and determine the signal's frequency components' time localization unlike Fourier transformation. The wavelet transformation is signal decomposition into basis functions sets, which are derived from a single prototype wavelet by scaling (dilatations and contractions) and translations (shifts).

A typical ECG tracing of normal heartbeat (or cardiac cycle) consists of P-wave, QRS-complex and T-wave. A small «U-wave» is normally visible in 50 to 75 % of ECGs. The baseline voltage of the electrocardiogram is known as the isoelectric line [1–3]. The starting point for a number of modern computer electrocardiography techniques is

localizing of QRS-complexes, which positions are determined by positions of their maxima – R-peaks. Now there are a lot of methods for detecting the time R-peaks locations, which are based on finding the first and second derivatives, the amplitude estimation etc. Existing methods do not meet the requirements of researches, as they often give insufficient accuracy in R-peaks detection.

In this paper the method of ECG R-peaks detection based on the discrete wavelet transformation is proposed.

1 DISCRETE WAVELET TRANSFORMATION

In the multilevel discrete wavelet transformation the tree connection of low-pass and high-pass filters with different cut-off frequencies is used to analyze the signal through different scales. The approximation coefficients cA (smoothed signal) and the detail coefficients cD (high-frequency fluctuations of the signal) can be determined. The approximation coefficients are obtained by convolving the input signal s through the low-pass filter transfer function by formula (1) and then downsampling the convolution result by 2:

$$cA_n = \sum_{k \in Z} h_k s_{2n-k}, \quad (1)$$

where h_k represents the k -th low-pass filter coefficient.

The detail coefficients are obtained by convolving the input signal s with a high-pass filter transfer function by formula (2) and then downsampling the convolution result by 2:

$$cD_n = \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_k s_{2n-k}, \quad (2)$$

where g_k denotes the k -th high-pass filter coefficient.

2 WAVELET BASIS SELECTION

The selection of mother wavelet is important problem before starting of the detection procedure. But there is no universal method suggested selecting the wavelet basis. The choice of the wavelet depends on the initial signal.

In the given work the wavelet proposed in [4] was used to analyze the ECG signal. It is a wavelet from Daubechies family («db6»). Daubechies wavelets show similarity with QRS-complexes and their energy spectrum is concentrated around the low frequencies [4].

3 R-PEAKS DETECTION METHODOLOGY

Let's consider the fragment of the ECG signal with duration of 3 minutes from the record No. 100 of MIT/BIH arrhythmia database [5]. The wavelet decomposition structure of ECG signal using «db6» wavelet is shown in Fig. 1. The original signal is shown at the top of the plot. The decomposed signal's reconstructed components within eight wavelet scales are shown below.

The detail coefficients of the fourth decomposition level are chosen to detect the R-peaks based on energy, frequency and cross-correlation analyses [4].

Energy analysis. Most of ECG energy of the QRS-complex is concentrated in the frequency range from 4 Hz to 50 Hz. Normally isoelectric segments (PQ, ST and TP) contain no energy and the signal amplitude is zero over these corresponding intervals [4]. The distribution curve of the signal decomposed levels energy is shown in Fig. 2.

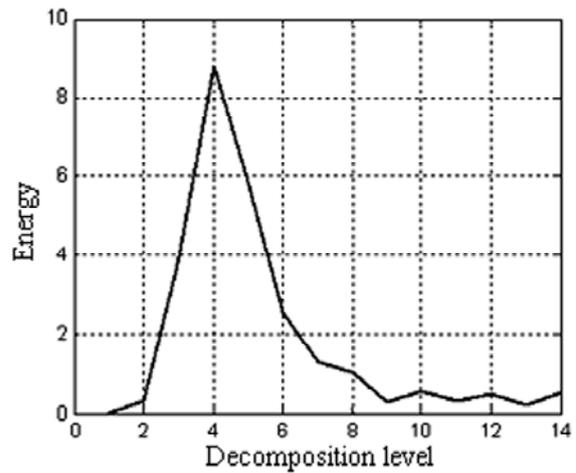


Fig. 2. Energy plot of wavelet decomposition structure (record No. 100)

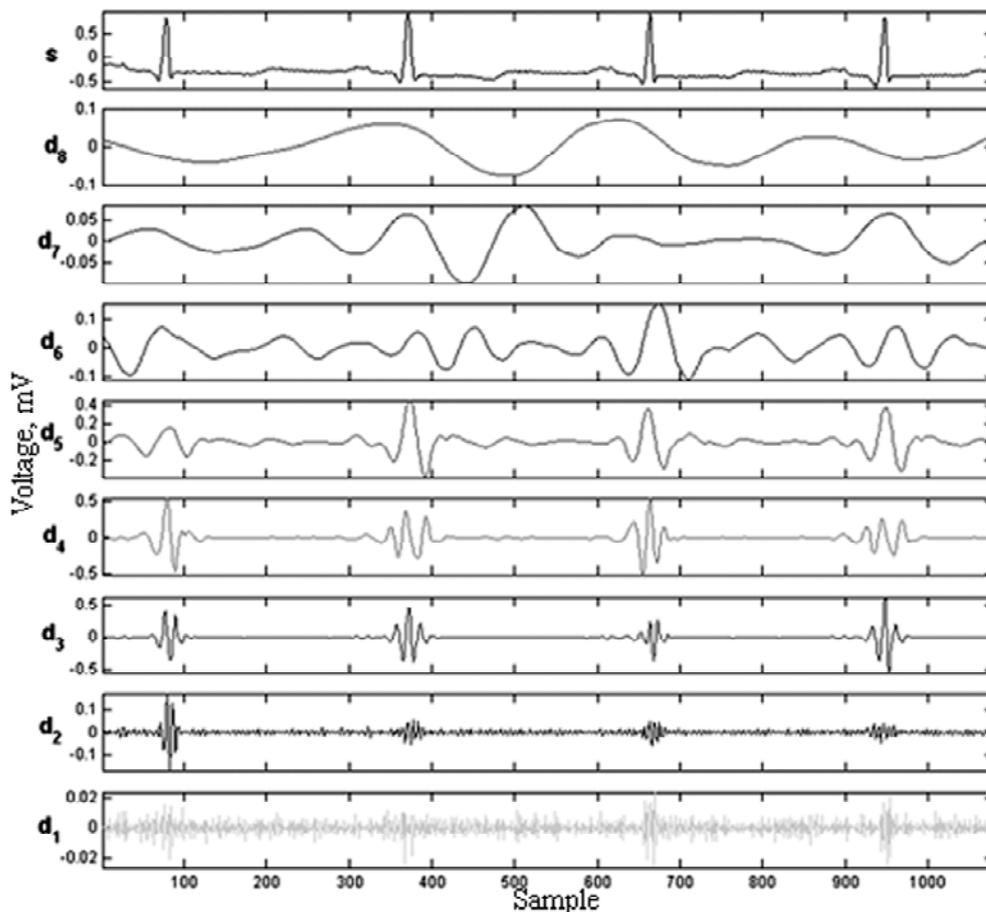


Fig. 1. Decomposition of the ECG signal (record No. 100)

The energy curve shows that the energy is highest at level-4. Therefore, we consider that it consists the significant details of QRS-complexes.

Frequency analysis. Another justification of selecting d4 signal is its available frequency components correlated with that of the QRS-complex. The Fourier Transform of the d4 signal is performed and shown in Fig. 3. The bandwidth of the d4 signal is 2,5–39,5 Hz which is almost same as that of a QRS-complex [1].

As the signal has the sampling frequency of 360 Hz, the signal’s frequency spectrum is limited by the maximum frequency of 180 Hz according to the Nyquist rule.

Correlation analysis. In addition to the above two analyses the cross-correlation analysis between the reconstructed components and the original ECG signal was performed. This provides us the time domain relationship between the original and the decomposed signals. The analysis results are shown in table 1.

Table 1. Cross-correlation coefficients

Details	Cross-correlation coefficient
d1	0,025
d2	0,112
d3	0,384
d4	0,585
d5	0,479
d6	0,317
d7	0,227
d8	0,202

From table 1 it is clear that the cross-correlation coefficient value of d4 is highest. So, it is obvious that the signal can be reconstructed by one branch of the wavelet coefficients. The 4th decomposition level is highly correlated with the original signal in time domain.

The algorithm of R-peaks detection consists of the following steps.

Step 1. Compute the signal decomposition up to 4 level.

Step 2. Carry out the signal reconstruction of the 4th decomposition level based on one branch of the wavelet coefficients.

Step 3. Determine the R-peaks locations as non-zero samples of d4.

Step 4. Eliminate the fault founded R-peaks using the following conditions:

- the normal QRS-complex duration must be 100 ms;
- the minimum value of RR-interval must be 200 ms.

4 RESULTS AND DISCUSSION

The proposed algorithm for R-peaks detection was implemented in the MatLab environment (v. 6.5) with the Wavelet Toolbox. The sample ECG signals of the present study were obtained from the MIT/BIH database via Physionet website [5]. MIT/BIH is a de facto standard of the testing of devices, systems and software intended for cardiac monitoring. The MIT/BIH arrhythmia database contains 48 two-channel records (each 30 minutes long) with the sampling frequency of 360 Hz annotated by qualified medical professionals. As the annotations are assumed to

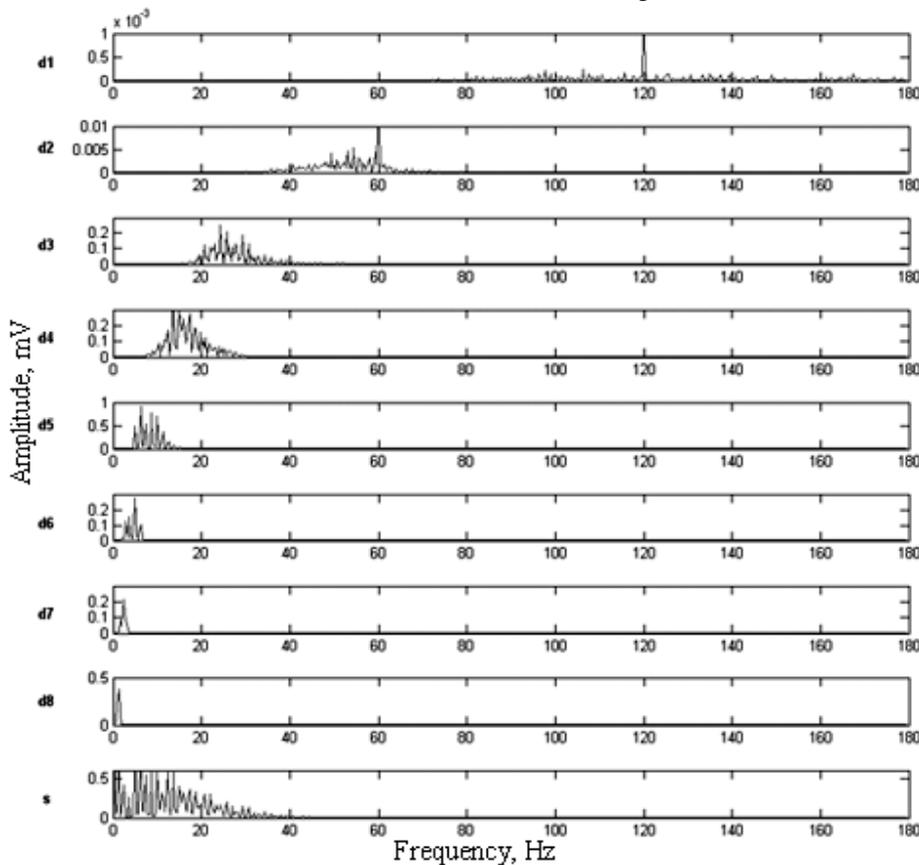


Fig. 3. Frequency distribution of details and ECG (record No. 100)

be 100 % correct, the algorithm efficiency is determined by comparing the obtained results with them.

To assess the performance two statistical measurements were used [6]. These are the Sensitivity (Se), which gives the fraction of real events that are correctly detected and it is defined by formula (3):

$$Se = \frac{TP}{TP + FN} \cdot 100\%, \quad (3)$$

and the Positive Predictivity (P_+), which is the fraction of detections that are real events and it is defined by formula (4):

$$P_+ = \frac{TP}{TP + FP} \cdot 100\%, \quad (4)$$

where FN (False Negatives) denotes the number of missed detections, FP (False Positives) represents the number of extra detections and TP (True Positives) is the number of the correctly detected QRS-complexes.

The average Sensitivity of the algorithm is 99,64 % and its Positive Predictivity is 99,82 %.

CONCLUSION

The algorithm is presented for the detection of the R-peaks in an ECG signal. This algorithm is based on the discrete

wavelet transformation. The detail coefficients of the fourth decomposition level are chosen to detect the R-peaks based on energy, frequency and cross-correlation analyses. The algorithm is evaluated for a number of records obtained from the MIT/BIH arrhythmia database. The accuracy of the algorithm is high due to the criteria (average Sensitivity is 99,64 % and average Positive Predictivity is 99,82 %.).

SPISOK LITERATURY

1. Хан, М. Г. Быстрый анализ ЭКГ / М. Г. Хан. – М. : Бином, 1999. – 286 с.
2. Hampton, J. R. 150 ECG Problems / J. R. Hampton. – UK : Elsevier Science Health Science Division, 2008. – 320 p.
3. Зайченко, К. В. Съём и обработка биоэлектрических сигналов / К. В. Зайченко, О. О. Жаринов, А. Н. Кулин. – С.Пб. : РИО ГУАП, 2001. – 140 с.
4. Awadhesh, Pachauri Robust detection of R-wave using wavelet technique / Awadhesh Pachauri, Manabendra Bhuyan // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2009. – № 56. – P. 56–60.
5. MIT-BIH Arrhythmia Database [electronic resource]. – Access mode: <http://www.physionet.org/physiobank/database/mitdb>.
6. (ANSI/AMI EC57): Testing and reporting performance results of cardiac rhythm and ST segment measurement algorithms, 1998. (AAMI Recommended Practice / American National Standard).

Стаття надійшла до редакції 16.09.2013.

Дубровин В. И.¹, Твердохлеб Ю. В.², Харченко В. В.³

¹Канд. техн. наук, профессор, Запорожский национальный технический университет, Украина

²Аспирант, Запорожский национальный технический университет, Украина

³Студентка, Запорожский национальный технический университет, Украина

ВЯВЛЕННЯ R-ПІКІВ КАРДІОСИГНАЛУ С ІСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-ТЕХНОЛОГИИ

Данная работа посвящена методике обнаружения R-пиков сигнала ЭКГ, основанной на применении дискретного вейвлет-преобразования. Выбор детализирующих коэффициентов 4-го уровня разложения кардиосигнала был сделан на основании результатов проведенных энергетического, частотного и корреляционного анализов. Эффективность предложенного алгоритма была проверена с использованием записей из базы данных аритмий MIT-BIH Physionet.

Ключевые слова: ЭКГ, вейвлет-преобразование, обнаружение R-пиков.

Дубровін В. І.¹, Твердохліб Ю. В.², Харченко В. В.³

¹Канд. техн. наук, професор, Запорізький національний технічний університет, Україна

²Аспирант, Запорізький національний технічний університет, Україна

³Студентка, Запорізький національний технічний університет, Україна

ВЯВЛЕННЯ R-ПІКІВ КАРДІОСИГНАЛУ З ВИКОРИСТАННЯМ ВЕЙВЛЕТ-ТЕХНОЛОГІЇ

Дана робота присвячена методиці виявлення R-піків сигналу ЕКГ, заснованій на застосуванні дискретного вейвлет-перетворення. Вибір деталізуючих коефіцієнтів 4-го рівня розкладання кардиосигнала було зроблено на підставі результатів проведених енергетичного, частотного та кореляційного аналізів. Ефективність запропонованого алгоритму була перевірена з використанням записів з бази даних аритмій MIT-BIH Physionet.

Ключові слова: ЕКГ, вейвлет-перетворення, виявлення R-піків.

REFERENCES

1. Khan M. G. By'str y'j analiz E'KG. Moscow, Binom, 1999, 286 p.
2. Hampton J. R. 150 ECG Problems. United Kingdom, Elsevier Science Health Science Division, 2008, 320 p.
3. Zajchenko K. V., Zharinov O. O., Kulin A. N. S'yom i obrabotka bioe'lectricheskix signalov. Saint Petersburg, RIO GUAP, 2001, 140 p.
4. Awadhesh Pachauri, Manabendra Bhuyan. Robust detection of R-wave using wavelet technique, World Academy of Science, Engineering and Technology, 2009, No. 56, pp. 56–60.
5. MIT-BIH Arrhythmia Database [electronic resource]. – Access mode: <http://www.physionet.org/physiobank/database/mitdb>.
6. (ANSI/AMI EC57): Testing and reporting performance results of cardiac rhythm and ST segment measurement algorithms, 1998. (AAMI Recommended Practice / American National Standard).

ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АРХИТЕКТУРЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СЕРВИСНОГО ПОДХОДА

В статье рассмотрены современные представления понятия «архитектура», которые используются в ходе разработки информационных систем различного назначения. Рассмотрены особенности сервисного подхода к представлению информационной системы. Предложены уточненные понятия «архитектура ИТ-услуг» и «архитектура ИТ-сервисов». Разработаны визуальные модели взаимосвязи основных элементов, образующих понятия «сервисный подход к разработке информационной системы» и «архитектура информационной системы».

Ключевые слова: информационная система, архитектура, ИТ-услуга, ИТ-сервис, диаграмма классов.

ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В современных условиях дефицита финансовых ресурсов и высоких рисков создания и внедрения информационных систем (ИС) и информационных технологий (ИТ) на современных предприятиях приобретает особое значение подход, формирующий представление функциональной структуры (ФС) ИС как совокупности взаимосвязанных экономически целесообразных ИТ-услуг, своевременное предоставление и выполнение которых обеспечивает эффективную и качественную деятельность автоматизируемого предприятия (сервисный подход). Главные преимущества сервисного подхода к формированию ФС ИС заключаются в возможности ускорения формирования новых вариантов ФС ИС, увеличении производительности разработки ИС и повышении гибкости элементов комплекса средств автоматизации [1]. Однако на практике руководство предприятия склонно забывать о необходимости эффективного управления данными и отдельными ИТ-услугами [2]. В результате этого затраты финансовых и других ресурсов на эксплуатацию отдельных ИТ-услуг ИС предприятия становятся неоправданными и не могут окупиться за счет эффекта от эксплуатации ИС предприятия в целом. Подобные ситуации породили эффект, который в [3] назван «ИТ-слепотой» – неспособностью существующих ИС и ИТ отразить для пользователей реальные процессы в той среде, в которую они включены. Поэтому проблему формирования такой ФС ИС, которая, с одной стороны, была бы наиболее предпочтительной для представителей предприятия-заказчика ИС, а с другой стороны, соответствовала бы возможностям предприятия-разработчика ИС, в настоящее время следует считать нерешенной.

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ АРХИТЕКТУРНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В настоящее время основой для решения рассмотренных выше проблем следует считать подход, обобща-

ющий множество разнообразных концепций, теоретических разработок и прикладных работ в рамках системы стандартов. Один из них, стандарт ISO/IEC 15288 «System Engineering – System life cycle processes» предполагает, что система развивается на протяжении жизненного цикла в результате действий, осуществляемых и управляемых людьми, работающие в организациях и использующие определенные процессы в своей деятельности. Анализ описаний подобных процессов жизненного цикла системы, изложенных в [4], показывает, что ключевым понятием, задающим особенности анализа и синтеза систем, моделей их жизненных циклов и других аспектов существования является понятие «архитектура системы». В связи с этим целесообразно рассмотреть развитие трактовки данного понятия и прикладные аспекты применения понятия «архитектура системы» в процессах жизненного цикла ИС.

В настоящее время действующим определением понятия «архитектура» считается определение, сформулированное в стандарте ISO/IEC/IEEE 42010 «Systems and Software Engineering – Architecture Description». Согласно этому определению, архитектура системы представляет собой фундаментальные понятия и свойства системы в окружающей ее среде, воплощенные в ее элементах, отношениях, а также в принципах ее проектирования и развития [5]. Данное определение, по замыслу создателей, является максимально общим определением, пригодным для описания архитектур практически любых систем.

Для описания взаимосвязей основных терминов и понятий системы и ее архитектуры в стандарте ISO/IEC/IEEE 42010 предлагается ряд концептуальных моделей, выполненных в нотации диаграммы классов UML. Контекстная диаграмма классов, отражающая основные взаимосвязи базовых понятий, приведена на рис. 1, а диаграмма классов, описывающая ядро понятия «описание архитектуры», приведена на рис. 2 [5].

Рассмотрим подробнее приведенные на рис. 1 и рис. 2 основные понятия.

Каждая система (System) существует в своей окружающей среде (Environment). Система воздействует на

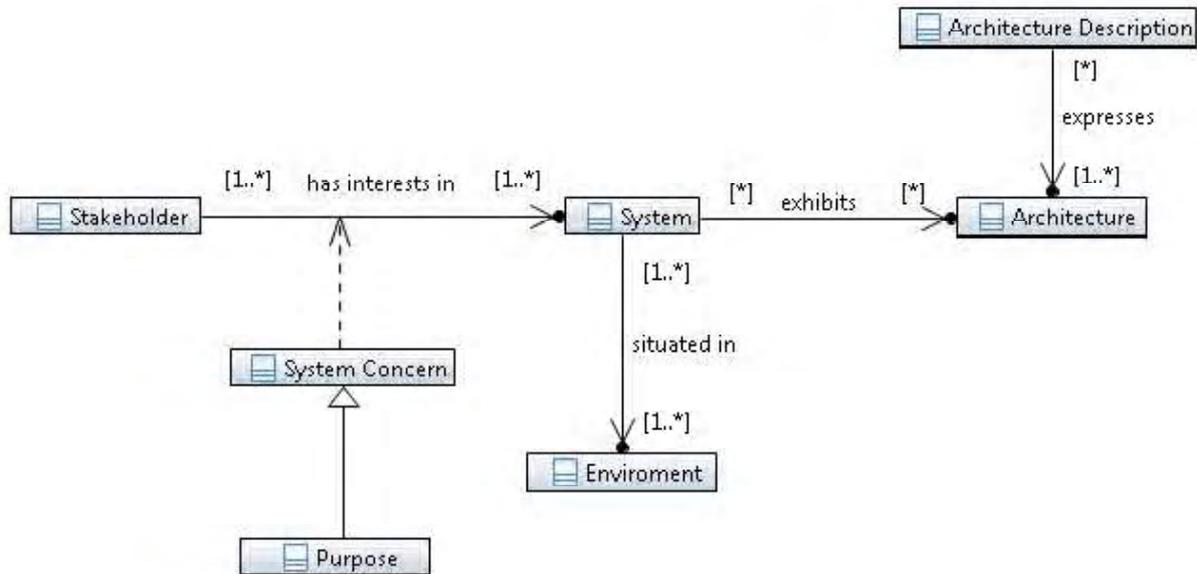


Рис. 1. Контекстная діаграма класів, описуюча основні взаємозв'язки базових понять стандарту ISO/IEC/IEEE 42010

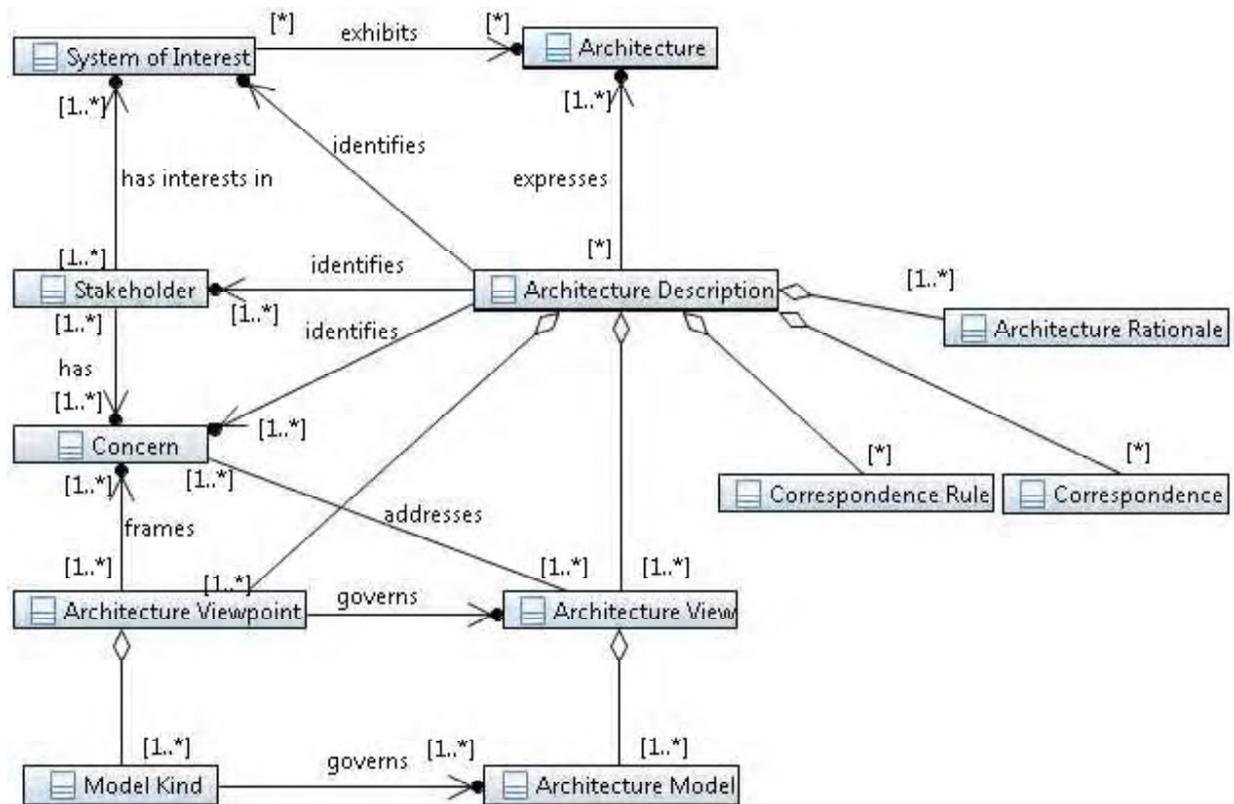


Рис. 2. Діаграма класів, описуюча ядро поняття «описание архитектуры»

эту среду и наоборот. Окружающая среда системы определяет диапазон воздействий на систему. Такие воздействия относятся к категории «Системные Проблемы» (System Concern).

Каждая система представляется через архитектуру (Architecture). Описание архитектуры (Architecture Description, AD) представляет собой артефакт, который выражает архитектуры. Архитекторы и другие заинтере-

сованные стороны системы используют AD, чтобы понять, проанализировать и сравнить возможные для системы архитектуры, и часто как своего рода «чертежи» для проектирования и конструирования. AD описывает одну из возможных архитектур проблемно-ориентированной системы и может принимать форму документа, набор моделей, модели хранилища, или какую-либо другую (формат AD стандартом не определен).

Заинтересованная сторона (Stakeholder) – это отдельные лица, группы лиц или организации, имеющие проблемы в проблемно-ориентированных системах. Проблема (Concept) – это любой интерес заинтересованных лиц в системе.

Архитектурная точка зрения (Architecture Viewpoint) представляет собой набор конвенций конструирования, интерпретации, использования и анализа конкретного типа взгляда на архитектуру и включает в себя виды моделей, точки зрения на языки и нотации, методы моделирования и аналитические методы в рамках определенного набора проблем.

Взгляд на архитектуру (Architecture View) в AD выражает архитектуру проблемно-ориентированной системы с точки зрения одной или нескольких заинтересованных сторон для решения конкретных проблем, используя конвенции, устанавливающие данную точку зрения. Взгляд на архитектуру состоит из архитектурных моделей (Architecture Model). Каждая модель строится в соответствии с конвенциями, учрежденными для данного вида модели, как правило, определяется как часть ее руководящей точки зрения. Вид модели (Model Kind) определяет конвенции, задающие правила построения архитектурных моделей.

Для описания связей между элементами, образующими AD, используется понятие «Соответствие». Это понятие, а также понятие «Правило соответствия» используются, чтобы выразить и поддерживать архитектуру отношений, среди которых можно выделить отношения состава, выделения, последовательности, прослеживаемости, зависимости, ограничения и обязательств, действующие в пределах одного AD или между несколькими AD [5].

ВЫДЕЛЕНИЕ НЕРЕШЕННЫХ ЧАСТЕЙ ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АРХИТЕКТУРЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время понятие «архитектура» может использоваться для описания фундаментальных понятий и свойств как ИС, так и функций ИС или же отдельных видов обеспечений ИС. В результате возникает терминологическая путаница, которая приводит к неоправданно узкому взгляду на разрабатываемую ИС (например, представление ИС как системы, архитектура которой определяется исключительно особенностями программного обеспечения этой системы).

Поэтому главной целью данного исследования нужно считать разработку основных определений понятий «архитектура» на различных уровнях представления ИС. Предлагаемые определения должны соответствовать предложенным в стандарте ISO/IEC/IEEE 42010 определениям и их взаимосвязям, которые показаны в виде диаграмм классов (рис. 1, 2). Основным научным результатом данного исследования будут визуальные модели, устанавливающие главные особенности взаимоотношений основных понятий процесса проектирования архитектуры ИС и, в дальнейшем, формализованных описаний этих понятий.

ИЗЛОЖЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основным термином, определяющим главные особенности сервисного подхода, является термин «ИТ-услуга». Этот термин является, по сути, вариантом перевода оригинального термина «IT-service». Однако то же самое слово – «service» – используется также, например, для обозначения элементов программного обеспечения ИС или ИТ, реализующего законченную функцию предоставления или обработки данных, перевода их из одного целостного состояния в другое [6]. Поэтому здесь во избежание терминологической путаницы понятия «ИТ-сервис» и «ИТ-услуга» предлагается разделить. Понятием «ИТ-сервис» в процессах разработки, внедрения, сопровождения и модернизации ИС следует описывать совокупность различных средств комплекса средств автоматизации, реализующих законченную операцию предоставления или обработки данных, перевода их из одного целостного состояния в другое, используя при этом стандартные платформу-независимые интерфейсы. Тогда понятие «ИТ-услуга» следует использовать для описания взаимосвязанной совокупности ИТ-сервисов, которая предоставляется для выполнения отдельной работы процесса предприятия/организации или для управления этой работой [7].

Данные определения позволяют рассматривать ИТ-услугу как аналог функциональной задачи ИС, результат которой используется персоналом в ходе выполнения отдельной работы процесса предприятия/организации или в ходе управления этой работой. В то же время возможность представления процессов предприятия/организации как отдельных работ, которые, в свою очередь, могут быть разделены на более мелкие работы, позволяет трактовать ИТ-услугу и как аналог функции ИС, целью которой в общем случае является повышение эффективности и/или качества выполнения и/или управления соответствующим процессом предприятия/организации. Что же касается термина «ИТ-сервис», то его следует воспринимать как один из способов организации комплекса средств автоматизации, который обеспечивает выполнение функций и отдельных функциональных задач ИС.

Такое сопоставление позволяет по-иному сформулировать приведенное выше определение термина «ИТ-услуга». Согласно этой формулировке, ИТ-услуга – это самостоятельная функциональная задача ИС, использование которой для выполнения отдельной работы процесса предприятия/организации или для управления этой работой экономически и технически целесообразно. Такое определение позволяет рассматривать главную цель деятельности ИС предприятия или организации как формирование и отображение единого целостного информационного представления процессов этого предприятия или организации в результате оказания совокупности ИТ-услуг [7].

Контекстная диаграмма классов, отражающая основные взаимосвязи базовых понятий сервисного подхода к созданию ИС как множества взаимосвязанных элементов, способных оказывать заинтересованным лицам ус-

В соответствии с приведенными в табл. 1 уточнениями понятия «информационная система» становится возможным уточнить понятия «архитектура» и «описание архитектуры» в рамках сервисного подхода к созданию ИС.

Контекстная диаграмма классов, отражающая основные взаимосвязи основных элементов, образующих понятие «архитектура ИС на основе сервисного подхода», приведена на рис. 4.

Основываясь на рассмотренном определении понятия «архитектура системы», понятие «архитектура ИТ-услуг» можно определить следующим образом: «Архитектура ИТ-услуг – фундаментальные понятия и свойства комплекса ИТ-услуг, образующих ИС в окружающей ее среде, воплощенные в элементах и отношениях этого комплекса, а также в принципах его проектирования и развития». Примером понятий, образующих архитектуру ИТ-услуг, может служить понятие «функция ИС», которое устанавливает представление ИТ-услуги как преобразования множества входных данных в множество выходных данных. Примером принципов проектирования комплекса ИТ-услуг, в которых воплощается архитектура ИТ-услуг, может служить принцип модульности ИТ-услуг, устанавливающий возможность одновременного представления некоего подмножества ИТ-услуг и как самостоятельно функционирующей ИС, и как элемента более крупной ИС.

Тогда понятие «архитектура ИТ-сервисов» можно определить следующим образом: «Архитектура ИТ-сервисов – фундаментальные понятия и свойства комплекса ИТ-сервисов и связывающих их интерфейсов, образующих ИС в окружающей ее среде, воплощенные в элементах и отношениях этого комплекса, а также в принципах его проектирования и развития». Примером понятий, образующих архитектуру ИТ-сервисов, могут служить понятия «клиент» и «сервер», которые устанавливают необходимость разделения программных сервисов на отдельные элементы, которые должны размещаться и функционировать на удаленных друг от друга комплексах технических средств.

ВЫВОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Предложенные определения и визуальные модели позволяют рассматривать процесс проектирования архитектуры ИС с применением сервисного подхода и принципа модульности как процесс создания и интеграции описаний архитектуры на общесистемном уровне, уровне ИТ-услуг и уровне ИТ-сервисов. При этом проектирование архитектуры ИС, которое может осуществляться как сверху вниз, так и снизу вверх, предполагает обязательную интеграцию описаний элементов ИС, выполненных на разных уровнях масштабирования.

Тогда описания архитектуры ИС и ее элементов на всех указанных уровнях будут представлять собой наборы физически реализуемых автономных модулей, обеспечивающих реализацию определенной функциональности. Каждый такой модуль на любом уровне характеризуется набором интерфейсов, обеспечивающих его взаимодействия с внешней средой. При этом внешней средой могут являться другие модули этой же ИС, внешние системы или пользователи системы, взаимодействующие с модулем через пользовательский интерфейс.

Для повышения эффекта от повторного использования требований к ИС более предпочтительно осуществлять процесс проектирования архитектуры ИС «снизу вверх». Это обусловлено наличием библиотек готовых элементов, эффект от применения которых увеличивается при оперировании описанием элементов ИС, выполненными на уровне отдельных сервисов. Данный уровень детализации позволяет обеспечить повторное использование ИТ-сервисов, даже в случае неполной востребованности функциональности существующих ИТ-услуг, в которые этот ИТ-сервис может быть включен. В этом случае такой ИТ-сервис становится элементом новой ИТ-услуги. В то же время, дальнейшая детализация ИТ-сервиса на отдельные функциональные операции позволяет оперировать только с отдельными операциями, результат выполнение которых не обеспечивает пол-

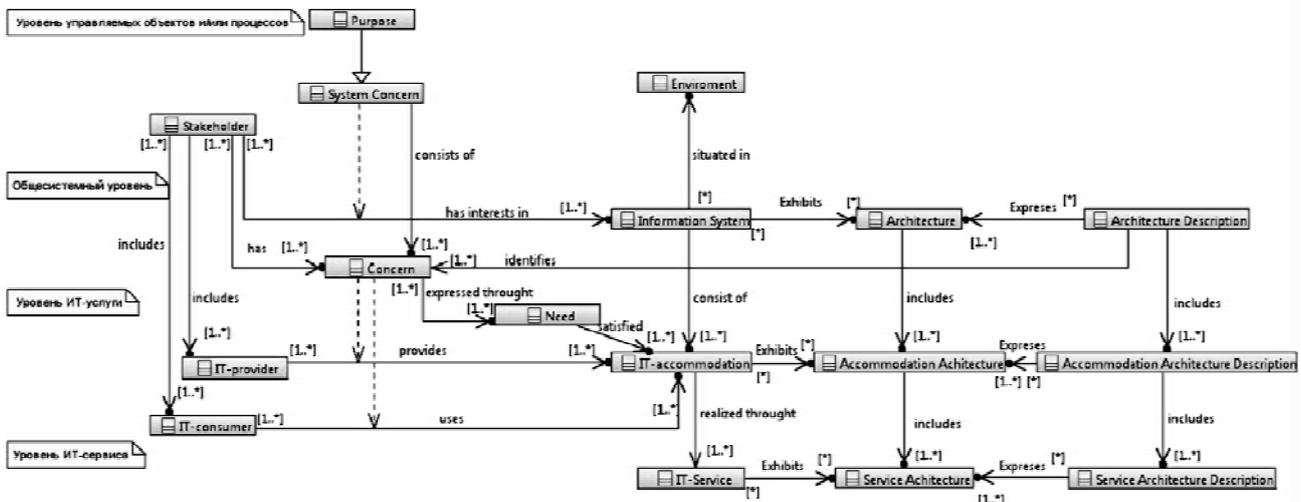


Рис. 4. Контекстная диаграмма классов, отражающая основные взаимосвязи основных элементов, образующих понятие «архитектура информационной системы на основе сервисного подхода»

ное осуществление работы, существенной для реализации потребностей (элементов требований), выдвигаемых к системе. Поэтому вариант проектирования ИС снизу вверх посредством сборки ИТ-услуг из отдельных ИТ-сервисов позволяет получить максимальный эффект от использования готовых решений в ходе разработки ИС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. SOA и EDA: разные архитектуры или одна и та же? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://erpnews.ru/doc2713.html>. – Заголовок с экрана.
2. Parikh, A. SOA в реальности [Электронный ресурс] / Ash Parikh, Murty Gurajada. – Режим доступа: <http://erpnews.ru/doc2610.html>. – Заголовок с экрана.
3. Luckham, D. The Beginnings of IT Insight: Business Activity Monitoring [Электронный ресурс] / D. Luckham. – Режим

доступа: <http://complexevents.com/media/articles/cep-article-three.pdf>. – Заголовок с экрана.

4. ГОСТ ИСО/МЭК 15288–2005. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем [Текст]. – Введ. 01–01–2007. – М. : Стандартинформ, 2006. – 57 с.
5. ISO/IEC/IEEE 42010 Website [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.iso-architecture.org/ieee-1471/index.html>. – Заголовок с экрана.
6. Деревянко, А. С. Технологии и средства консолидации информации [Текст] / А. С. Деревянко, М. Н. Солощук. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 432 с.
7. Евланов, М. В. Глобальные цели поставщика и потребителя ИТ-услуг [Текст] / М. В. Евланов, О. Е. Неумывакина, А. Ю. Карамышева // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 5/2 (59). – С. 12–17.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2013.

Свланов М. В.

Канд. техн. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна

ОНТОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ АРХІТЕКТУРИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ СЕРВІСНОГО ПІДХОДУ

В статті розглянуто сучасні представлення терміну «архітектура», які використовуються під час розробки інформаційних систем різного призначення. Розглянуто особливості сервісного підходу до представлення інформаційної системи. Запропоновано уточнені терміни «архітектура ІТ-послуг» та «архітектура ІТ-сервісів». Розроблені візуальні моделі взаємозв'язків основних елементів, що утворюють терміни «сервісний підхід до розробки інформаційної системи» та «архітектура інформаційної системи».

Ключові слова: інформаційна система, архітектура, ІТ-послуга, ІТ-сервіс, діаграма класів.

Ievlanov M. V.

Ph.D. of Engineering sciences, Kharkov National University of Radio Electronics, Ukraine

ONTOLOGICAL MODEL OF INFORMATION SYSTEM ARCHITECTURE, BASED ON SERVICE APPROACH

The article describes the concept of modern ideas of «architecture», which are used in the development of information systems for different purposes. The features of the service approach to the representation of the information system are considered. Proposed refinement of the concept of «architecture of IT services» and «architecture of IT services». Visual models of the relationship major elements for the concepts «service approach to the development of information systems» and «information system architecture» are developed.

Keywords: information system, architecture, IT-accommodation, IT-service, class diagram.

REFERENCES

1. SOA i EDA: raznye arkhitektury ili odna i ta zhe? [Elektronnyj resurs], Rezhim dostupa: <http://erpnews.ru/doc2713.html>, Zagolovok s ekrana.
2. Parikh A., Murty Gurajada. SOA v real'nosti [Elektronnyj resurs], Rezhim dostupa: <http://erpnews.ru/doc2610.html>, Zagolovok s ekrana.
3. Luckham D. The Beginnings of IT Insight: Business Activity Monitoring [Elektronnyj resurs], Rezhim dostupa: <http://complexevents.com/media/articles/cep-article-three.pdf>, Zagolovok s ekrana.

4. GOST ISO/MEK 15288–2005. Sistemnaya inzheneriya. Processy zhiznennogo cikla sistem [Tekst], Vved. 01–01–2007, Moscow, Standartinform, 2006, 57 p.
5. ISO/IEC/IEEE 42010 Website [Elektronnyj resurs], Rezhim dostupa: <http://www.iso-architecture.org/ieee-1471/index.html>, Zagolovok s ekrana.
6. Derevyanko A. S., Soloshhuk M. N. Tekhnologii i sredstva konsolidacii informacii [Tekst]. Har'kov, NTU «XPI», 2008, 432 p.
7. Evlanov M. V. Neumyvakina O. E., Karamysheva A. Yu. Global'nye celi postavshhika i potrebitelya IT-uslug [Tekst], Vostochno-evropejskij zhurnal peredovykh texnologij, 2012, No. 5/2 (59), pp. 12–17.

ANALYTICAL SUPPORT OF REQUIREMENTS DEVELOPMENT FOR INTELLIGENT E-LEARNING SYSTEMS

The problems of analysis and modeling of requirements while development of e-learning systems with feedback are considered. Subject area of requirements development is determined, choice of CASE-tools for creating models from generated subject area is explained. Visual models of functional requirements and user requirements in the form of diagrams showing the development of behavior and the logical structure of the system are developed. Simulation models explain the events and the corresponding response of the system and can represent its processes of interaction on more higher level of abstraction and allow to reveal incorrect, inconsistent, missing or redundant requirements. Consequence diagram, diagram of cooperation and state transition diagram are considered as analytical support of requirements development for intelligent e-learning systems.

Keywords: analytical support, e-learning, requirements development.

INTRODUCTION

Information and computer technologies are an integrate part of the present society, especially in the sphere of education including higher education of Ukraine which is under the influence of Bologna Process now. Learning process in a modern university requires using of e-learning tools as a part of independent work of undergraduate and Master students. Creation of intelligent computer systems allowing to master skills and competencies without teacher's involvement is a mainstream of e-learning development and enhancement [1].

E-learning system must perform not only function related to providing the theoretical material, but also controls function of learning, testing, solving tasks and students estimation with searching of «blind» spots in their answers and providing recommendations for returning to the part of theoretical material, which has caused difficulties, or for additional training in testing part. In addition, the recommendations should contain information about errors appearing, ways of their eliminating and about the level of knowledge. So, the distinctive feature of intelligent e-learning is a presence of electronic feedback to students that can improve mastering of material studied. Electronic feedback is maintained by special interactive modules which are responsible for estimation of student answers and diagnosis of place and type of errors made (often poorly formalized) [2, 3].

The analysis of existing e-learning computer systems shows that they are mostly presented as testing and information systems without any kind of learning process feedback, so they can not be consider as the intelligent ones. One of the great disadvantage of such systems is that they can not be used throughout the whole cycle of learning process and limited by certain set of primitive functions (such as e-books, educational databases, etc.). Thus, the practical importance and actuality of given problem is proved by necessity of elaboration computer systems with electronic feedback that would make learning process more effective and convenient for self-development of persons trained [4].

PROBLEM STATEMENT

The problem of intelligent computer systems elaboration is considered as a creation of complex computer projects and associated closely with the development of requirements for their structure, functions and software content. Requirements describe behavior of the system, the properties of the system, its classes and attributes and restrict the process of a computer system developing [5].

Analysis and modeling of requirement demand special formalized approaches which could consider interests of all persons involved in e-learning process: students with different psycho-types, levels of basic knowledge, speed of processing and perception of information and teachers with theirs experience «how to do», «how to teach», «how to estimate» and «how to determine a genuine reason of a mistake made». Moreover other external facts such as norms of curriculums, learning catalogues, etc. should be taken into account also.

Investigation of given poor formalized subject area proves that elaboration of complex computer system is impossible without analytical support of requirements development. Analytical support of process of requirements development for intelligent e-learning system must contain formalized view of its functions, states and transitions, logical aspects of actions sequence and collaboration between its elements in the form of adequate visual models of functional and user requirements.

PROBLEM SOLVING

User requirements describe goals and tasks which e-learning system allows to solve and indicate what a person trained can do with the system. The ways of presenting this kind of requirements are options of scenarios usage and approach «event-response» [5]. Functional requirements determine software functionality that developers need to build and users would be able to perform. To cover all requirements it is necessary to develop models which display them on a certain level of abstraction and allow to reveal

incorrect, inconsistent, missing or redundant requirements. Data flow diagrams, state transition diagrams, sequence and collaborations diagrams are referred to such conceptual representation of given intelligent computer system. Each model describes a specific aspect of the system, uses a set of diagrams or formal descriptions and documents of specified format and also reflects the point of view and is the subject of a variety of people with specific interests, roles or tasks. These models provide a useful tool for analyzing problems, software design and exchange of information between modules developed. Simulation enhances the functional and users requirements coverage and handling and improves the quality of the system [6].

The most effective way of visual models creating is using the special standard language of object-oriented modeling – Unified Modeling Language (UML) [7]. At the level of abstractions diffraction, which is suitable for the analysis of requirements, UML-notation is used for all types of intelligent e-learning system diagrams. Analysis modeling techniques are under supports of a variety of business automation tools and software design known as computer-aided software engineering (CASE) [8]. This choice is due to the next advantages over conventional means of drawing: 1) they easily allow to improve the quality of the diagrams in repeated requirements (since, one can not create an excellent model with the first time and there are some external and internal changes during simulation process, thus, iteration can be a key to success in simulation of systems); 2) CASE-

tools support the rules for each modeling method and can identify syntax errors, inconsistencies and detect semantic errors in the chart that is not always possible to do manually.

On fig. 1 and fig. 2 sequence diagram and diagram of collaboration which show transactions between separate modules of intelligent e-learning system are presented.

They reflect how systems modules exchange data in dynamics and shows interactions of classes and messages exchanged for better understanding user requirements. Part of state transition diagram (acceptance of person’s answer and comparing with the right one) is presented on fig. 3 and forms complete and clear understanding of the mechanism of a final number of states.

State transition diagram contains three types of elements: initial, final states and state transitions. The diagram shows the state transition as not a part of processes performed by the system, but the only possible state changes, resulting from these processes. Transition diagram helps to understand the intended behavior of system and checking whether all the necessary states and state transitions are described correctly and fully in the functional requirements.

CONCLUSION

Simulation models of user and functional requirements were elaborated on the basis of CASE-tools and provide an analytical support explaining the events and the corresponding responses of the system. It represents process of modules interaction on more higher level of

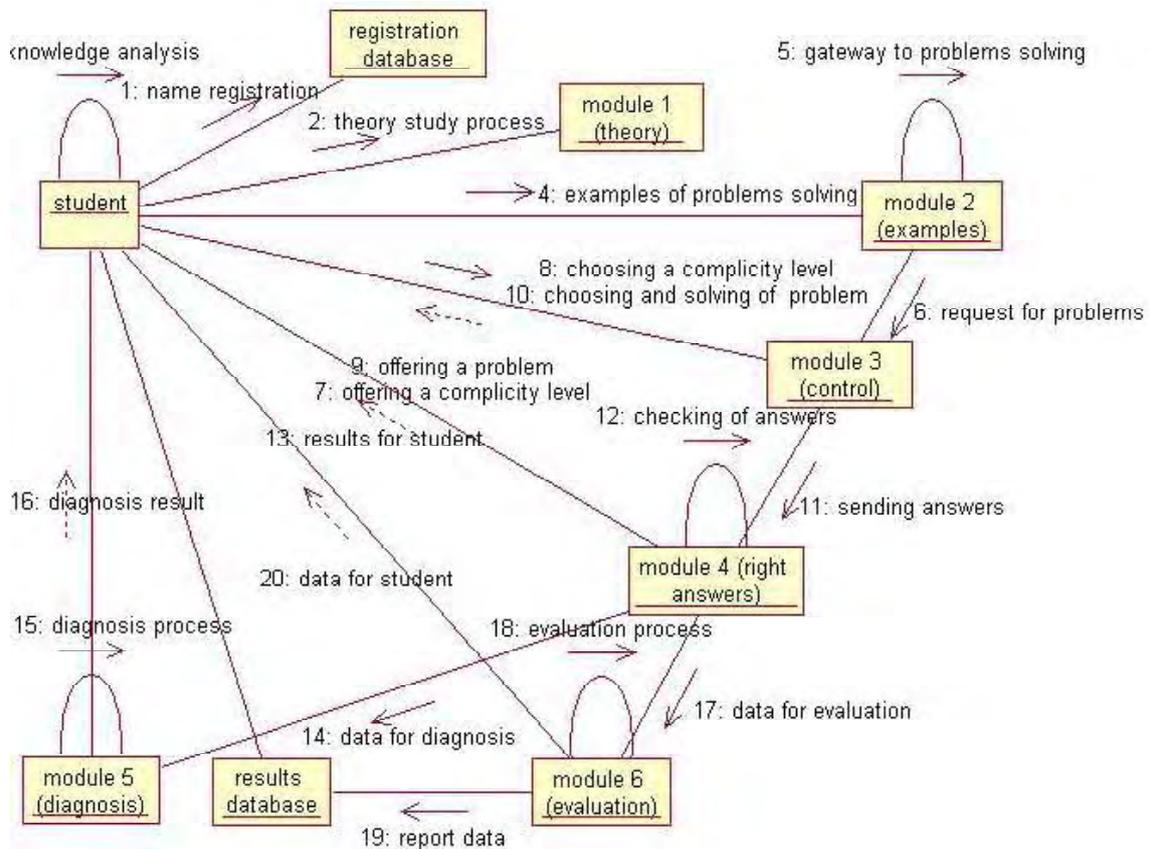


Fig. 1. Intelligent e-learning system collaboration diagram

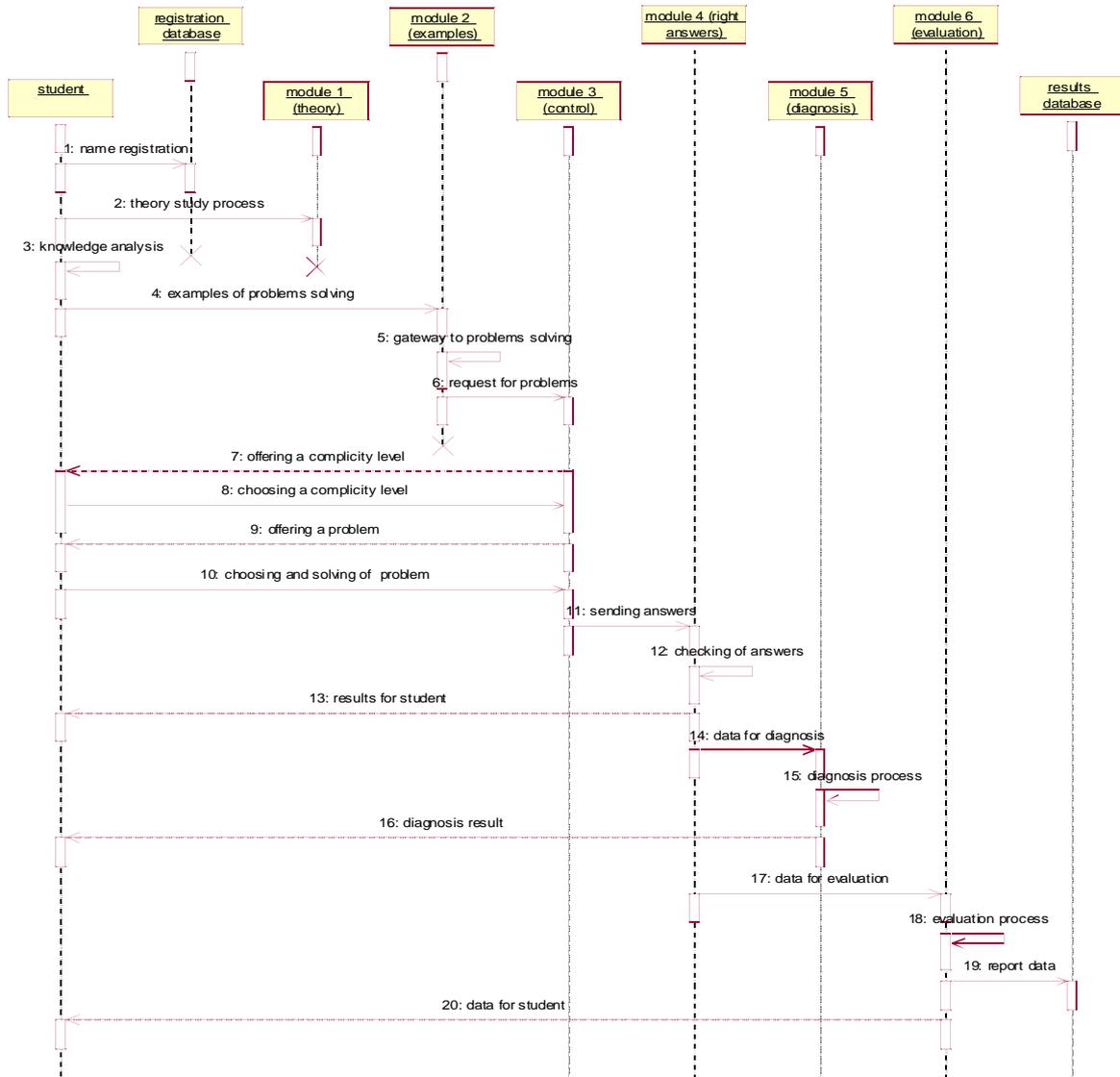


Fig. 2. Intelligent e-learning system sequence diagram

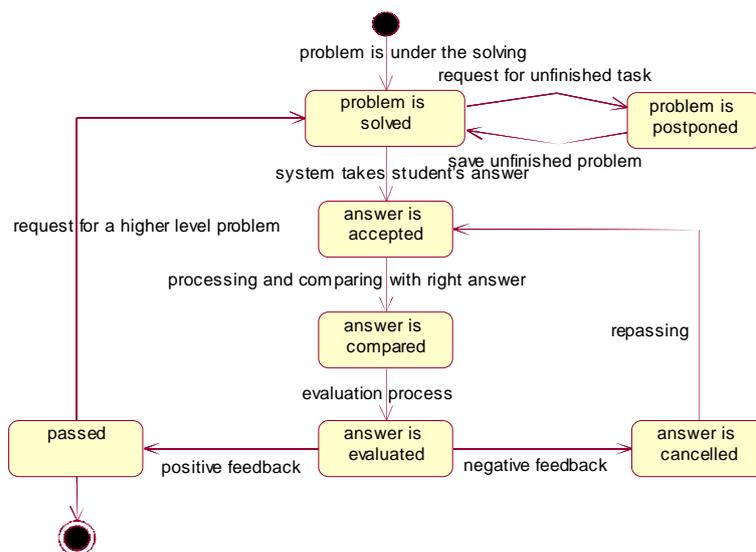


Fig. 3. Part of intelligent e-learning system state transition diagram

understanding than the one that gives the text specification requirements. However, they could not replace the specification requirements on natural language at all because each simulation received has its advantages and its limitations. Visual modeling of intelligent e-learning system is a way of problems perception with visible abstractions, concepts and reproducing of real-world objects. Modeling is carried out through UML-language which includes specified graphical elements of the model and notations. Presented models are various diagrams associated with each other and with their common data definitions in the data dictionary that allows to maintain the model in a consistent state and in accordance with the functional and users requirements for software content.

SPISOK LITERATURY

1. *Пищурина, О. А.* Интеллектуальные обучающие системы в сфере технического образования / О. А. Пищурина // Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні: ІКТМ-2010». – Харків : Нац. аерокосм. ун-тет. – 2010. – Т. 2. – С. 118.
2. *Пищурина, О. А.* Подход к формированию обратной связи в интеллектуальных обучающих системах в сфере высшего технического образования / О. А. Пищурина, А. Ю. Клочок // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2011. – № 2(25). – С. 107–110.
3. *Pishchukhina, O. A.* Algorithm of computer learning programs with feedback development / О. А. Pishchukhina, А. Yu. Klochok // Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні: ІКТМ-2011». – Х. : Нац. аерокосм. ун-тет. – 2011. – Т. 2 – С. 123.
4. *Кулик, А. С.* Модели и алгоритмы поиска ошибок при решении задач с использованием компьютерных средств обучения. / А. С. Кулик, О. А. Пищурина, А. Ю. Клочок // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2012. – № 1(26). – С. 59–63.
5. *Вигерс, К.* Разработка требований к программному обеспечению : пер. с англ. / К. Вигерс. – М. : Издательско-торговый дом «Русская редакция», 2004. – 576 с.
6. *Рамбо, Дж.* UML 2.0. Объектно-ориентированное моделирование и разработка. 2-е изд.: Пер. с англ. / Дж. Рамбо, М. Блаха. – СПб. : Питер, 2007. – 544 с.
7. *Буч, Г.* Язык UML. Руководство пользователя : пер. с англ. / Г. Буч, Д. Рамбо, А. Джекобсон. – М. : ДМК, 2001. – 432 с.
8. *Боггс, У.* UML и Rational Rose 2002: Пер. с англ. / У. Боггс, М. Боггс. – М. : ЛОРИ, 2004. – 580 с.

Стаття надійшла до редакції 28.10.2013.

Пищурина О. А.

Канд. техн. наук, доцент, Харьковский Национальный университет радиоэлектроники, Украина

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ПОДДЕРЖКА РАЗРАБОТКИ ТРЕБОВАНИЙ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ ОБУЧЕНИЯ

Рассмотрены вопросы анализа и моделирования требований при разработке средств электронного обучения с обратной связью. Определена предметная область формирования требований, обоснован выбор CASE-средств для построения моделей сформированной предметной области. Разработаны визуальные модели функциональных требований и требований пользователя в виде диаграмм, отражающих динамику поведения и логическую структуру системы. Приведенные диаграммы представляют собой инструментальное средство аналитической поддержки процесса формирования требований к интеллектуальным компьютерным системам обучения.

Ключевые слова: аналитическая поддержка, электронное обучение, разработка требований.

Пищурина О. О.

Канд. техн. наук, доцент, Харьківський Національний університет радіоелектроніки, Україна

АНАЛІТИЧНА ПІДТРИМКА РОЗРОБКИ ВИМОГ ДЛЯ ІНТЕЛЛЕКТУАЛЬНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ, ЩО НАВЧАЮТЬ

Розглянуто питання аналізу та моделювання вимог при розробці засобів електронного навчання зі зворотним зв'язком. Визначено предметну область формування вимог, обґрунтовано вибір CASE-засобів для побудови моделей сформованої предметної області. Розроблено візуальні моделі функціональних вимог і вимог користувача у вигляді діаграм, що відображають динаміку поведінки і логічну структуру системи. Наведені діаграми є інструментальним засобом аналітичної підтримки процесу формування вимог до інтелектуальних комп'ютерних систем навчання.

Ключові слова: аналітична підтримка, електронне навчання, розробка вимог.

REFERENCES

1. Pishhuhina O. A. Intellektual'nye obuchajushhie sistemy v sfere tehničeskogo obrazovanija, *Vseukraїns'ka naukovotehnična konferencija «Integrovani komp'juterni tehnologii v mashinobuduvanni: IKTМ-2010»*, Harkiv, Nac. aerokosm. un-tet., 2010, Vol. 2, p. 118.
2. Pishhuhina O. A., Klochok A. Ju. Podhod k formirovaniju obratnoj svjazi v intellektual'nyh obuchajushhijh sistemah v sfere vysshego tehničeskogo obrazovanija, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2011, No. 2, pp. 107–110.
3. Pishchukhina O. A., Klochok A. Yu. Algorithm of computer learning programs with feedback development, *Vseukraїns'ka naukovotehnična konferencija «Integrovani komp'juterni tehnologii v mashinobuduvanni: IKTМ-2011»*, Harkiv: Nac. aerokosm. un-tet, 2011, Vol. 2, pp. 123.
4. Kulik A. S., Pishhuhina O. A., Klochok A. Ju. Modeli i algoritmy poiska oshibok pri reshenii zadach s ispol'zovaniem komp'juternyh sredstv obuchenija, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2012, No. 1, pp. 94–98.
5. Vigers K. Razrabotka trebovanij k programmnomu obespečeniju.: per. s angl., Moscow, Izdatel'sko-torgovij dom «Russkaja redakcija», 2004, 576 p.
6. Rambo Dzh., Blaha M. UML 2.0. Ob'ektno-orientirovannee modelirovanie i razrabotka. 2-e izd.: per. s angl. Sankt-Peterburg, Piter, 2007, 544 p.
7. Buch G., Rambo D., Dzhekobson A., Jazyk UML. Rukovodstvo pol'zovatelja, per. s angl., Moscow, DMK, 2001, 432 p.
8. Boggs U., Boggs M. UML i Rational Rose 2002: per. s angl., Moscow, LORI, 2004, 580 p.

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НОМЕРА НА ЧУГУНОВОЗНОМ КОВШЕ

В статье рассматривается информационная технология определения номера на чугуновозном ковше. Выделены и раскрыты этапы обработки: предварительная фильтрация и неполная пороговая обработка глобальной бинаризацией, локализация при помощи кластеризации изображения и идентификация, при помощи оригинального метода, базирующегося на нечетком представлении изображений и сравнении их с нечеткими эталонами. В результате проведенных экспериментов подтверждается эффективность обработки по предлагаемой технологии.

Ключевые слова: изображение, функция яркости, фильтрация, бинаризация, кластеризация, сегмент, идентификация, нечеткое представление, эталон.

ВВЕДЕНИЕ

Для транспортировки чугуна от доменных печей к миксерному отделению кислородно-конверторного цеха (ККЦ) используются ковши. Для учета и контроля над их состоянием используется автоматизированная система мониторинга, отслеживающая передвижение перевозящих ковши платформ. Такая система не предусматривает ситуацию, в которой ковш будет установлен не на «свою» платформу.

Для усовершенствования автоматизированной системы мониторинга движения чугуновозных ковшей, было предложено прибегнуть к оптическому распознаванию номера.

В ходе транспортировки и выполнения технологических операций ковши подвергаются воздействию высоких температур, могут приобретать нашлапки чугуна и потеки извести, значительно пылиться. Поэтому на производстве используется наиболее устойчивый способ – вручную (без трафарета) известью наносится номер.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Анализ литературных источников показал, что для решения аналогичных задач используют различные средства для решения задачи распознавания [1–4] – адаптивное распознавание символов, применение клеточных автоматов, моделирование нейросети для решения задачи идентификации символов. Наиболее близкой к задаче распознавания номера на ковше является распознавания номера на железнодорожных вагонах [5]. Известны системы для учета контейнерных перевозок в порту, терминале или на сортировочной станции: Карго-Инспектор, Контейнер-КОНТРОЛЬ; для контроля подвижного состава и грузов, доставляемых по железной дороге: Транзит-Инспектор [6]; ARSCIS [7]; Видеолокатор [8]; RailwayDisp [9].

Разработанные системы и программные продукты имеют ряд недостатков: неустойчивость к плохому качеству освещения, для удобства локализации номера на

объектах нанесены с помощью трафаретов, программы используют привязку к шаблонам номерных знаков транспортных средств конкретных стран, для которых они разработаны. Если система дает хороший результат локализации и высокую скорость работы, то она имеет высокую стоимость. В таких системах алгоритм локализации производит поиск зон – прямоугольных фрагментов изображения, предположительно содержащих образ текстовой метки, с помощью сканирующего окна фиксированного размера. Результат локализации снижается при сильной загрязненности цистерн и вагонов.

Поэтому рассмотренные методы локализации не могут быть в чистом виде применены для решения имеющейся задачи. Необходимо улучшить идентификацию за счет новой информационной технологии определения номера на чугуновозном ковше.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Камерой в градациях серого цвета получается изображение ковша с номером. Входящее изображение (рис. 1) может быть зашумлено и содержать элементы, искажающие идентифицируемый номер (потеки извести, чугуна, налипшую пыль и прочее); содержать неинформативные высокояркостные участки (небо, стена, элементы близстоящих металлоконструкций); обладать разным уровнем освещенности из-за времени дня, метеословий. Необходимо идентифицировать ковш по изображению его номера.

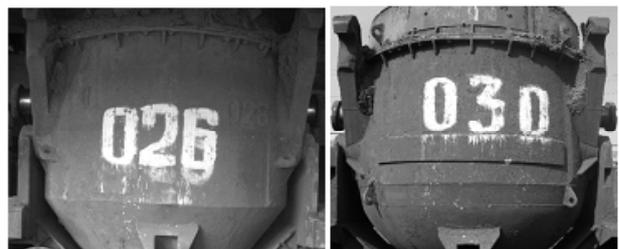


Рис. 1. Пример исходных фотоизображений

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ПОДХОД

Проводимую обработку можно разделить на этапы: предварительная обработка – фильтрация и бинаризация, локализация номера и идентификация.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЯ

На вход системы поступает изображение, ширина и высота которого $m \times n$. Изображение характеризуется функцией яркости (1):

$$f_{i,j} \in [0,1], \quad (1)$$

где $i \in [0, m-1]$, $j \in [0, n-1]$.

Средняя яркость фотографии рассчитывается:

$$\bar{F} = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} f_{i,j}}{m \times n}. \quad (2)$$

На данном этапе входящие фотоизображения подвергаются фильтрации и бинаризации. Были исследованы и опробованы: фильтр арифметическое среднее, медианный фильтр, ранговая фильтрация, адаптивная фильтрация Винера, оптимизированная операция фильтрации [10]. В результате экспериментов наименьшее время выполнения показал фильтр «арифметическое среднее», но оказался неприемлемым, поскольку «смазывает» область интереса и размывает шум, увеличивая яркость неинформативных частей изображения. Наиболее эффективной оказалась работа медианного фильтра, оптимизированного по скорости выполнения [11], который и был выбран для предварительной обработки входных изображений – область интереса очерчивается четче, мелкий шум нивелируется и более крупные области высокой яркости уменьшаются.

Далее производится неполная пороговая обработка глобальной бинаризацией изображения:

$$\Phi_{i,j} = \begin{cases} 0, & \text{если } f_{i,j} < T \\ f_{i,j}, & \text{если } f_{i,j} \geq T \end{cases}, \quad (3)$$

где T – порог.

Расчет порогового значения происходит автоматически на основе низкоуровневой характеристики изображения – его средней яркости [12]:

$$T = 2 \cdot \bar{F} - \bar{F}^2. \quad (4)$$

Вид получаемого при проведении обработки изображения приводится далее в компьютерном эксперименте.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ НОМЕРА НА ИЗОБРАЖЕНИИ

Экспериментально были рассмотрены следующие методы: на основе низкоуровневых характеристик изображения (показал достоверность локализации 92 %) и на основе пороговой обработки и кластеризации (показал достоверность 96 %) [12, 13].

При обработке по описываемой технологии используется метод с более высокой достоверностью локализации. По этому методу, изображение после предварительной обработки, разбивается на равные ячейки (по ширине – kx , по высоте – ky). Количество элементов в ячейке по ширине – $px = m/kx$, по высоте – $py = n/ky$. Для каждой ячейки рассчитывается средняя яркость $M_{i,j}$:

$$M_{i,j} = \frac{\sum_{l=0}^{px-1} \sum_{k=0}^{py-1} \Phi_{l,k}}{px \cdot py}, \quad (5)$$

где $i \in [0, kx-1]$, $j \in [0, ky-1]$, $l \in [0, px-1]$, $k \in [0, py-1]$.

Далее выполняется кластеризация изображения по яркости ячеек, т.е. по значениям матрицы M . Кластеризация производится методом поиска ближайшего соседа с модификацией поиска и использованием скользящего окна. Соответственно массиву M образовывается массив K , содержащий имена кластеров. Перед обработкой все элементы принадлежат нулевому кластеру. Если анализируемое значение $M_{i,j}$ имеет яркость больше порога σ – то соответствующему значению $K_{i,j}$ назначается имя кластера, которое уже присвоено одному из элементов в апертуре – $K_{i-1,j}$, $K_{i+1,j}$, $K_{i,j-1}$ или $K_{i,j+1}$, если его значение 0 – то $K_{i,j}$ дается новое имя, следующее по счету число после уже присвоенных.

Для локализации информативной области анализируется массив K : подсчитывается количество элементов в каждом кластере. Информативной областью считается кластер, обладающий наибольшим количеством элементов. Вокруг этого кластера по самым выпирающим точкам описывается прямоугольник, координаты пикселей, входящих в прямоугольник, фиксируются. По локализованной области формируется выходной сегмент, внешний вид которого приводится далее в компьютерном эксперименте.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НОМЕРА

Идентификация номера чугуновозного ковша происходит при помощи оригинального метода, базирующегося на нечетком представлении изображений и сравнении их с эталонными сегментами [14]. Идея метода идентификации состоит в следующем: вначале необходимо найти общую область двух сопоставляемых разновеликих сегментов, именуемых ядром; с этим ядром необходимо связать систему координат и пересчитать пиксельное представление обоих изображений в одну систему координат.

Начало системы координат ядра поместить в характеристическую точку представления изображения цифр – это точка, которая рассчитывается как центр тяжести изображения. Ядра анализируемого сегмента и прототипа $\{A''\}, \{B''\}$ разбиваются на блоки $\Omega_{i,j}$ размером

$n \times n$. Количество блоков для множеств $\{A^n\}, \{B^n\}$ рассчитывается: $C = \text{round}(W/n)$; $D = \text{round}(H/n)$.

Множество блоков ядер изображения и прототипа обозначим:

$$\Omega^A = \left\{ \Omega_{r,s}^A \mid r = \overline{1, C}; s = \overline{1, D} \right\},$$

$$\Omega^B = \left\{ \Omega_{r,s}^B \mid r = \overline{1, C}; s = \overline{1, D} \right\}.$$

Отдельные блоки $\Omega_{r,s}^A$ и $\Omega_{r,s}^B$ множеств Ω^A и Ω^B , соответственно, задаются двумя характеристиками: множеством координат пикселей, входящих в блок:

$$\Omega_{r,s}^A = \Omega_{r,s}^B = \left\{ (i, j) \mid i = \overline{(C-1) \cdot n + 1, C \cdot n}, j = \overline{(D-1) \cdot n + 1, D \cdot n} \right\},$$

и множеством бинаризованных функций яркости:

$$g_A : \Omega_{r,s}^A \rightarrow [0, 1], g_B : \Omega_{r,s}^B \rightarrow [0, 1].$$

Вводим два нечетких множества $\tilde{\Omega}^A, \tilde{\Omega}^B$, которые определены на универсальных множествах Ω^A, Ω^B их функции принадлежности:

$$\mu_{\tilde{\Omega}^A} \left(\Omega_{r,s}^A \right) = \frac{\sum_{i,j \in \Omega_{r,s}^A} g_A(i, j)}{|\Omega_{r,s}^A|},$$

$$\mu_{\tilde{\Omega}^B} \left(\Omega_{r,s}^B \right) = \frac{\sum_{i,j \in \Omega_{r,s}^B} g_B(i, j)}{|\Omega_{r,s}^B|}. \quad (6)$$

В результате получаем нечеткие множества:

$$\tilde{\Omega}^A = \left\{ \Omega_{r,s}^A \mid \mu_{\tilde{\Omega}^A} \left(\Omega_{r,s}^A \right) \right\}, \tilde{\Omega}^B = \left\{ \Omega_{r,s}^B \mid \mu_{\tilde{\Omega}^B} \left(\Omega_{r,s}^B \right) \right\}. \quad (7)$$

Затем находим относительное расстояние Хемминга:

$$\rho \left(\tilde{\Omega}^A, \tilde{\Omega}^B \right) = \frac{\sum_{r=1}^C \sum_{s=1}^D \left| \mu_{\tilde{\Omega}^A} \left(\Omega_{r,s}^A \right) - \mu_{\tilde{\Omega}^B} \left(\Omega_{r,s}^B \right) \right|}{|\Omega^A|}. \quad (8)$$

Для анализируемого сегмента и всех прототипов, имеющих в базе данных, рассчитывать значения относительного расстояния Хемминга и отсортировать их по убыванию.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Выполнена поэтапная обработка входного изображения с иллюстрацией получаемых результатов. Представ-

лена обработка изображений ковшей с номерами 026 и 030. При идентификации с различными эталонами проведено сравнение сегмента изображения ковша с № 026.

Этап 1 – предварительная обработка.

На вход подавались изображения, показанные на рис.

1. Результат показан на рис. 2.

Этап 2 – локализация.

На вход подавались изображения, показанные на рис.

2. Результирующие сегменты приведены на рис. 3.

Этап 3 – идентификация.

Было проведено сравнение полученных сегментов ковшей со всеми сегментами-прототипами, хранящимися в базе данных. По наименьшему значению расстояния Хемминга определялся эталон и соответствующий номер на изображении ковша. Из рис. 4 видно, что анализируемому сегменту соответствует эталон с номером 026, т. е. идентификация успешна.

ВЫВОДЫ

Компьютерный эксперимент идентификации номера ковша по предложенной в статье технологии подтвердил достаточно высокую эффективность обработки. Так, относительное расстояние Хемминга при сравнении изображений сегментов фото одного и того же ковша



Рис. 2. Пример исходных фотоизображений



Рис. 3. Примеры выделенных областей интереса

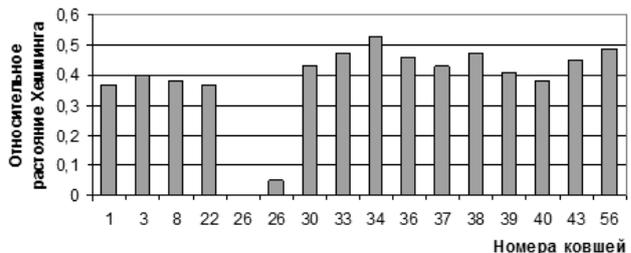


Рис. 4. Относительное расстояние Хемминга при сравнении сегмента ковша № 026 и эталонов ковшей с номерами: № 01, 03, 08, 022, 026, 026, 030, 033, 034, 036, 037, 038, 039, 040, 043, 056

для різних умовий склало 0,01÷0,16, для різних ковшеї – 0,26÷0,49, що достатньо для прийняття рішення о нахожденні оцнки близости в діапазоні варіацій вншних умовий сьмки номера ковша, соотвествующей эталону или не принадлежащей этому эталону. Ошибки первого рода находятся в диапазоне 0÷0,07, второго рода в диапазоне 0÷0,01. Средняя погрешность идентификации составила 4 %.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Тэрано, Т. Прикладные нечеткие системы / Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно ; пер. с япон. Ю. Н. Чернышова. – М. : Мир, 1993. – 368 с.
2. Арлазаров, В. Л. Адаптивное распознавание символов [Электронный ресурс] / В. Л. Арлазаров, В. В. Троянкер, Н. В. Котович // Режим доступа к статье: <http://www.cuneiform.ru/tech/adaptive.html>
3. Васюра, А. С. Моделирование нейросети для решения задачи идентификации символов [Электронный ресурс] / А. С. Васюра, Т. Б. Мартынюк, Л. М. Куперштейн // Наукові праці ВНТУ. – 2007. – № 1. – Режим доступа к статье: www.nbu.v.gov.ua/e-journals/VNTU/2007-1/ru/07vasosi_ru.pdf
4. Zhang, L. Italic Font Recognition Using Stroke Pattern Analysis on Wavelet Decomposed Word Images, / L. Zhang, Y. Lu, C. L. Tan // The 17th International Conference on Pattern Recognition, ICPR2004, Cambridge, United Kingdom, 23–26 August 2004. – vol. 4. – pp. 835–838 // Режим доступа к статье www.comp.nus.edu.sg/~tancl/Papers/ICPR04/Italic_DIAL2004.pdf
5. Смирнов, А. Е. Метод распознавания номера вагона с помощью механизма нечеткого вывода / А. Е. Смирнов // Вестник РГРТУ. – 2007. – Вып. 22. – С. 24–27.
6. Распознавание номеров вагонов // Транзит-Инспектор URL: <http://www.iss.ru/products/transit/> (дата обращения: 07.07.2013).
7. Система распознавания номеров вагонов, учет вагонов, контроль вагонов, учет простоя вагонов, ЭТРАН, МЕТ-ТЛЕР ТОЛЕДО // Система распознавания номеров вагонов «ARSCIS» и автоматизированные системы управления железнодорожными грузоперевозками URL: <http://www.mallenom.ru/arscis.php> (дата обращения: 07.07.2013).
8. Распознавание номеров ЖД вагонов // Технология «Видеолокатор» URL: <http://www.iss.ru/products/transit/> (дата обращения: 07.07.2013)
9. Система распознавания номеров железнодорожных вагонов RailwayDisp // Intlab URL: http://www.intlab.ru/page.php?ipage=railwaydisp_info (дата обращения: 07.07.2013).
10. Дьяконов, В. П. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник / В. П. Дьяконов, И. В. Абраменкова. – С.Пб. : Питер, 2002. – С. 517–584.
11. Бровко, Р. С. Оптимизированный вариант реализации медианного фильтра / Р. С. Бровко, В. В. Мухин // Вісник Запорізького національного університету. – 2010. – № 2. – С. 18–23.
12. Сергиенко, А. В. Метод локализации информативных областей на изображении на основе пороговой обработки и кластеризации // IX Міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки»: збірка доповідей. – К. : НТУУ «КПІ», 2013. – Т. 2. – С. 488–491.
13. Метод локализации информативных областей на основе низкоуровневых характеристик изображения / [Каргин А. А., Сергиенко А. В., Пятикоп Е. Е., Плескачевская В. С.] // Системы обработки информации : сб. науч. трудов. – ХНТУ. – Харьков, 2013. – Вып. 1 (108). – С. 61–66.
14. Каргин, А. А. Идентификация номера чугуновозного ковша по сегменту изображения сравнением его с эталонным сегментом / А. А. Каргин, А. В. Сергиенко // Проблеми інформаційних технологій, зб. наук. праць. – Херсон, 2010. – Вып. 7. – С. 114–121.

Стаття надійшла до редакції 13.08.2013.

Сергиенко А. В.¹, Каргин А. А.²

¹Асистент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, Україна

²Д-р техн. наук, професор Донецького національного університету, м. Донецьк, Україна

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ НОМЕРА НА ЧАВУНОВОЗНОМУ КОВШІ

У статті розглядається інформаційна технологія визначення номера на чавуновозному ковші. Виділені й розкриті етапи обробки: попередня фільтрація й неповна гранична обробка глобальною бінаризацією, локалізація за допомогою кластеризації зображення й ідентифікація, за допомогою оригінального методу, що базується на нечіткому представленні зображень і порівнянні їх з нечіткими еталонами. У результаті проведених експериментів підтверджується ефективність обробки за пропонуваною технологією.

Ключові слова: зображення, функція яскравості, фільтрація, бінаризація, кластеризація, сегмент, ідентифікація, нечітке представлення, еталон.

Sergienko A. V.¹, Kargin A. A.²

¹Assistant, Priazovskiy State Technical University, Mariupol, Ukraine

²Doctor of technical science, professor, Doneckiy National University, Doneck, Ukraine

INFORMATION TECHNOLOGY FOR RECOGNITION OF THE NUMBER ON THE HOT METAL TRANSFER LADLE

The article describes the information technology for recognition of the number on the hot metal transfer ladle. Processing stages have been identified and described: preliminary processing, localization and number identification. The filtration and incomplete thresholding by means of global binarization with an automatic choice of a threshold have been analyzed. Localization is executed by a single linkage (the nearest neighbour) method with the modified windowing search algorithm. After localization area has been identified, a segment is generated. Identification is accomplished by means of a unique method, which is based on an indistinct representation of images and their comparison with indistinct standards. Combining in a characteristic point the segment which is being analyzed with a prototype segment kernels are formed. Those are then fractured into blocks. Based on these blocks two fuzzy sets are obtained – one for the segment that is being analyzed and one for the prototype. For these sets the relative Hamming distance is then calculated. The calculated value shows the degree of similarity of the segments. During the tests it was proved that the Hamming distance for the segments with identical

numbers is 0,01÷0,16, whereas for the segments with numbers of different ladles it is 0,26÷0,49, which is enough for a successful identification of a ladle by the image of its number.

Keywords: image, brightness function, filtration, binarization, clusterization, segment, identification, indistinct representation, prototype.

REFERENCES

1. Te'rano T. Asai K., Suge'no M. Prikladny'e nechetkie sistemy', Per. s iapon. Yu. N. Cherny'shova. Moscow, Mir, 1993, 368 p.
2. Arlazarov V. L., Troianker V. V., Kotovich N. V. Adaptivnoe raspoznavanie simvolov [E'lektronny'i' resurs], *Rezhim dostupa k stat'e*, <http://www.cuneiform.ru/tech/adaptive.html>
3. Vasiura A. S., Marty'niuk T. B., Coopershtein L. M. Modelirovanie nei'roseti dlia resheniia zadachi identifikatsii simvolov [E'lektronny'i' resurs], *Naukovi praczi VNTU*, 2007, No. 1, Rezhim dostupa k stat'e: www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2007-1/ru/07vasosi_ru.pdf
4. Zhang L., Lu Y., Tan C. L. Italic Font Recognition Using Stroke Pattern Analysis on Wave-let Decomposed Word Images, *The 17th International Conference on Pattern Recognition, ICPR2004*, Cambridge, United Kingdom, 23–26 August 2004, vol. 4, pp. 835–838, Rezhim dostupa k stat'e www.comp.nus.edu.sg/~tancl/Papers/ICPR04/Italic_DIAL2004.pdf
5. Smirnov A. E. Metod raspoznavaniia nomera vagona s pomoshch'iu mehanizma nechetkogo vy'voda, *Vestneyk RGRTU*, 2007, Vy'p. 22, pp. 24–27.
6. Raspoznavanie numerov vagonov, *Tranzit-Inspektor* URL: <http://www.iss.ru/products/transit/> (data obrashcheniia: 07.07.2013).
7. Sistema raspoznavaniia numerov vagonov, uchet vagonov, kontrol' vagonov, uchet prostoia zagonov, E'TRAN, METTLER TOLEDO, *Sistema raspoznavaniia numerov vagonov «ARSCIS» i avtomatizirovanny'e sistemy' upravleniia zheleznodorozhny'mi gruzopere-vozkami* URL: <http://www.mallenom.ru/arscis.php> (data obrashcheniia: 07.07.2013).
8. Raspoznavanie numerov ZHD vagonov, *Tekhnologiya «Videolokator»* URL, <http://www.iss.ru/products/transit/> (data obrashcheniia: 07.07.2013)
9. Sistema raspoznavaniia numerov zheleznodorozhny'kh vagonov *RailwayDisp*, *Intlab* URL, http://www.intlab.ru/page.php?ipage=railwaydisp_info (data obrashcheniia: 07.07.2013).
10. D'iakonov V. P., Abramenkova I. V. MATLAB. Obrabotka signalov i izobrazhenii'. Spetsial'ny'i' spravochnik, Sankt-Peterburg, Peter, 2002, pp. 517–584.
11. Brovko R. S., Muhin V. V. Optimizirovanny'i' variant realizatsii mediannogo fil'tra, *Visnik Zaporiz'kogo natsional'nogo universitetu*, 2010, No. 2, pp. 18–23.
12. Sergienko A. V. Metod lokalizatsii informativny'kh oblastei' na izobrazhenii na os-nove porogovoi' obrabotki i clasterizatsii, *IX Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia «Grotekhnologii, navigatsiia, keruvanniia ruhom i konstruiuvanniia aviatcii'no-kosmichnoi' tekhniki»*: *Zbirka dopovidei'*, Kiev, NTUU «KPI», 2013, Vol. 2, pp. 488–491.
13. Kargin A. A., Sergienko A. V., Piatikop E. E., Pleskachevskaia V. S. Metod lokalizatsii informativny'kh oblastei' na osnove nizkourovnevy'kh harakteristik izobrazheniia, *Sistemy' obrabotki informatsii : sb. nauk. Trudov*, Har'kov, KHNTU, 2013, Vip. 1 (108), pp. 61–66.
14. Kargin A. A., Sergienko A. V. Identifikatsiia nomera chugunovoznogo kovsha po segmentu izobrazheniia sravneniem ego s e'talonnym segmentom, *Problemi informatsii' nikh tekhnologii'*, *zb. nauk. prace'*. KHerson, 2010, Vip. 7, pp. 114–121.

КОМПРЕССИЯ ULTRA HD-ВИДЕОИНФОРМАЦИИ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЕ

Рассмотрены преимущества и недостатки современного формата представления видеoinформации Ultra HD. Выполнена оценка вычислительной сложности операции поиска векторов движения в видеопоследовательности. Проанализирован метод распределения видеoinформации по узлам распределенной системы, который использован для распараллеливания процесса компрессии видеoinформации на кластере. Экспериментально исследованы объективные показатели результата компрессии Ultra HD-видеоинформации в распределенной системе в зависимости от применяемого алгоритма оценки движения и ширины области поиска векторов движения.

Ключевые слова: Ultra HD-видеоинформация, распределенная компьютерная система, компрессия, битрейт, коэффициент сжатия, уровень искажения, корреляция.

ВВЕДЕНИЕ

Активное развитие формата телевидения высокой четкости (HD television) по всему миру способствовало значительному повышению качества представления видеоконтента. В 2013 году на международной конференции Consumer Electronics Show был представлен формат Ultra HD, суть которого заключается в повышении разрешения видеоконтента с 1920x1080 пикселей до 3840x2160 (4K UHD) и 7680x4320 (8K UHD), максимальная частота кадров повышена с 50 до 120 прогрессивных кадров в секунду [1]. Помимо положительных моментов, новый формат телевидения вносит целый ряд проблем: значительное увеличение объемов хранимых данных, повышение требований к производительности компьютерных систем, осуществляющих обработку и компрессию такой видеoinформации, ужесточение требований к каналам передачи данных.

Одним из путей решения таких проблем может быть применение параллельных и распределенных компьютерных систем для компрессии Ultra HD-видеоинформации. Это позволит добиться ускорения вычислительного процесса и снизить время сжатия видеоконтента.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим основную операцию любого современного алгоритма сжатия видеопоследовательностей, обладающую наибольшей вычислительной сложностью во всей структуре сжатия, – операцию оценки движения (ОД) блоков кадров видеопоследовательности [2]. Ее суть заключается в следующем: кадры разбиваются на блоки, далее выполняется ОД, при которой в текущем кадре, для каждого блока осуществляется поиск в предыдущем кадре наиболее «похожего» блока, смещенного на вектор, называемый вектором движения.

Таким образом, для каждого блока C_n в текущем кадре с номером n выполняется поиск блока C_k в ограниченной области предыдущего кадра с номером $k < n$, соответствующий минимальному значению некоторо-

го критерия. В качестве такого критерия чаще всего применяется сумма абсолютных различий значений пикселей блоков ($SAD \rightarrow \min$):

$$SAD(v) = \sum_{(x,y) \in C_n} |C_n(x,y) - C_k(x+v_x, y+v_y)|, \quad (1)$$

где $v = (v_x, v_y)$ – вектор движения; $|v_x| \leq \Omega$ и $|v_y| \leq \Omega$, Ω – ширина области поиска; $C_n(x, y)$ – значения яркостных и цветоразностных компонент пиксела с координатами (x, y) в блоке C_n ; $C_k(x+v_x, y+v_y)$ – значения яркостных и цветоразностных компонент пиксела с координатами $(x+v_x, y+v_y)$ в блоке C_k , смещенном на вектор движения v .

Найденные вектора движения кадра используются при его кодировании, что позволяет сократить временную или интеркадровую избыточность видеопоследовательности.

Выполним оценку вычислительной сложности алгоритма полного перебора векторов движения видеопоследовательности. Данный алгоритм позволяет получить наилучшее качество результата сжатия при наибольшей вычислительной сложности. Его вычислительную сложность будем использовать для оценки наихудшего случая времени сжатия видеопоследовательности. Пусть видеопоследовательность состоит из N кадров разрешением $W \times H$ пикселей каждый. Алгоритм оценки движения делит кадр на блоки размером $a_{size} \times b_{size}$ пикселей. Поиск векторов движения выполняется в области шириной Ω пикселей. Тогда оценка вычислительной сложности ОД видеопоследовательности в общем случае для всех цветовых моделей может быть представлена в виде следующего выражения:

$$O \left[(N-1) \cdot \frac{W \cdot H}{a_{size} \cdot b_{size}} \cdot (2 \cdot \Omega + 1)^2 \right]. \quad (2)$$

Из этой формулы несложно заметить, что увеличение разрешения кадра видеопоследовательности в формате Ultra HD приведет к линейному повышению времени выполнения ОД для сжатия. Алгоритмы так называемой «быстрой» оценки движения выполняют ОД в ограниченной некоторым шаблоном (например, крест, шестиугольник и т. д.) области поиска [2]. Это позволяет существенно уменьшить величину Ω и, тем самым, ценой снижения качества результата сократить время сжатия видеопоследовательности.

Целью данной работы является распараллеливание процесса компрессии Ultra HD-видеоинформации в распределенной системе (секции 1 и 2), получение объективных показателей результата компрессии при различных параметрах кодера (секция 3), а так же оценка современного стандарта сжатия видеопоследовательностей H.264 для такой видеоинформации.

1 РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕ ПРОЦЕССА КОМПРЕССИИ ULTRA HD-ВИДЕОИНФОРМАЦИИ

Для распараллеливания компрессии видеоинформации в распределенной системе существуют несколько подходов, которые принципиально различаются зернистостью параллелизма. К наиболее часто применяемым подходам можно отнести следующие [3–5]:

1. Деление кадра на блоки и независимое сжатие блоков на узлах системы. Такой подход позволяет устранять только пространственную или интракадровую избыточность, поскольку для устранения временной избыточности необходимы минимум два смежных кадра. Видеоинформация в формате Ultra HD обладает более высоким разрешением кадра по сравнению с HD, вследствие чего, число образуемых блоков будет велико (например, 8100 блоков размером 64x64 пиксела) и зернистость параллелизма будет слишком мелкая. Другим недостатком такого подхода является увеличение накладных затрат: транспортировка по сети и объединение большого числа блоков от различных узлов в кадры.

2. Независимое сжатие отдельных кадров на узлах системы. Этот подход так же позволяет устранять только пространственную избыточность, однако зернистость параллелизма крупнее, чем в предыдущем подходе и накладные затраты меньше. Параллельный алгоритм MJPEG использует этот подход для сжатия видеоинформации.

3. Независимое сжатие отдельных групп смежных кадров. Подход позволяет параллельно устранять как временную, так и пространственную избыточность видеоинформации. Однако, результирующий средний битрейт и коэффициент сжатия зависят от конкретных мест деления видеопоследовательности на группы кадров. Зернистость параллелизма самая крупная из рассмотренных подходов, накладные затраты самые маленькие.

В результате анализа наиболее часто применяемых подходов к распараллеливанию компрессии видеоинформации заметно, что самым перспективным подходом к распараллеливанию сжатия видеоинформации в формате Ultra HD является независимое сжатие групп смеж-

ных кадров. Для эффективной компрессии такой видеоинформации необходимо устранение и пространственной и временной избыточности.

Применение графического процессора (GPU) для распараллеливания процесса компрессии видеоинформации позволяет получить существенное ускорение по сравнению с центральным процессором (CPU), однако это приводит к снижению качества результата сжатия до 10 % [6].

Рассмотрим предложенный в [7] метод распределения видеоинформации по узлам распределенной системы. Он основан на корреляционном анализе, с динамической чувствительностью анализатора, смежных кадров видеопоследовательности, рассматриваемых в качестве временных рядов. Суть метода заключается в том, что для каждой пары смежных кадров вычисляется коэффициент корреляции $r_{YUV}^{k,k+1}$ (k – номер кадра), учитывающий яркостную и цветоразностные компоненты пикселей, а так же вычисляется значение функции чувствительности к смене сцен анализатора видеопоследовательности $\varphi(k)$. Скорость роста функции чувствительности управляется параметром. Далее сравнивается модуль коэффициента корреляции для данной пары смежных кадров и значение функции чувствительности. Если $|r_{YUV}^{k,k+1}| > \varphi(k)$, тогда анализ видеопоследовательности продолжается: вычисляются $r_{YUV}^{k,k+1}$ и $\varphi(k)$ для следующей пары кадров и снова выполняется сравнение. Иначе, видеопоследовательность разделяется на две части: первая часть содержит кадры анализируемой видеопоследовательности до места, в котором $|r_{YUV}^{k,k+1}| \leq \varphi(k)$, и она отправляется на узлы системы для выполнения сжатия, вторая часть содержит кадры после данного места и ее анализ продолжается.

Преимуществом данного метода является нивелирование роста битрейта при сжатии видеопоследовательности в распределенной системе при сохранении того же уровня искажения, что и при последовательной компрессии. То есть коэффициент сжатия видеопоследовательности не ухудшается вследствие распараллеливания. Такие видеопоследовательности после разделения ограничены одной сценой и их смежные кадры характеризуются значительной корреляционной зависимостью, благодаря чему ОД может быть выполнена на относительно небольшой области поиска Ω . Недостатком метода является рост накладных расходов. Так, при сжатии видеоинформации в формате HD 1920x1080 по стандарту MPEG4/H.264 накладные расходы применения метода составляют 7,83 % от общего времени вычислительного процесса [7].

Для распределения Ultra HD-видеоинформации по узлам компьютерной системы будем использовать рассмотренный метод.

2 ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Целью экспериментов является установление объективных показателей результата компрессии видеоинфор-

мації, а так же показателі ефективності застосування розподіленої системи:

- час стиснення, витрачений на процес компресії відеопослідовності;
- рівень искаження стисненої відеопослідовності відносно вихідної, який характеризує якість стиснення. В даній роботі він вимірюється в дБ за допомогою метрики PSNR [8];
- коефіцієнт стиснення відеопослідовності – відношення розміру файлу, що містить стиснену відеопослідовність, до розміру файлу з нестисненою відеопослідовністю;
- прискорення обчислювального процесу – відношення часу стиснення всіх тестових відеопослідовностей на одному вузлі системи до часу стиснення на всіх задіяних вузлах системи;
- ефективність розподіленої системи – відношення прискорення обчислювального процесу до кількості задіяних вузлів.

Для організації експериментів використано шість загальноприйнятих для тестування методів стиснення відеопослідовностей: три з них у форматі CIF (352x288 пікселів) [9], а три у форматі Ultra HD (3840x2160) [10] – «Foreman», «News», «Coastguard». Всі відеопослідовності містять по 300 кадрів.

В розподіленій комп'ютерній системі на вузле-планувальнику встановлюється аналізатор відеопослідовностей, приймаючий вхідну відеоінформацію і виконуючий її розподілення по вузлах комп'ютерної системи методом [7], при цьому чутливість аналізатора задається дуже високою. По мірі появи частин відеопослідовностей стаються в чергу FIFO, направлену на обчислювальні вузли. Як тільки звільняється вузол системи, він вилучає відеопослідовність з черги, стискає її алгоритмами стандарту H.264 за допомогою вільно розповсюджуваного відкритого відеокодека FFmpeg [11] і повертає результат планувальнику, де виконується збір і конкатенація стиснутих відеопослідовностей. Якщо всі ресурси зайняті, ча-

сти відеопослідовностей очікують в черзі, поки не звільниться хоча б один вузол. При цьому бар'єрна синхронізація не виконується, тобто процеси стиснення відеопослідовностей вузлами відбуваються асинхронно і незалежно один від одного. Це дозволяє зменшити накладні витрати на очікування звільнення всіх замовлених в розподіленій системі ресурсів і синхронізацію вузлів системи.

В експериментах задіяно 4 логічних вузлів, наданих для досліджень кластера Інститута проблем моделювання в енергетиці (ІПМЭ) ім. Г.Е. Пухова г. Київ. Вузли побудовані на двох центральних процесорах Intel Xeon 5405 кожен з 8 Гб DDR-2. Комунікаційна середовище InfiniBand 20 Гб/с. Логічні вузли формуються з складу фізических вузлів. На вузлах встановлено планировщик Torque на ОС Scientific Linux 6.3.

Оцінка руху блоків для експериментів виконується двома алгоритмами: повний перебір, виконуючий пошук по всій області Ω , і один з алгоритмів «швидкий» оцінки руху, а саме, алгоритм «шестикутника», значно скорочуючий область пошуку. В результаті експериментів реєструється час стиснення кожної відеопослідовності, загальний час обчислювального процесу, рівень искаження, коефіцієнт стиснення. Далі обчислюється прискорення обчислювального процесу і ефективність розподіленої системи.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ІСЛІДОВАНИЙ

Для відеопослідовностей у форматі CIF встановлено бітрейт 1 Мбіт/с, а для Ultra HD – 20 Мбіт/с. Для алгоритму повного перебору область пошуку встановлена 32 пікселі (на графіках позначається «ПП 32»), далі – 16 пікселів (на графіках – «ПП 16»). Для алгоритму «шестикутника» область пошуку – 32 пікселі (на графіках позначається «АШ 32»), далі – 16 пікселів («АШ 16»). Всі інші параметри кодера встановлені за замовчуванням для стандарту H.264. Залежність часу стиснення відеопослідовностей від алгоритму з вибраною шириною області пошуку показана на рис. 1.

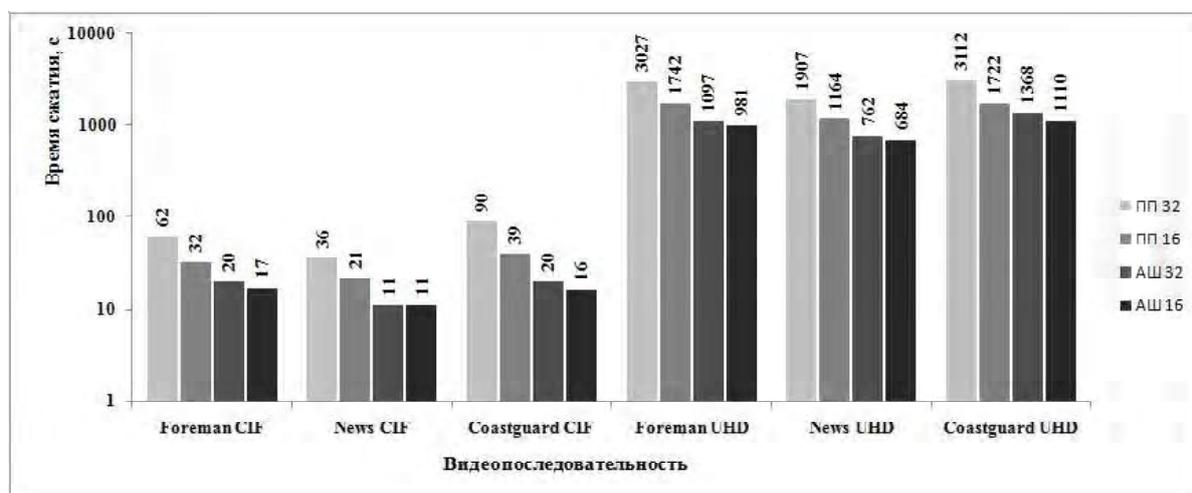


Рис. 1. Залежність часу стиснення відеопослідовностей від алгоритму ОД з вибраною шириною області пошуку

В таблиці 1 показані характеристики ефективності розподіленої системи, використаної для сжатия видеопоследовательностей: T – общее время вычислительного процесса; T_n – накладные затраты на пересылки; T_a – накладные затраты на анализ и распределение частей видеопоследовательности; S – ускорение вычислительного процесса; E – эффективность распределенной системы.

Зависимость уровня искажения сжатых видеопоследовательностей относительно исходных, от алгоритма с выбранной шириной области поиска показана на рис. 2. На рис. 3 видно как влияет алгоритм ОД видеопоследовательности на коэффициент сжатия.

Таблица 1. Характеристики эффективности использованной распределенной системы

Алгоритм ОД	T , с	T_n , %	T_a , %	S	E
ПП 32	4003	15,71	7,11	2,21	0,53
ПП 16	2651	23,73	10,57	2,02	0,51
АШ 32	2277	27,62	12,3	1,72	0,43
АШ 16	2019	31,15	13,87	1,71	0,43

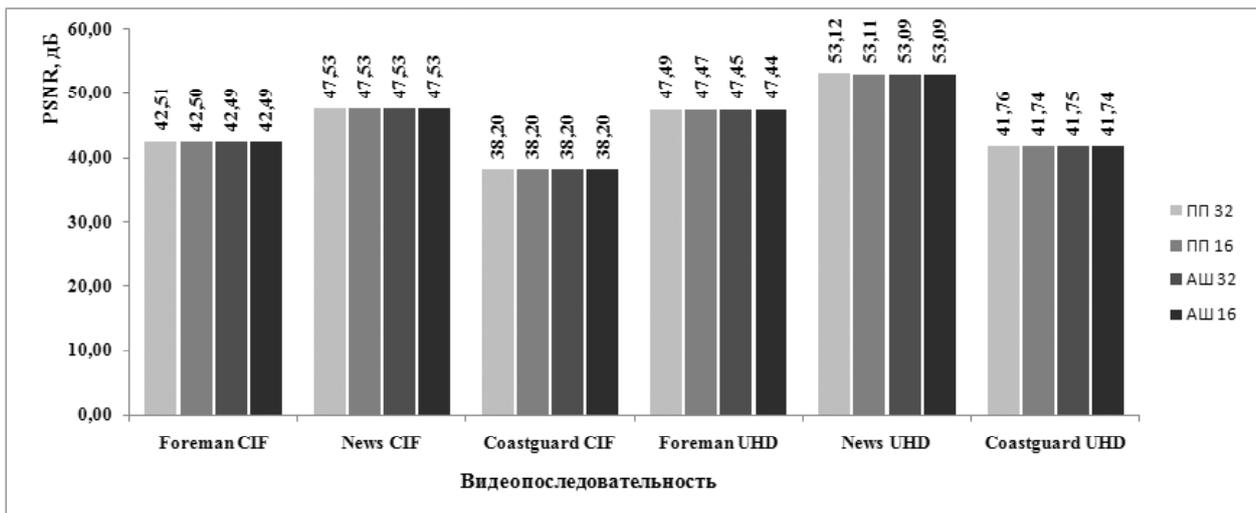


Рис. 2. Зависимость уровня искажения сжатых видеопоследовательностей от алгоритма ОД с выбранной шириной области поиска

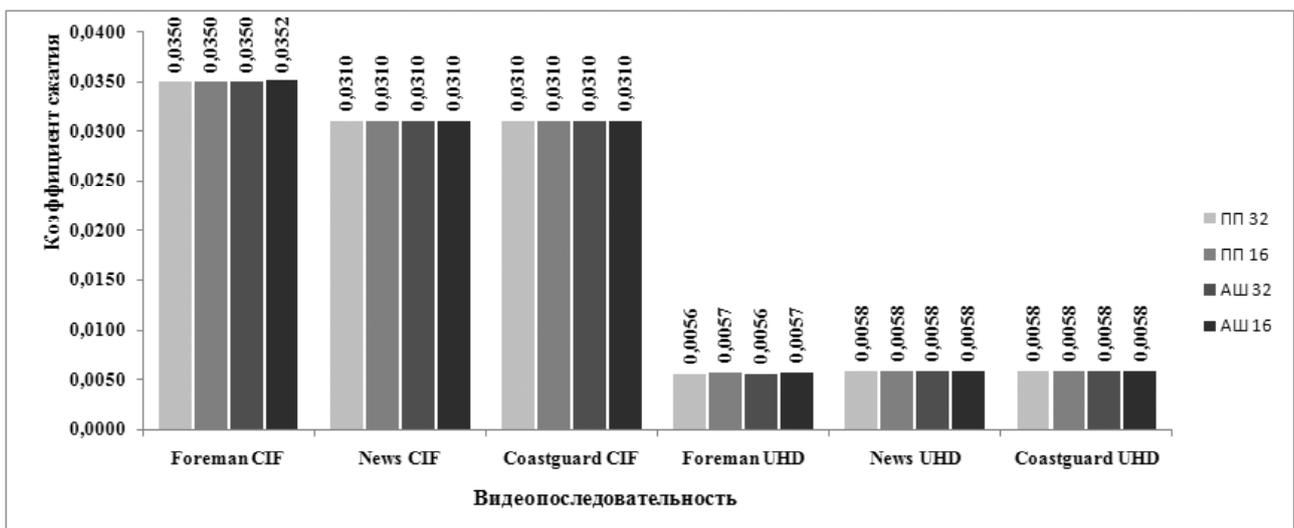


Рис. 3. Зависимость коэффициента сжатия видеопоследовательностей от алгоритма ОД с выбранной шириной области поиска

ВЫВОДЫ

В результате экспериментального исследования процесса сжатия Ultra HD-видеопоследовательностей в распределенной системе можно сформулировать следующие выводы:

- время сжатия видеопоследовательностей алгоритмом полного перебора векторов движения линейно зависит от разрешения кадра и ширины области поиска;

- в алгоритмах «быстрой» оценки движения, в частности, в алгоритме «шестиугольника» сокращение области поиска лишь незначительно уменьшает время сжатия;

- время сжатия видеопоследовательностей без интенсивного движения (например, «News») значительно короче времени сжатия видеопоследовательностей, содержащих интенсивное движение объектов («Foreman», «Coastguard»). Это связано с применением оптимизирующих алгоритмов в стандарте H.264, позволяющих пропускать поиск векторов движения для смежных кадров, не содержащих движение блоков;

- уровень искажения соответствующих видеопоследовательностей, предварительно разделенных на части методом [7] и распределенных по узлам компьютерной системы, изменяется незначительно в зависимости от ширины области поиска в алгоритме ОД. Это обусловлено тем, что после разделения на части смежные кадры таких видеопоследовательностей характеризуются значительной корреляционной зависимостью, следовательно, вектора движения не выходят за ближайшие блоки и оценка движения может быть выполнена на небольшой области поиска;

- алгоритм «быстрой» оценки движения демонстрирует незначительное снижение качества результата (по метрике PSNR) при существенном сокращении времени сжатия по сравнению с алгоритмом полного перебора;

- коэффициент сжатия соответствующих видеопоследовательностей практически не зависит от ширины области поиска векторов движения и от применяемого алгоритма ОД;

- время, затраченное на транспортировку видеопоследовательностей в формате Ultra HD в распределенной системе, составило до 31,15 % от всего вычислительного процесса и существенно снизило ускорение процесса сжатия и эффективность системы. Это является значительным фактором, влияющим на производительность вычислительного процесса;

- накладные затраты на анализ видеопоследовательностей методом [7] прямо пропорциональны разрешению кадра видеопоследовательности и количеству таких кадров. Для видеопоследовательностей в формате Ultra HD накладные затраты на анализ приемлемы и составляют до 13,87 % времени всего вычислительного процесса;

- при сжатии видеопоследовательностей в формате Ultra HD алгоритмы стандарта H.264 продемонстрировали приемлемые показатели коэффициента сжатия и уровня искажения, однако, время сжатия таких видеопоследовательностей слишком велико. В новом стандарте H.265, принятом сектором стандартизации электро-

связи Международного союза электросвязи ИТУ-Т в апреле 2013 года предусматривается повышение эффективности сжатия видеoinформации (снижение коэффициента сжатия при том же уровне искажения, который демонстрируют алгоритмы стандарта H.264) в том числе за счет усложнения алгоритмов оценки движения видеопоследовательностей [12].

Представляется перспективным исследование, направленное на снижение вычислительной сложности алгоритмов оценки движения видеопоследовательностей, применительно к видеoinформации в формате Ultra HD.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ultra HD TVs stole the show at CES 2013, but they're just part of the puzzle / Engadget news. – Режим доступа: \www/ URL: <http://www.engadget.com/2013/01/11/ultra-hd-tvs-stole-the-show-at-ces-2013>. – Загл. с экрана.
2. Скрупский, С. Ю. Методы компрессии видеoinформации / С. Ю. Скрупский // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація». – 2011. – № 21 (183). – С. 122–130.
3. Generic Framework for Parallel and Distributed Processing of Video-Data : in 4th International Symposium on Parallel and Distributed Processing and Applications (ISPA), vol. LNCS 4331 / D. Farin, P. With. – Sorrento, Italy, 2006. – P. 823–832.
4. A Parallel implementation of H.26L video encoder : in proc. of EuroPar 2002 conf. (LNCS 2400) / J. C. Fern6ndez, M. P. Malumbres – Padderborn, 2002. – P. 830–833.
5. Performance Evaluation of Parallel MPEG-4 Video Coding Algorithms on Clusters of Workstations : PARELEC '04 Proceedings of the international conference on Parallel Computing in Electrical Engineering / A. Rodriguez, A. Gonzalez, M. P. Malumbres. – Washington DC, 2004. – P. 354–357.
6. Скрупский, С. Ю. Повышение производительности распределенных систем компрессии видеoinформации / С. Ю. Скрупский // Науковий вісник Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Серія: Комп'ютерні системи та компоненти. – 2011. – №4, Т. 2. – С. 69–79.
7. Скрупский, С. Ю. Повышение эффективности сжатия видеoinформации в распределенных компьютерных системах / С. Ю. Скрупский // Электронное моделирование. – 2011, №6 (33). – С. 57–72.
8. Ватолин, Д. Методы для объективной оценки качества видеокодексов по сжатым ими видеопоследовательностям : материалы девятого научно-практического семинара «Новые информационные технологии в автоматизированных системах», март 2006 г. Москва / Д. Ватолин, А. Паршин. – М., 2006. – С. 4–12.
9. 4K Test Sequences. Reviving the classics. – Режим доступа: \www/ URL: <http://www.elementaltechnologies.com/resources/4k-test-sequences>. – Загл. с экрана.
10. YUV Video Sequences. – Режим доступа: \www/ URL: <http://trace.eas.asu.edu/yuv/>. – Загл. с экрана.
11. FFmpeg is a complete, cross-platform solution to record, convert and stream audio and video. – Режим доступа: \www/ URL: <http://www.ffmpeg.org/>. – Загл. с экрана.
12. ITU-T H.265 High efficiency video coding. – Режим доступа: \www/ URL: <http://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=11885>. – Загл. с экрана.

Стаття надійшла до редакції 17.09.2013.

Скрупський С. Ю.

Канд. техн. наук, старший викладач, Запорізький національний технічний університет, Україна

КОМПРЕСІЯ ULTRA HD-ВІДЕОІНФОРМАЦІЇ У РОЗПОДІЛЕНІЙ КОМП'ЮТЕРНІЙ СИСТЕМІ

Розглянуто переваги та недоліки сучасного формату відтворення відеоінформації Ultra HD. Виконано оцінку обчислювальної складності операції пошуку векторів руху у відеопослідовності. Проаналізовано метод розподілу відеоінформації по вузлах комп'ютерної системи, який використано для розпаралелювання процесу компресії відеоінформації на кластері. Експериментально досліджено об'єктивні показники результату компресії Ultra HD-відеоінформації у розподіленій системі в залежності від використовуваного алгоритму оцінки руху та ширини області пошуку векторів руху.

Ключові слова: Ultra HD-відеоінформація, розподілена комп'ютерна система, компресія, бітрейт, коефіцієнт ущільнення, рівень викривлення, кореляція.

Skrupsky S. Y.

Ph.D., senior lecturer, Zaporizhian National Technical University, Ukraine

ULTRA HD-VIDEOINFORMATION COMPRESSION IN DISTRIBUTED COMPUTER SYSTEM

The article deals with the parallelization of Ultra HD-videoinformation compression process in distributed system. The advantages and disadvantages of modern Ultra HD video format have been discussed. The evaluation of the computational complexity of the motion estimation operation in video sequences has been performed. The method for video distribution over the nodes of a distributed system, based on correlation analysis of video frames with the dynamic sensitivity function, has been analyzed. It has been used for parallelization of videoinformation compression process at Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering cluster. The objective indicators of Ultra HD-videoinformation compression results in a distributed system depending on used motion estimation algorithm and the width of the motion vectors search region have been investigated experimentally. The overheads of videoinformation compression process in distributed system have been analyzed.

Keywords: Ultra HD-videoinformation, distributed computer system, compression, bit rate, compression ratio, distortion level, correlation.

REFERENCES

1. Ultra HD TVs stole the show at CES 2013, but they're just part of the puzzle / Engadget news. – Access mode: \www/ URL: <http://www.engadget.com/2013/01/11/ultra-hd-tvs-stole-the-show-at-ces-2013>. – Title from screen.
2. Skrupskij S. Yu. Metody kompressii videoinformacii. *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya: «Obchysliuvalna tekhnika ta avtomatyzatsiia»*, 2011, No. 21 (183), pp. 122–130.
3. Farin D., With P. Generic Framework for Parallel and Distributed Processing of Video-Data : in 4th International Symposium on Parallel and Distributed Processing and Applications (ISPA), vol. LNCS 4331, Sorrento, Italy, 2006, pp. 823–832.
4. Fernández J. C., Malumbres M. P. A Parallel implementation of H.26L video encoder : in proc. of EuroPar 2002 conf. (LNCS 2400), Paderborn, 2002. pp. 830–833.
5. Rodriguez A., Gonzalez A., Malumbres M. P. Performance Evaluation of Parallel MPEG-4 Video Coding Algorithms on Clusters of Workstations : PARELEC '04 Proceedings of the international conference on Parallel Computing in Electrical Engineering, Washington DC, 2004, pp. 354–357.
6. Skrupskij S. Yu. Povyshenie proizvoditel'nosti raspredelennyx sistem kompressii videoinformacii. *Naukovyi visnyk Chernivetskoho natsionalnoho universytetu imeni Yurii Fedkovycha. Seriya: Kompiuterni systemy ta komponenty*, 2011, No. 4, Vol. 2, pp. 69–79.
7. Skrupskij S. Yu. Povyshenie e'ffektivnosti szhatiya videoinformacii v raspredelennyx komp'yuternyx sistemax. *E'lektronnoe modelirovanie*, 2011, No. 6 (33), pp. 57–72.
8. Vatolin D., Parshin A. Metody dlya ob'ektivnoj ocenki kachestva videokodekov po szhatym imi videoposledovatel'nostyam : materialy devyatogo nauchno-prakticheskogo seminaru «Novye informacionnye texnologii v avtomatizirovannyx sistemax», mart 2006, Moskva, 2006, pp. 4–12.
9. 4K Test Sequences. Reviving the classics. – Access mode: \www/ URL: <http://www.elementaltechnologies.com/resources/4k-test-sequences>. – Title from screen.
10. YUV Video Sequences. – Access mode: \www/ URL: <http://trace.eas.asu.edu/yuv/>. – Title from screen.
11. FFmpeg is a complete, cross-platform solution to record, convert and stream audio and video. – Access mode: \www/ URL: <http://www.ffmpeg.org/>. – Title from screen.
12. ITU-T H.265 High efficiency video coding. – Access mode: \www/ URL: <http://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=11885>. – Title from screen.

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 621.313

Орловский И. А.

Д-р техн. наук, профессор, Запорожский национальный технический университет, Украина, E-mail: i_orlovsky@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫМ СТЕНДОМ МАНИПУЛЯТОРА МП-9С С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПАКЕТА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Разработан лабораторный стенд компьютерного управления манипулятором МП-9С из пакета Simulink системы Matlab. Описано подключение стенда к компьютеру с использованием платы PCI 1711 и блока PCLD-6710. Приведен пример системы управления в пакете Simulink. Рассмотрен порядок выполнения лабораторных работ на стенде. Осуществление компьютерного управления позволило проверить теоретические знания студентов по синтезу дискретных автоматов при управлении в реальном времени манипулятором и получить практические навыки работы с оборудованием.

Ключевые слова: лабораторный стенд, манипулятор МП-9С, система Matlab, компьютерное управление, дискретный автомат.

ВВЕДЕНИЕ

Обучение студентов системам автоматизации технологических процессов должно постоянно совершенствоваться и отвечать требованиям современных технологий. Важной составляющей обучения является получение студентами навыков монтажа, наладки, обслуживания и использования современной элементной базы систем автоматизации при разработке и модернизации оборудования. Получение этих навыков возложено на лабораторный практикум по профессиональным дисциплинам. В условиях отсутствия финансирования на обновление лабораторной базы, обучение практическим навыкам возможно при модернизации с участием студентов систем управления существующих лабораторных стендов с сохранением сложной дорогостоящей электромеханической части.

Разработка собственными силами лабораторных стендов по направлению подготовки «Электромеханика» происходит во всех вузах Украины. Так в Кременчугском национальном университете предложена концепция построения малогабаритных лабораторных комплексов [1]. В Запорожском национальном техническом университете на кафедре электропривода и автоматиза-

ции промышленных установок разработано несколько стендов [2]. Модернизирован с использованием оборудования фирмы VIPA лабораторный стенд с манипулятором M10P. Созданы современные лабораторные стенды компьютерного управления шаговым двигателем от SCADA системы TRACE MODE. Модернизирована система управления лабораторного стенда подвесного конвейера с использованием модуля LOGO [3]. В Донбасском государственном техническом университете (г. Алчевск) [4] разработана экспериментальная установка, предназначенная как для обучения студентов при проведении практических и лабораторных работ, так и для научных исследований алгоритмов идентификации, управления и наблюдения различных электромеханических систем с неопределенными параметрами. В Одесской национальной морской академии для практической подготовки судовых электромехаников разработан полномасштабный тренажерный комплекс судовой автоматизированной электроэнергетической и электромеханической системы [5]. В Национальном техническом университете «ХПИ» на кафедре автоматизированных электромеханических систем создан лабораторный стенд для исследования рекуперативных режимов тягового электропривода электромобиля [6].

Актуальним является продолжение разработок современных лабораторных стендов промышленных механизмов, в том числе манипуляторов, что связано с повышением требований к системам автоматизации производственных процессов с использованием промышленных контроллеров и компьютеров. Одним из примеров возможной модернизации является стенд, изготовленный, еще в 80-е годы прошлого столетия для изучения устройства и особенностей управления технологическим циклом промышленного робота МП-9С (в дальнейшем в статье он назван – манипулятором), оснащенного пневмоприводами. В стенде отработка перемещений манипулятора осуществляется системой управления на жесткой логике, в которой программа управления задается вручную переключателями на наборном поле. Однако на таком стенде студент больше осваивает навыки работы оператора, чем разработчика системы управления. При этом на лекционных курсах изучается теория синтеза дискретных систем управления в виде дискретных автоматов, моделирование и наладка которых выполняется на компьютере в математическом пакете моделирования (МПМ) [7]. В связи с отсутствием современных лабораторных стендов предназначенных для изучения систем компьютерного управления манипулятором с помощью МПМ, разработка такого стенда является актуальной задачей. К тому же, освоение технологии управления объектами из МПМ может быть использовано и при изучении других курсов.

Цель статьи. Разработка лабораторного стенда компьютерного управления манипулятором МП-9С с помощью МПМ.

1 ТЕХНИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТЕНДА

Лабораторный стенд состоит (рис. 1) из механической части манипулятора МП-9С с пневмоприводами – 1, электронного циклового программного устройства с пультом управления (ЭЦПУ) – 2, платы PCI 1711 и блока PCLD-6710 – 3 и компьютера – 4.

Манипулятор МП-9С предназначен для обслуживания штамповочных прессов, а также для автоматизации других технологических процессов, где необходимо осуществить захват, перенос и установку детали на технологическое оборудование. Технические данные: грузоподъемность – 0,2 кг, выдвижение руки – 150 мм, подъем руки – 30 мм, поворот руки – 120°, время максимальных перемещений: выдвижение и подъем – не более 0,5 с, поворот – не больше 0,6 с. Максимальная абсолютная погрешность позиционирования – +0,1 мм. Тип привода пневматический, рабочее давление воздуха – 0,4–0,5 МПа (4–5 кг/см²), тип системы управления – циклический. Число точек позиционирования по каждой степени подвижности – 2. Масса манипулятора, не более 32 кг. Электропитание – сеть переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц. Напряжение питания датчиков технологического оборудования и электроклапанов манипулятора – 24 В.

На каждое движение установлен электропневматический клапан. Для амортизации останова движений

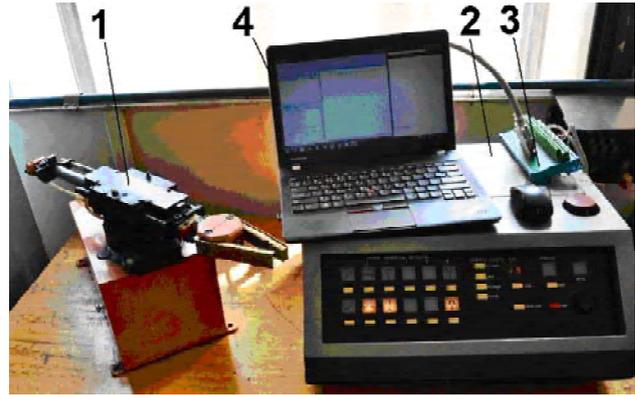


Рис. 1. Общий вид лабораторного стенда

установлены демпферы. Программа движений задается на наборном поле ЭЦПУ. Выдача команды на выполнение следующего движения производится после получения сигнала ответа о выполнении предыдущей команды от датчиков положения (контакты магнитоуправляемые КЭМ-2 ОДО). ЭЦПУ выполнено по принципу синхронного программного автомата с жестким циклом управления. Элементной базой является интегральные микросхемы серии K155. Обеспечивается световая индикация включения сети, работы по программе, состояния звеньев манипулятора и цифровая индикация номера кадра программы. Выполнение операций синхронизируется с внешними технологическими устройствами.

2 ПОДКЛЮЧЕНИЕ СТЕНДА К КОМПЬЮТЕРУ

Для осуществления управления манипулятором от компьютера в стенде выполнена следующая модернизация: разработан блок переключения сигналов управления (рис. 2) от ЭЦПУ или компьютера, на пульте управления установлен тумблер «ЭЦПУ/компьютер» (для переключения управления), установлен дополнительный разъем в блоке ЭЦПУ, который жгутом соединен с блоком PCLD-8710 (для передачи управляющих сигналов от компьютера в ЭЦПУ и выдачи в компьютер сигналов от датчиков).

Для сопряжения программ в МПМ и стенда используется плата PCI 1711 (рис. 3) и блок PCLD-6710 для подключения устройств к плате [8]. Характеристика платы: аналого-цифровой преобразователь с разрядностью – 12 бит, частотой передачи – до 100 кГц; 16 аналоговых входов; программируемое усиление (1, 2, 4, 8, 16) каждого входного канала; автоматическое сканирование каналов; буфер FIFO на 1К отсчетов; 2 канала ЦАП по 12 бит; 16 цифровых входов и 16 цифровых выходов (TTL).

При модернизации стенда учитывалась возможность управления манипулятором от компьютера как в ручном, так и автоматическом режимах. Для удобства отладки программ управления их проверка проводилась в МПМ на математических моделях как системы управления, так и манипулятора. На моделях отрабатываются те же движения манипулятора, что и на стенде. Модель системы управления (программа в МПМ) использовалась и для управления реальным манипулятором. Программа управления манипулятором (рис. 4) состоит из следующих

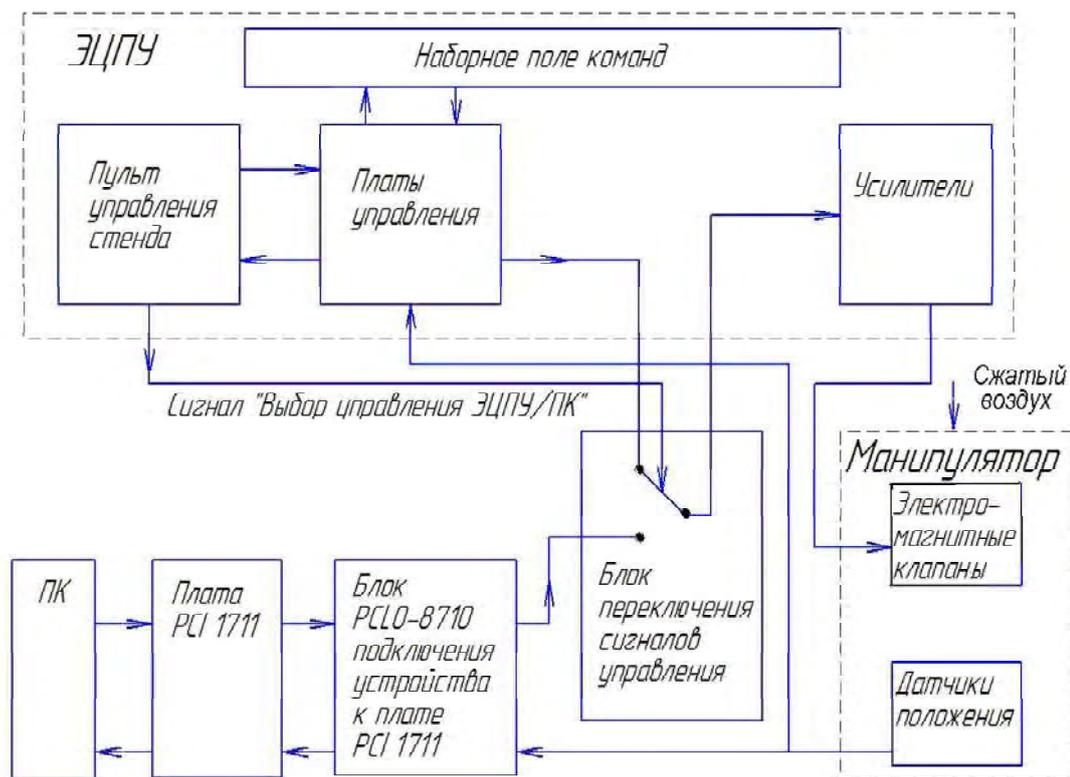


Рис. 2. Структурная схема лабораторного стенда



Рис. 3. Общий вид многофункциональной платы сбора данных PCI 1711 с блоком PCLD-6710

блоков: блока задания конечного положения захвата манипулятора в виде восьми переключателей SB1-SB8; шифратора сигналов задания положения – блок «Shifrador»; блока обработки сигналов от датчиков – «Datchiki»; системы управления манипулятором в виде последовательностного дискретного автомата (блок «Logika»); блоков передачи сигналов в порт U1-U8 и приема из портов компьютера D1-D8 с использованием платы сбора данных PCI 1711 с блоком PCLD-6710; математической модели ма-

нипулятора – блок «Model manipulator» (используется при проверке и отладке на компьютере системы управления). При настройке блоков вывода U1-U8 и ввода D1-D8 задаются плата, канал на плате и тип данных. Выходные сигналы 1-6 блока «Logika» являются переменными состояния автомата. Подключение системы управления к модели или к объекту (манипулятору) осуществляется переключателем «Model/object».

3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ НА СТЕНДЕ

Цель лабораторных работ – изучение возможностей подключения к компьютеру пульта управления, обмоток электропневмоклапанов, датчиков и организации обмена информацией между программой в МПМ и реальным манипулятором МП-9С, а также закрепление теоретических знаний студентов по теории синтеза дискретных автоматов при управлении в реальном времени технологическим объектом и получение практических навыков при работе с оборудованием.

При подготовке к лабораторным работам студенты изучают устройство стенда, программирование манипулятора с наборного поля и примеры программ управления из МПМ, приведенные в методических указаниях. Составляют математические модели приводов перемещений манипулятора, программу отработки цикла работы манипулятора с наборного поля. Входными сигналами системы управления являются сигналы от кнопок (или тумблеров) и сигналы от датчиков положения. Сту-

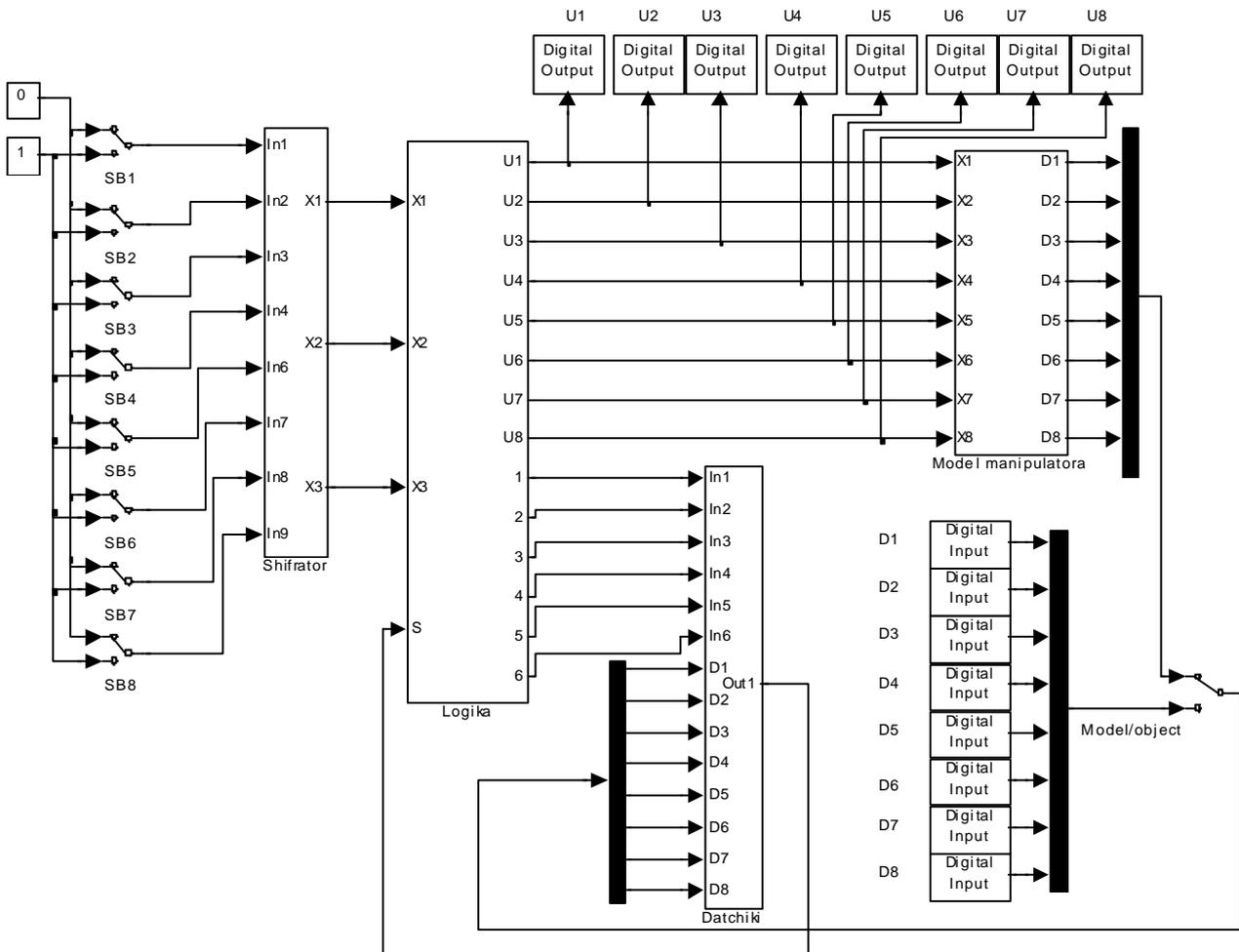


Рис. 4. Пример программы в МПМ управления манипулятором в автоматическом режиме

денты разрабатывают дискретный автомат, который при получении сигнала от кнопки формирует управление исполнительными механизмами перемещения манипулятора в положение, соответствующее нажатой кнопке. По условиям технологического процесса часть траекторий движения манипулятора запрещены (задаются различные расположения технологических препятствий в зоне перемещений манипулятора), что требует осуществления перемещений по различным траекториям.

При выполнении лабораторных работ составляются следующие программы управления манипулятором:

- ручное управление с помощью МПМ;
- автоматическое управление в МПМ математической моделью манипулятора от синтезированной схемы автомата;
- автоматическое управление манипулятором от синтезированной схемы автомата в МПМ, согласно варианту задания расположения препятствий.

При управлении наблюдаются сигналы в системе управления на выходах элементов в МПМ, а также сравнивается управление математической моделью с работой реального манипулятора.

ВЫВОДЫ

Компьютерная модернизация системы управления лабораторного стенда манипулятора позволяет по разработанной методике совершенствовать учебный процесс изучения студентами устройства манипулятора, подключения его к компьютеру, особенностей управления манипулятором и организации передачи информации из программы в МПМ на электропневмоклапаны и передачу в программу состояния датчиков положения. Осуществление компьютерного управления позволяет проверить теоретические знания по синтезу дискретных автоматов при управлении в реальном времени манипулятором и получить практические навыки работы с оборудованием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Калинов, А. П.* Комп'ютерний лабораторний комплекс для вивчення цифрових систем керування з функцією імітації технологічного навантаження / А. П. Калинов, О. В. Прітченко, Д. Г. Мамчур // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. – Кременчук : КДПУ, 2009. – Вип. 3/2009 (56). Частина 1. – С. 8–12.

2. Совершенствование лабораторного практикума обучения студентов по направлению подготовки электромеханика / В. И. Бондаренко, И. А. Орловский, А. В. Пирожок, Ю. А. Крисан, В. В. Осадчий, М. Ю. Залужный // *Электротехнические системы и комплексы*. – Магнитогорск. – Вып. 20/2012. – С. 412–438.
3. *Орловський, І. А.* Модернізація лабораторного стенда підвісного конвейера / І. А. Орловський // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – Кременчук. – КрНУ, 2013. – Вип. 2(22). – Част. 2. – С. 427–431.
4. Исследовательский стенд для апробации алгоритмов управления сложными электромеханическими системами / Е. В. Полилов, А. М. Батрак, Е. С. Руднев, С. П. Скорик, П. В. Горелов // *Электротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2011. – № 3. – С. 481–487.
5. *Муха, Н. И.* Практическая подготовка судовых электромехаников на полномасштабном тренажерном комплексе / Н. И. Муха // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Тематичний випуск. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» науково-виробничого журналу. – Кременчук. – КрНУ, 2012. – Вип. 3/2012 (19). – С. 589–593.
6. *Клепиков, В. Б.* О подготовке специалистов электромехаников для электрооборудования / В. Б. Клепиков // *Электротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2011. – № 3. – С. 472–473.
7. *Дьяконов, В. П.* MATLAB 5.3.1 с пакетами расширений. Под ред. проф. В. П. Дьяконова / В. П. Дьяконов, И. В. Абраменкова, В. В. Круглов. – М.: Нолидж, 2001. – 880 с.
8. Компания ПРОСОФТ. PCI-1711 – недорогая многофункциональная плата сбора данных [Электронный ресурс]: Режим доступа : <http://www.prosoft.ru/products/brands/advantech/349924/1354/261805.html>. Название с экрана. 26.11.2003.

Стаття надійшла до редакції 11.06.2013.

Орловський І. А.

Д-р техн. наук, професор, Запорізький національний технічний університет, Україна

КЕРУВАННЯ ЛАБОРАТОРНИМ СТЕНДОМ МАНІПУЛЯТОРА МП-9С ЗА ДОПОМОГОЮ МАТЕМАТИЧНОГО ПАКЕТУ МОДЕЛЮВАННЯ

Розроблено лабораторний стенд комп'ютерного керування маніпулятором МП-9С з пакету Simulink системи Matlab. Описано підключення стенду до комп'ютера з використанням плати PCI 1711 і блоку PCLD-6710. Наведено приклад системи керування в пакеті Simulink. Розглянуто порядок виконання лабораторних робіт на стенді. Здійснення комп'ютерного керування дозволило перевірити теоретичні знання студентів з синтезу дискретних автоматів при керуванні у реальному часі маніпулятором і отримати практичні навички роботи з обладнанням.

Ключові слова: лабораторний стенд, маніпулятор МП-9С, система Matlab, комп'ютерне керування, дискретний автомат.

Orlovskiy I. A.

Professor, Doctor of Technical Sciences, Zaporozhye National Technical University, Ukraine

CONTROL LABORATORY BENCH OF MANIPULATOR MP-9C WITH THE HELP OF MATHEMATICAL MODELING PACKAGE

An important component of student learning process automation systems is to provide skills installation, commissioning, maintenance and use of theoretical knowledge in the projects of modernization of equipment. To improve laboratory practice in the Zaporozhye National Technical University in the department of industrial electric and automation systems with the participation of students developed computer control (using the theory of discrete automata) of the package Simulink of Matlab laboratory bench manipulator MP-9C. Technical description is given of the laboratory bench, consisting of: the mechanical part of the robot arm, pneumatic, manipulator control system for logic elements, position sensors, remote control, connector board and the computer. Modernization of the stand allowed by the developed technique to improve student learning devices and features computer control arm, as well as the practical application of the theory of synthesis of discrete automata.

Keywords: laboratory bench, the arm MP-9C, the system Matlab, computer control, digital automat.

REFERENCES

1. Kalinov A. P., Pritchenko O. V., Mamchur D. G. Komp'yuternij laboratornij kompleks dlya vivchennya tsifrovikh sis-tem keruvannya z funktsiyeu imitatsii tekhnologichnogo navantazhennya. *Visnik KDPU im. M. Ostrograds'kogo*. Kremenchuk. KDPU, 2009. Vip. 3/2009 (56). CHastina 1, pp. 8–12.
2. Bondarenko V. I., Orlovskij I. A., Pirozhok A. V., Krisan YU. A., Osadchij V. V., Zaluzhnyj M. YU. Sovershenstvovanie laboratornogo praktikuma obucheniya studentov po napravleniyu podgotovki ehlektromekhanika, *EHlektrotekhnicheskie sistemy i komplekxy*. Mag-nitogorsk, Vyp. 20/2012, pp. 412–438.
3. Orlovskij I. A. Modernizatsiya laboratornogo stenda pidvisnogo konvejera. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi*. Kremenchuk, KrNU, 2013, Vip. 2(22), CHast. 2, pp. 427–431.
4. Polilov E. V., Batrak A. M., Rudnev E. S., Skorik S. P., Gorelov P. V. Issledovatel'skij stend dlya aprobatsii algoritmov upravleniya slozhnyimi ehlektromekhanicheskimi sistemami. *Elektrotekhnichni ta komp'yuterni sistemi*, 2011, No. 3, pp. 481–487.

-
5. Mukha N. I. Prakticheskaya podgotovka sudovykh ehlektromekhanikov na polnomasshtab-nom trenazhyornom komplekse. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi. Tematichnij vipusk. «Problemi avtomatizovanogo elektroprivoda. Teoriya i praktika» naukovo-virobnichogo zhurnalu*. Kremenichuk. KrNU, 2012. Vip. 3/2012 (19), pp. 589–593.
 6. Klepikov V. B. O podgotovke spetsialistov ehlektromekhanikov dlya ehlektromobile-stroeniya. *Elektrotekhnichni ta komp'yuterni sistemi*, 2011, No. 3, pp. 472–473.
 7. D'yakonov V. P., Abramenkova I. V., Kruglov V. V. MATLAB 5.3.1 s paketami rasshirenij. Pod red. prof. V.P. D'yakonova. Moscow, Nolidzh, 2001, 880 p.
 8. Kompaniya PROSOFT. PCI-1711. nedorogaya mnogofunktsional'naya plata sbora dannykh [EHlektronnyj resurs] : Rezhim dostupa : <http://www.prosoft.ru/products/brands/advantech/349924/1354/261805.html>. Nazvanie s ehkrana. 26.11.2003.

ОСОБЕННОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С КОСВЕННЫМ ИЗМЕРЕНИЕМ СКОРОСТИ

Приводятся результаты исследования систем регулирования электропривода постоянного тока и асинхронного электропривода с косвенным измерением скорости с учетом влияния обратных связей по току и напряжению на устойчивость системы. Определены условия устойчивости: системы регулирования при положительной обратной связи по току; контура регулирования с тиристорным преобразователем при цифровом сглаживании пульсаций; асинхронного двигателя как объекта регулирования. Обоснованы структурные схемы и параметры системы, обеспечивающие качественное регулирование.

Ключевые слова: электропривод, система регулирования, устойчивость.

ВВЕДЕНИЕ

Улучшение регулирования скорости электроприводов (ЭП) с вычислением скорости по току и напряжению наталкивается на проблему устойчивости работы контура компенсации статической ошибки регулирования скорости. Помимо этого в ЭП постоянного тока возникает проблема устойчивости работы контура регулирования напряжения; в асинхронном ЭП – проблема устойчивости работы асинхронного электропривода (АЭП) и обеспечения его устойчивости без потери статической точности регулирования.

АНАЛИЗ ПРЕДЫДУЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Компенсация статической ошибки регулирования скорости при увеличении нагрузки электродвигателя (ЭД) осуществляется введением положительной обратной связи (ОС) – по току в ЭП постоянного тока (ЭППТ) и по активной составляющей тока в АЭП [1]. Путем увеличения положительной ОС в ЭППТ можно свести статизм до нуля при некотором среднем значении температуры ЭД с допущением перекомпенсации статизма при температурном уменьшении сопротивления ЭД, таким образом можно повысить статическую точность регулирования. В [2] показано, что, если пренебрегать влиянием ОС по ЭДС ЭД, характеризуемым электромеханической постоянной времени, то при полной компенсации статизма система автоматического регулирования (САР) находится на границе устойчивости. Получено выражение для предельного с точки зрения устойчивости коэффициента перекомпенсации, учитывающее влияние ОС по ЭДС. Выражение получено без учета инерционности датчика напряжения. Так как инерционность датчика напряжения может лишь ухудшить устойчивость, в ЭППТ предложено ее сводить к минимуму, а для уменьшения пульсаций предлагается использовать цифровое сглаживание путем многократного чтения и усреднения сигнала на периоде дискретности преобразователя микропроцессорной системой управления (МПСУ). Указан-

ное выражение дает возможность выбрать параметры регулятора, при которых допустимая величина перекомпенсации больше возникающей из-за температурного изменения сопротивления ЭД.

Однако параметры регулятора должны выбираться с учетом возможной неустойчивости работы внутренних контуров регулирования.

В ЭППТ при уменьшении инерционности датчика напряжения наиболее критичным к автоколебаниям, связанным с дискретностью преобразователя, является контур регулирования напряжения. Условия устойчивости при цифровом сглаживании пульсаций сигнала ОС получены в [3]. Этими условиями существенно ограничивается коэффициент усиления контура регулирования напряжения, что, в свою очередь, ограничивает быстродействие регулирования скорости. Найдено средство повышения быстродействия, а попутно, повышения статической точности регулирования скорости и упрощения настройки регулятора [4].

Асинхронный ЭД с учетом ОС по ЭДС также представляет собой замкнутый контур регулирования, в котором могут возникать автоколебания. Наличие положительной ОС по активной составляющей тока в АЭП с косвенным измерением скорости может способствовать появлению автоколебаний, которые могли не проявляться при отрицательных ОС или при их отсутствии. Проводимые ранее исследования устойчивости асинхронного ЭД [5] методом анализа частотных характеристик при линеаризации системы уравнений позволили лишь качественно исследовать устойчивость. В [6] проведено исследование электромеханических автоколебаний, возникающих в асинхронном ЭД, методом математического моделирования полной системы дифференциальных уравнений ЭД, содержащих в себе произведения переменных. При этом граница области устойчивости ЭД определялась путем многократного автоматического перебора вариантов расчета по специальному алгоритму. Из возможных способов подавления электромеха-

нических автоколебаний выбран способ введения ОС по реактивной составляющей тока с воздействием на частоту f , так как при этом не ухудшается точность регулирования скорости.

При поддержании постоянным потокосцепления ротора выражение для допустимой величины перекомпенсации для ЭППТ справедливо и для АЭП, если процессы рассматриваются по отношению к активной составляющей тока статора [2].

Целью данной работы является обобщение результатов ранее проведенных исследований устойчивости и рассмотрение их практического использования.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ КОНТУРА РЕГУЛИРОВАНИЯ С ТИРИСТОРНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ПРИ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Для исследования устойчивости работы контура применен аппарат Z-преобразования. Отличительная особенность данного анализа от предыдущих исследований [6] – наличие цифрового фильтра сигнала ОС связи с передаточной функцией $G_{\phi}(p) = (1 - \exp(-pT)) / p$, где T – период дискретности преобразователя.

В результате анализа определена следующая зависимость предельного коэффициента усиления системы K_{pu} от постоянной времени датчика напряжения $T_{дн}$ (рис. 1):

$$K_{pu} < \left(1 - \frac{1}{2} \frac{T}{T_{int}}\right) \frac{1 + \exp(-T/T_{дн})}{1 - \exp(-T/T_{дн})} + \frac{T_{дн}}{T_{int}}, \quad (1)$$

где T_{int} – постоянная времени интегрирования контура.

Для сравнения на рис. 1 приведены известные области устойчивости [7] при управлении преобразователем по методам ШИМ-I и ШИМ-II. Из сравнения видно, что САР с ТП и цифровым сглаживанием пульсаций по устойчивости занимает промежуточное положение по отношению к указанным методам управления.

Для повышения точности регулирования скорости требуется увеличение коэффициента K_{pu} , что возможно, как следует из рис. 1, при одновременном увеличении постоянной времени датчика напряжения $T_{дн}$. Однако при этом ухудшается динамика и уменьшается допустимая вели-

чина перекомпенсации, вызываемая изменением температуры. Для устранения влияния запаздывания датчика напряжения предлагается использовать асимптотический дифференциатор, который позволяет проводить также интегрирование и усреднение [8].

УСТОЙЧИВОСТЬ САР ПРИ ПЕРЕКОМПЕНСАЦИИ СТАТИЗМА

Структурная схема наиболее распространенной однократно интегрирующей САР с косвенным измерением скорости (рис. 2) содержит контур регулирования тока I_d с ПИ регулятором тока РТ, тиристорным преобразователем ТП, цепью якоря ЭД с постоянной времени $T_{я}$, сопротивлением якоря $R_{я}$, датчиком тока с параметром $R_{дт}$; контур регулирования напряжения U_d с параметрами датчика $T_{дн}$, $K_{дн}$; регулятора напряжения с коэффициентом K_U ; контур токовой компенсации с коэффициентом $K_{РУ}$. При постоянном магнитном потоке скорость V и ЭДС E пропорциональны друг другу. Пунктирная связь пока не рассматривается и о ней будет сказано далее.

Как отмечено выше, большая инерционность датчика напряжения снижает возможность полной компенсации статизма с учетом перекомпенсацией при температурном изменении сопротивления ЭД. В то же время, малая инерционность датчика напряжения практически не влияет на процессы изменения скорости. Принимая $T_{дн} = 0$ и пренебрегая дискретностью ТП, процессы в системе при полной компенсации статизма можно описать дифференциальным уравнением третьей степени, которое позволяет получить условие устойчивости системы в аналитическом виде. Это условие получено по отношению к коэффициенту компенсации

$$k = (R_{я,расч} - R_{я}) / R_{я}. \quad (2)$$

Коэффициент компенсации определяет относительную разницу между расчетным сопротивлением цепи двигателя $R_{я,р}$, исходя из которого компенсируется падение напряжения, и фактическим сопротивлением цепи двигателя $R_{я}$, зависящего от изменения температуры,

$$k < \frac{1 + K_{РУ}(1 + K_{РУ}) \frac{T_{int}}{T_M} + \frac{T_{я}}{T_{int}} - \sqrt{\left(1 + K_{РУ}(1 + K_{РУ}) \frac{T_{int}}{T_M} + \frac{T_{я}}{T_{int}}\right)^2 - 4K_{РУ}(1 + K_{РУ}) \frac{T_{int}}{T_M}}}{2K_{РУ}}, \quad (3)$$

где $T_{int} = T/K_{IU}$ – постоянная времени интегрирования контура регулирования напряжения; $K_{IU} = K_{дн} K_U K_{IT} K_{ТП}$, $K_{РУ} = K_{дн} K_U K_{IT} K_{ТП}$ – коэффициенты усиления разомкнутого контура регулирования напряжения с учетом коэффициентов усиления интегральной $K_{И}$ и пропорциональной $K_{П}$ частей регулятора. Из этого общего условия устойчивости можно определить отдельные случаи:

$$k < \frac{T_{int}}{T_M \left(1 + \frac{T_{я}}{T_{int}}\right)}, \quad \text{при } K_{РУ} = 0; \quad (4)$$

$$k < 0, \quad \text{при } T_{int}/T_M \rightarrow 0. \quad (5)$$

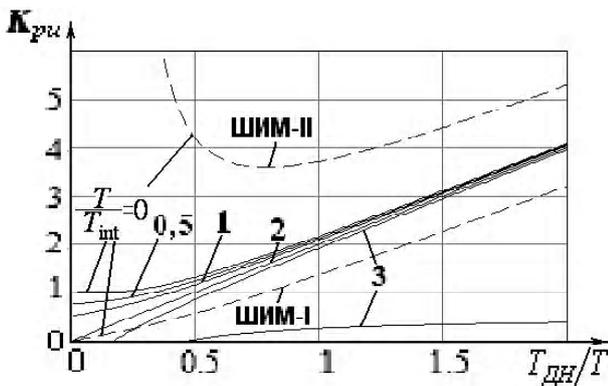


Рис. 1. Области устойчивости САР с ТП

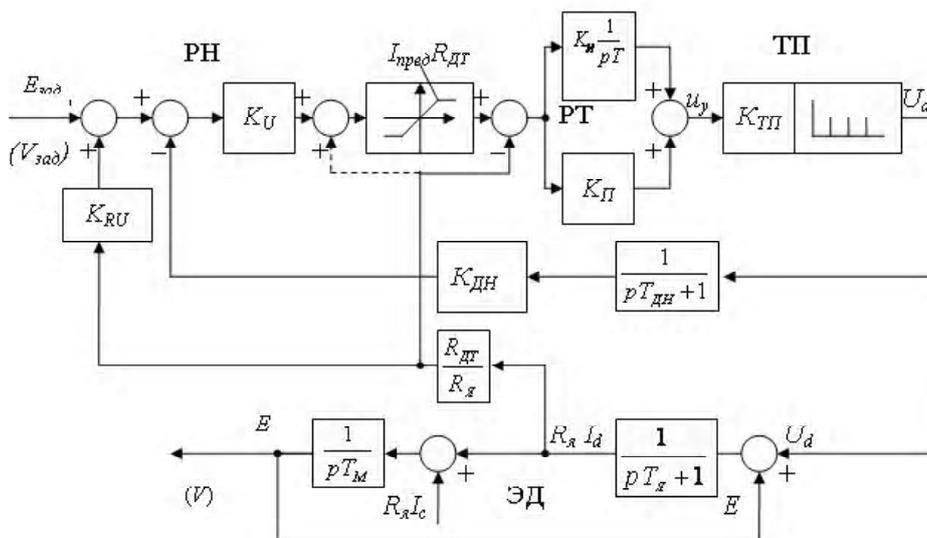


Рис. 2. Структурная схема САР ЭППТ с косвенным измерением скорости

Условие устойчивости (5) означает, что если не учитывать ОС по ЭДС двигателя, что иногда допускается, то система при перекомпенсации неустойчива и поэтому перекомпенсация не допускается. На самом деле, благодаря ОС по ЭДС двигателя, можно обеспечить компенсацию статизма и ее перекомпенсацию при изменении температуры. Выражение (3), которое учитывает ОС по ЭДС, позволяет выбирать соответствующие параметры регулятора, при которых допустимое значение коэффициента компенсации меньше реально возможного. Области устойчивости согласно выражению (3) приведены на рис. 3.

С учетом (1) целесообразно выбирать коэффициент пропорциональной части контура напряжения близким к максимально допустимому при $T_{дн} \leq 0,5 T$: $K_{пу} = 1$. При таком коэффициенте из условия возможностей перекомпенсации при температурном изменении сопротивления цепи двигателя на 20 % ($k = 0,2$) из выражения (3) и графиков (рис. 3) можно определить, что постоянная времени интегрирования контура должна равняться $T_{инт} = (0,2..0,3)T_M$ при постоянной времени цепи якоря $T_я = (0,1..0,4)T_M$. Выбирая постоянную времени $T_{инт}$ еще больше, можно увеличить запас устойчивости системы. Однако при этом система становится более инерционной. Поэтому правильной является настройка системы с недокомпенсацией для одной части температурного диапазона, что уменьшает перекомпенсацию во второй части температурного диапазона.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ В ЭППТ С КОСВЕННЫМ ИЗМЕРЕНИЕМ СКОРОСТИ

Условие устойчивости (1) для контура напряжения ограничивает быстродействие регулирования скорости. За счет положительной ОС по току при правильным

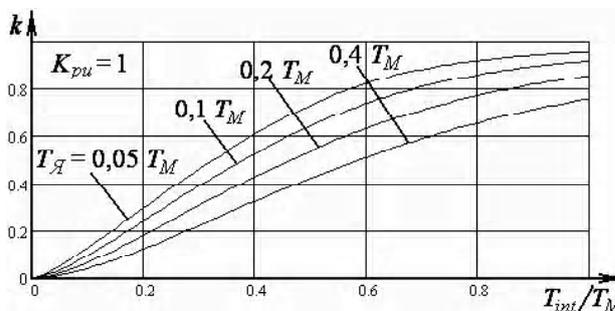


Рис. 3. Граничные значения коэффициента компенсации

выборе коэффициента токовой компенсации $K_{ру}$ это снижение быстродействия можно компенсировать. Если разделить положительную ОС на две составляющие, перенеся одну из составляющих на вход узла ограничения, как показано пунктирной линией на рис. 2 [4], то оставшаяся часть положительной ОС по току будет отвечать только за токовую компенсацию, а перенесенная часть устранил статизм регулирования напряжения. При малых отклонениях скорости от заданного значения положительная и отрицательная ОС по току компенсируют друг друга, и САР превращается в астатический регулятор скорости. При больших ошибках регулирования скорости сигнал задания тока выходит на ограничение. При чем за счет действия положительной ОС по току уровень ограничения достигается раньше, а выход из ограничения происходит позже. Ток в течение большего времени изменяется с максимальным темпом, за счет чего и обеспечивается повышение быстродействия. При входе в активную зону переходный процесс происходит при относительно малом значении входного сигнала. За счет этого уменьшается перерегулирование (рис. 4). Вышесказанное видно из осциллограммы переходного процесса, приведенной на рис. 4.

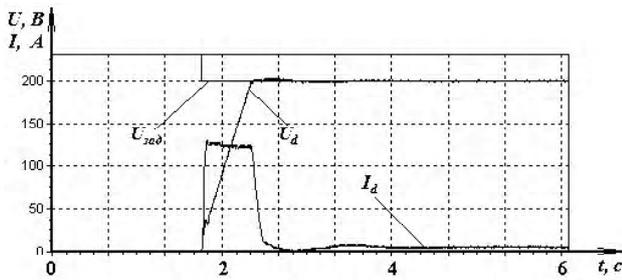


Рис. 4. Переходный процесс при скачке задания

УТОЧНЕНИЕ ОБЛАСТИ УСТОЙЧИВОСТИ АСИНХРОННОГО ЭД. ПОДАВЛЕНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ

Проведенные на математической модели расчеты [5] систематизированы в виде областей устойчивости в координатах: коэффициент рассеяния магнитного потока между статором и ротором σ и механическая постоянная времени τ_m по отношению к постоянной времени статора τ_1 отношение постоянных времени ротора и статора $\tau_2 / \tau_1 = 1, 2, 3$ (рис. 5). Расчеты проводились для зависимости напряжения от частоты с учетом компенсации падения напряжения на активном сопротивлении статора.

Учитывая, что постоянные времени обратно пропорциональны сопротивлениям, из представленных кривых видно, в какой степени увеличивается область неустойчивости при увеличении сопротивления цепи статора, в том числе при удалении ЭД от преобразователя на большие расстояния.

Автоколебания (осциллограмма приведена на рис. 6, а) можно подавить отрицательной ОС по активной составляющей тока, поэтому в ряде ЭП автоколебания на проявлялись. Путем моделирования выявлен предпочтительный способ подавления автоколебаний введением положительной ОС по реактивной составляющей тока I_x (рис. 6, б).

Структурная схема системы регулирования скорости асинхронного ЭП с вычислением скорости при постоянном потокосцеплении ротора аналогична представленной на рис. 2 ЭП постоянного тока. Эту схему для переменных в относительных единицах можно привести к виду рис. 7, где I_{RE} – активная составляющая тока ПЧ по отношению к ЭДС ротора; I_{REc} – установившееся значение активной составляющей тока ПЧ по отношению к ЭДС ротора; T_1, T_{int} – параметры регулятора тока; T_c – эквивалентная постоянная времени цепи статора.

Определены параметры регулятора, при которых система при полной компенсации скольжения ($K = 1$) имеет достаточный запас устойчивости. Переменная составляющая положительной ОС по реактивной составляющей тока \tilde{I}_{XE} для подавления возможных автоколебаний АД практически не влияет на процессы регулирования. Погрешность определения активной составляющей тока ротора определяется по данным измерения токов двух фаз. Из-за возможной неидентичности датчиков погреш-

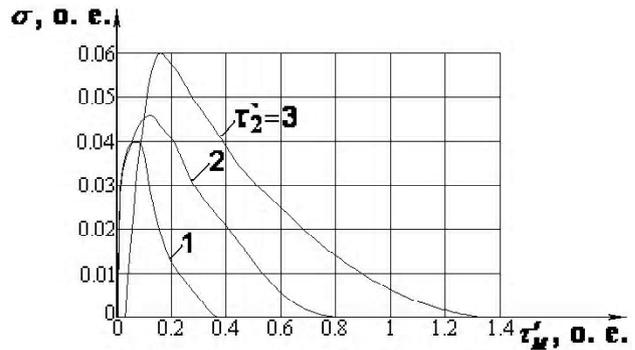
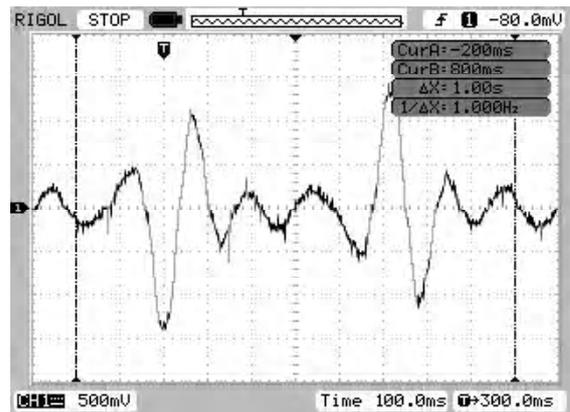
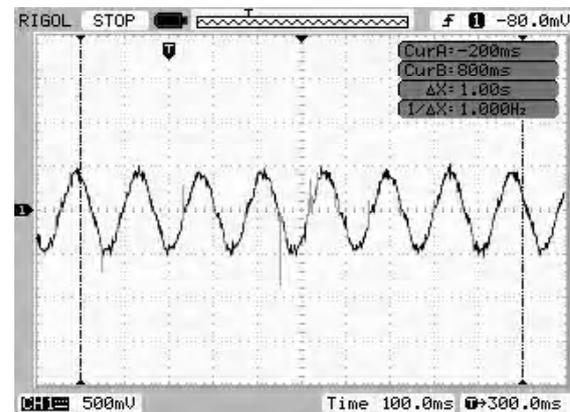


Рис. 5. Области устойчивости АД



а)



б)

Рис. 6. Осциллограммы тока АД при синусоидально модулированном напряжении статора: а – без обратной связи; б – с обратной связью по реактивной составляющей тока

ность определения тока больше, чем в ЭП постоянного тока, и в течение периода выходной частоты ПЧ вычисленные значения могут отличаться, при этом имеет место периодическое изменение значений активной составляющей тока, и пропорциональная часть ПИ-регулятора может вызвать нестабильность частоты даже в установившемся режиме работы ПЧ. Поэтому целесообразно использование интегрального регулятора ($T_1=0$), который с учетом ОС превращается в инерционное звено, которое усредняет разброс в измерении активной составля-

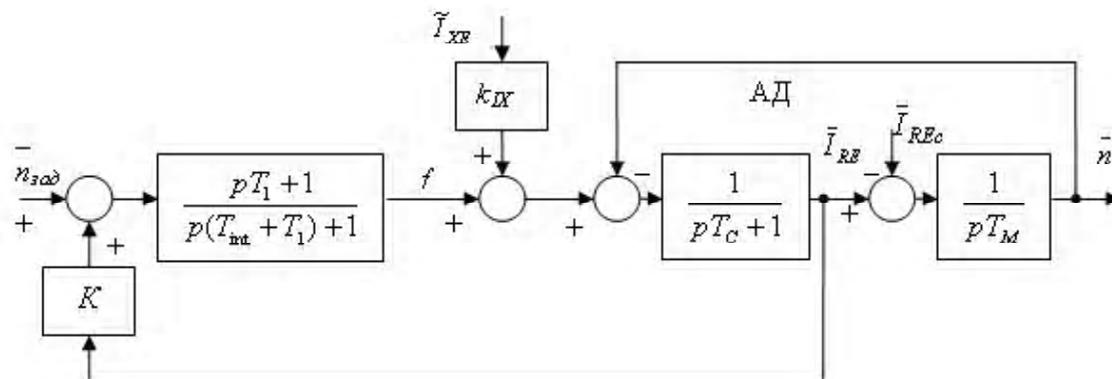


Рис. 7. Структурная схема САР АЭП с косвенным измерением скорости

ющей тока ротора. При этом условие устойчивости принимает вид (4) с той разницей, что вместо постоянной времени якоря $T_{\text{я}}$ следует иметь ввиду эквивалентную постоянную времени цепи статора T_c . Из этого условия следует, что для обеспечения достаточного запаса устойчивости постоянную времени интегрирования T_{int} следует выбирать сравнимой с механической постоянной времени двигателя T_M .

Рассмотренная система регулирования реализована на базе микроконтроллеров KR196CA, dsPIC30F, dsPIC33F [9] в электроприводах постоянного и переменного тока, выпускаемых ПАО «Запорожский электроаппаратный завод» и ОАО «УкрНИИ силовой электроники «Преобразователь».

ВЫВОДЫ

Использование предлагаемых структурных схем и методик определения параметров регулятора улучшает качество регулирования электроприводов с косвенным измерением скорости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов, О. И. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод / Осипов О. И. – М. : Издательство МЭИ, 2004. – 79 с.
2. Чепкунов, Р. А. Устойчивость системы регулирования скорости электроприводов без датчика скорости / Чепкунов Р. А. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2010. – Випуск 4, Ч. 3. – С. 21–25.
3. Чепкунов, Р. А. Параметрическое регулирование скорости мощных электроприводов / Чепкунов Р. А. // Пробле-

4. ми энергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. – 2011. – № 1. – С. 120–121.
5. Чепкунов, Р. А. Спосіб регулювання параметра зовнішнього контура з обмеженням параметра внутрішнього контура при підпорядкованому регулюванні параметрів в системі автоматичного регулювання / Чепкунов Р. А. – Патент на винахід №103128 від 10.09.2013. Бюл. №17.
6. Эпштейн, И. И. Автоматизированный электропривод переменного тока / Эпштейн И. И. – М. : Энергоиздат, 1982. – 192 с.
7. Чепкунов, Р. А. Исследование электромеханических автоколебаний в асинхронном электроприводе на низких частотах / Чепкунов Р. А. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2008. – Випуск 4/ (51), Ч. 2. – С. 17–20.
8. Шипило, В. П. Устойчивость замкнутой системы при управлении тиристорным преобразователем по методу ШИМ-I / В. П. Шипило, И. И. Чикотило // Електротехнічна промисловість. Сер. Преобразовательна техніка. – 1981. – № 2. – С. 2–4.
9. Потапенко, Е. М. Асимптотическое дифференцирование ступенчатых сигналов в задачах управления скоростью и перемещением / Потапенко Е. М., Потапенко Е. Е., Казурова А. Е. // Електромашинобудування та електрообладнання. Тем. вип. : Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. Міжвідомчий науково-технічний збірник. – Київ : «Техніка». – 2006. – Випуск 66. – С. 286–288.
10. Чепкунов, Р. А. Управляющие устройства на основе микроконтроллера dsPIC30F / Р. А. Чепкунов, Д. И. Левинзон // Наука і вища освіта. Тези доповідей учасників XV Міжнародної наукової конференції молодих науковців. Частина 2. Гуманітарний університет «ЗДМУ». – 2007. – Ч. 2. – С. 357–358.

Стаття надійшла до редакції 10.12.2013.

Чепкунов Р. А.¹, Левінзон Д. І.²

¹Науковий співробітник, ВАТ НДІ «Перетворювач», Запоріжжя, Україна

²Д-р техн. наук, проф., Класичний приватний університет, Запоріжжя, Україна

ОСОБЛИВОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З НЕПРЯМИМ ВИМІРЮВАННЯМ ШВИДКОСТІ

Приводяться результати дослідження системи регулювання електропривода постійного струму і асинхронного електропривода з непрямим вимірюванням швидкості з урахуванням впливу зворотних зв'язків за струмом і напругою на стійкість системи. Визначені умови стійкості: системи регулювання при додатному зворотному зв'язку за струмом; контуру регулювання з тиристорним перетворювачем при цифровому згладжуванні пульсацій; асинхронного двигуна як кола регулювання. Обґрунтовано структурні схеми і параметри системи, які забезпечують якісне регулювання.

Ключові слова: електропривод, система регулювання, стійкість.

Chepkunov R. A.¹, Levinzon D. I.²

¹Scientist, Science research institute of the power electronics, Zaporizhja, Ukraine

²Doctor of Technical Sciences, professor, Classic private University, Zaporizhja, Ukraine

FEATURES OF CONTROL OF THE ELECTRIC DRIVES WITH INDIRECT SPEED MEASURING

The features of control of the electric drives with the indirect measuring of speed are related by the presence of positive feed-back on a current, by the large pulsations of signal of feed-back on voltage in the direct-current electric drive, by the display of instability of electric motor in an asynchronous electric drive. The areas of stability at a positive feed-back on a current in the direct-current electric drive and on the active constituent of current in an asynchronous electric drive are certain. For reduction of the sensor inertness of the thyristor converter voltage the digital smoothing out of pulsations of the feed-back signal offers and the areas of stability of the control system are certain. The areas of stability of asynchronous electric drive are certain depending on the coefficient of dispersion of magnetic stream, electromechanics permanent to time, permanent to time of stator and rotor, the method of suppression of self-excited oscillations offers. The structural schemes and system parameters that ensure quality control are substantiated.

Keywords: electric drive, control system, stability.

REFERENCES

1. Osipov O. I. Chastotno-reguliruemiy asinhronnsy elektroprivod. Moscow, Izdatelstvo MEI, 2004, 79 p.
2. Chepkunov R.A. Ustoychivost sistemi regulirovaniya skorosti elektroprivodov bez datchika skorosti, *Visnik Kremtnchutskogo derzhavnogo politehnichnogo universitetu imeni Mihayla Ostrogradckogo*, 2010, Issue 4, Ch. 3, pp. 21–25.
3. Chepkunov R. A. Parametricheskoe regulirovanie skorosti moshnih elektroprivodov, *Problemi energoresursosberezhennja v elektrotehnichnsh sistemah. Nauka, osvita i praktika*, 2011, No. 1, Kremenchuk, pp. 120–121.
4. Chepkunov R. A. Sposib reguljuvannja parametra zovnishnjogo kontura z obmehzennjam parametra vnutrishnjogo kontura pri pidporjadkovomu reguljuvanni parametriv v sistemi avtomatichnogo reguljuvannja. Patent na vinohid №103128 vid 10.09.2013. Bjul. №17.
5. Epshteyn I. I. Avtomotizirovanniy elektroprivod peremennogo toka. Moscow, Jenergoizdat, 1982, 192 p.
6. Chepkunov R. A. Issledovanie elektromehaničeskikh avtokolebaniy v asinhronnom elektroprivode na nizkih chastotah, *Visnik Kremtnchutskogo derzhavnogo politehnichnogo universitetu imeni Mihayla Ostrogradckogo*, 2008, Vipusk 4, Ch. 2, pp. 17–20.
7. Shipillo V. P., Chikotilo I. I. Ustoychivost zamknutoy sistemi pri upravlenii tiristornim preobrazovatelem po metodu SHIM-I, *Elektrotehnicheskaja promishlennost. Ser. Preobrazovatel'naja tehnika*, 1981, No. 2, pp. 2–4.
8. Potapenko E. M., Potapenko E. E., Kazurova A. E. Asimptoticheskoye differentsyrovaniye stupenchatykh signalov v zadachakh upravleniya skorostyu i peremescheniem / Potapenko E. M., Potapenko E. E., Kazurova A. E. *Elektromashynobuduvannya ta elektroobladnannya. Tem. vyp.: Problemy avtomatyzovanogo elektroprivoda. Teoriya i praktika. Mizhvidomchij naukovo-tehnichnyj zbirnyk*, Kyiv, Tekhnika, 2006, Vypusk 66, pp. 286–288.
9. Chepkunov R. A., Levinzon D. I. Upravljajushije ustroystva na osnove mikrokontrollera dsPIC30F, *Nauka i visha osvita. Tezi dopovidey uchasnikiv XV Mizhnarodnoy naukovoy konferentziji molodih naukovtziv*, Chastina 2, Gumanitarnie universitet «ZIDMU», Ch. 2, pp. 357–358.

ДО ВІДОМА АВТОРІВ

Журнал «Радіоелектроніка, інформатика, управління» (PIU) призначений для публікації найбільш значимих наукових і практичних результатів досліджень учених вищих навчальних закладів і наукових організацій.

Журнал включений у перелік наукових видань України, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття вчених ступенів доктора і кандидата технічних наук і фізико-математичних наук (радіофізика).

Статті, що опубліковано в журналі, реферуються в реферативних журналах і базах даних ВІНІПІ (Росія) і «Джерело» (Україна). Журнал міститься у міжнародній базі наукових видань Index Copernicus (<http://journals.indexcopernicus.com/index.php>). Інтернет-сторінка журналу: <http://journal.zntu.edu.ua/ric/index.php?page=index>.

Журнал видається двічі на рік і розповсюджується за Каталогом періодичних видань України (передплатний індекс – 22914).

Для розгляду питання про публікацію статті до редакції журналу необхідно вислати поштою або представити особисто наступне:

- 1) рукопис (роздруковку) статті, підписаний на останній сторінці всіма авторами, в двох примірниках;
- 2) відомості про авторів (українською, російською, англійською мовами);
- 3) оригінал експертного висновку про можливість відкритого опублікування статті;
- 4) супровідний лист-клопотання з організації, де була виконана робота (або лист автора);
- 5) рецензію від фахівця в даній галузі з вченим ступенем доктора наук. Підпис рецензента обов'язково мусить бути завірений.
- 6) диск з наступними файлами:
 - електронна версія статті, повністю ідентична роздруковці;
 - відомості про авторів;
 - рисунки у графічному форматі .tif.

Файли з матеріалами статті можна надіслати електронною поштою або передати особисто на оптичному диску або USB-накопичувачі.

Вимоги до оформлення статті. Приймаються статті, набрані в редакторі Microsoft Word.

Параметри сторінки:

- розмір паперу – А4 (210x297);
- орієнтація – книжкова;
- шрифт – Times New Roman, розмір – 12 pt;
- міжрядковий інтервал – полуторний;
- верхнє поле – 20 мм, нижнє – 20 мм, лівє – 25 мм, правє – 15 мм.

Сторінки рукопису повинні бути пронумеровані. Не допускаються розбіжності рукопису з електронною версією статті. Текст рукопису не повинен мати рукописних виправлень та позначок.

Послідовність розміщення матеріалу статті:

- 1) індекс УДК;
- 2) прізвища й ініціали авторів, назва статті, анотація й ключові слова мовою статті;
- 3) текст статті;
- 4) список літератури;
- 5) прізвища й ініціали авторів, назва статті, анотація й ключові слова російською мовою (якщо мова статті – українська) або українською (якщо мова статті – російська);
- 6) прізвища й ініціали авторів, назва статті, анотація й ключові слова англійською мовою;
- 7) транслітерований список літератури.

Анотації повинні бути інформативними, змістовними (відбивати основний зміст статті та результати досліджень) та структурованими (відбивати логіку опису результатів у статті. *Рекомендований обсяг україномовної та російськомовної анотації приблизно 50 слів, англійськомовної – 100–150 слів (вимоги науково-метричної бази SCOPUS).*

Ключові слова наводяться в називному відмінку у кількості до десяти слів.

Текст статті. Приймаються статті російською, українською та англійською мовами. Розмір статті до 0,5 авторського аркуша. У статті слід уникати зайвої деталізації, проміжних формул і висновків; не слід наводити відомі факти, повторювати зміст таблиць і ілюстрацій у тексті. Стаття не повинна мати граматичних або інших помилок, а також повинна відповідати тематиці журналу й вимогам щодо фахових видань.

Структура тексту статті мусить містити такі необхідні елементи: постановка проблеми в загальному виді і її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких розпочато розв'язання даної проблеми, і на які опирається автор; виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів, висновки по даному дослідженню й перспективи подальших досліджень у даному напрямку. Матеріал публікації мусить бути розбитий на підрозділи не більше двох рівнів.

Рисунки розміщуються в тексті й додатково додаються в окремих файлах (формат .tif з роздільною здатністю 150–300 dpi, чорно-білі або у градаціях сірого). Розмір рисунків не повинен перевищувати ширини сторінки (17 см) або ширини колонки (8 см). Написи на рисунках бажано виконувати шрифтом Times New Roman, розмір 10. Рисунки нумерують і підписують унизу.

Формули виконуються за допомогою вбудованого в Word редактора Microsoft Equation. Формули нумерують у круглих дужках праворуч. Формули великого розміру записуються в кілька рядків.

Нумерація рисунків, формул і таблиць наскрізна однорівнева.

Список літератури наприкінці статті подається мовою оригіналу і складається в порядку згадування посилань у тексті й відповідно до діючого стандарту на бібліографічний опис. Посилання на літературу в тексті нумеруються послідовно й позначаються цифрою у квадратних дужках.

Транслітерований список літератури, відповідно до вимог науково-метричної бази SCOPUS, є повним аналогом списку літератури і виконується на основі транслітерації мови оригіналу латиницею.

Посилання на англійські джерела не транслітеруються. Транслітерація української мови латиницею виконується на основі Постанови КМУ №55 від 27 січня 2010 р., російської – на основі ГОСТ 7.79-2000 (ISO 9-95). Приклади транслітерації розміщені на сайті журналу.

У відомостях про авторів необхідно навести:

- 1) прізвище, ім'я, по батькові (повністю);
- 2) учений ступінь;
- 3) посаду;
- 4) місце роботи;
- 5) електронну адресу;
- 6) робочий, домашній, мобільний телефони.

Статті, які не відповідають зазначеним вимогам, не приймаються до розгляду.

Всі статті проходять закриті рецензування і в разі потреби можуть бути повернуті автору на доробку. Редакція залишає за собою право на літературну редакцію тексту статті без повідомлення автору.

Рукописи й диски не вертаються, коректура та відбитки статей авторам не надсилаються.

Адреса редакції: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, ЗНТУ, редакція журналу «PIU».

Тел. (061) 7-698-2-96 – редакційно-видавничий відділ.

Тел./факс: (061) 7-644-6-62 – головний редактор.

E-mail: rvv@zntu.edu.ua

Наукове видання

**Радіоелектроніка,
інформатика,
управління**

№ 2/2013

Науковий журнал

Головний редактор – д-р фіз.-мат. наук Погосов В. В.

Заст. головного редактора – канд. техн. наук Дубровін В. І.

Комп'ютерне моделювання та верстання
Редактор англійських текстів

Зуб С. В.
Сіренко О. С.

Оригінал-макет підготовлено у редакційно-видавничому відділі ЗНТУ

Свідоцтво про державну реєстрацію
КВ № 6904 від 29.01.2003.

*Підписано до друку 07.02.2014. Формат 60×84/8.
Папір офс.Різогр. друк Ум. друк. арк. 19,07.
Тираж 300 прим. Зам. № 71.*

69063, м. Запоріжжя, ЗНТУ, друкарня, вул. Жуковського, 64

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 2394 від 27.12.2005.