

NO-REFERENCE QUANTITATIVE ASSESSMENT OF GENERALIZED CONTRAST FOR COMPLEX IMAGES

Context. Nowadays the task of automatically measuring of image quality in real time is extremely relevant for the vast majority of practical applications. No-reference quantitative assessment of image quality is one of the most pressing and difficult problems of image processing. Generalized contrast is the most important quantitative characteristic which determines the objective quality of the image. Currently, the development of new effective methods of no-reference measuring of generalized contrast for complex image in automatic mode which have the level of computing costs, which are acceptable to implement the processing in real time, is one of the most urgent tasks of image pre-processing.

Objective. Development of new histogram-based method for no-reference measurement of generalized contrast of complex images on the basis of the mean value for all contrast values of all pairs of image elements (objects and background) for various definitions of contrast kernel.

Method. Analysis of known approaches to measurement of a local contrast of the image elements, of known methods of the quantitative assessment of generalized contrast of complex images as well of the results of experimental research for a series of complex real and test images allowed to reveal inherent patterns (accordance to basic requirements to the definition of contrast, the nature and the dynamic of contrast changes at the linear transformations of the brightness scale), which are manifested depending on the use of the different definitions of the contrast kernels and the metrics of generalized contrast of images.

Results. New histogram-based method for no-reference measurement of generalized contrast for complex images is proposed. No-reference contrast metrics for the histogram-based measuring of generalized contrast of complex images on the basis of the average contrast of image elements for different definitions of contrast kernel is proposed.

Conclusions. Proposed no-reference metrics on the basis of the average contrast of image elements for proposed contrast kernels allow providing accurate quantitative assessment of generalized contrast of the real complex images and enable to evaluate (predict) with reasonable accuracy the perceived image quality at carrying out of subjective (qualitative) expert estimates.

Keywords: image processing, image quality assessment, contrast measurement, no reference metric, generalized contrast, complex image, histogram.

NOMENCLATURE

$C(L_1, L_2)$ is a contrast for two contiguous image elements;

C_{ave} is an averaged value of contrast of current image;

C_{gen} is a value of the generalized contrast of current image;

$C^N(L_1, L_2)$ is a weighted contrast of Nesteruk for two image elements;

$C^{wei}(L_1, L_2)$ is a weighted contrast of image elements;

$C^{rel_1}(L_1, L_2)$ is a relative contrast of image elements;

$C^{rel_2}(L_1, L_2)$ is a relative contrast of image elements;

$C^{Vrb}(L_1, L_2)$ is an absolute contrast of Vorobel for two image elements;

$C^{VB}(L_1, L_2)$ is an absolute contrast of Vorobel and Berehulyak for two image elements;

$C^Y(L_1, L_2)$ is a linear contrast of image elements;

$C_{gen}^N(L_0)$ is a generalized contrast for contrast kernel of Nesteruk for adaptation level L_0 ;

$C_{gen}^{wei}(L_0)$ is a generalized contrast for weighted contrast kernel for adaptation level L_0 ;

$C_{gen}^V(L_0)$ is a generalized contrast for contrast kernel of Vorobel for adaptation level L_0 ;

$C_{gen}^{VB}(L_0)$ is a generalized contrast for contrast kernel of Vorobel and Berehulyak;

C_{ave}^N is an averaged contrast for weighted contrast kernel of Nesteruk;

C_{ave}^{wei} is an averaged contrast for weighted contrast kernel;

C_{ave}^V is an averaged contrast for absolute contrast kernel of Vorobel;

C_{ave}^{VB} is an averaged contrast for absolute contrast kernel of Vorobel and Berehulyak;

C_{ave}^Y is an averaged contrast for linear contrast kernel;

$f(C, p(L))$ is a function of averaging of contrast values of image elements;

$g(C, r(C))$ is a function of generalized contrasts of image elements;

$L(S)$ is a function of brightness values of pixels of image X ;

L is an average value of brightness L of image pixels;

L_0 is a value of the adaptation level for current image;

L_i is a value of brightness of i -th element of image X ;

L_{min} is a minimum brightness values of elements of initial image X ;

L_{max} is a maximum brightness values of elements of initial image X ;

$LMAX$ is a maximum possible value of brightness L ;

$p(L_i)$ is a density distribution function of values of brightness L ;

$p(L_i, L_j)$ two-dimensional probability density function of values of brightness L ;
 $r(C)$ is a density distribution of values of contrast of image elements;
 S is a closed set of pixels of initial image X ;
 S_i is a nonempty connected i -th subsets of pixels of initial image X ;
 $X(S, L)$ is the initial image.

INTRODUCTION

Currently, the development of new effective techniques of image quality assessment is one of the most urgent and important tasks in imaging, pre-processing and analysis of images [1, 2].

The object of study is the process of contrast measurement for image quality assessment.

The image quality usually defined on the basis of main objective characteristics (parameters) of current image [3, 4]. The main characteristic which defines the objective quality of image is its generalized contrast [3, 5]. At present, however, quantitative assessment and measurement of values of generalized contrast for complex images are not defined uniquely in the literature.

The generalized contrast of complex images is usually defined basing on the values of quantitative assessments of contrast for all individual pairs of image elements (objects and background) [6, 7]. Contrast of two image elements (of two objects or an object and the background) is a dimensionless function, which characterizes the difference between the values of their brightness [7].

The choice of contrast definition of image elements (of contrast kernel) is very important problem and appreciably defines the effectiveness (the accuracy) of measurement of the generalized contrast of complex (multi-element) images [8]. Definitions of the contrast of image elements shall meet the basic requirements to the contrast definition [8] and should ensure reasonably accurate quantitative assessment (measurement) of contrast of image elements for the real complex images and should allow evaluate (predict) the perceived values of image contrast at carrying out of subjective (qualitative) expert assessments [4].

The various definitions of contrast of image elements are known [8]. However, the known definitions of contrast have several very significant disadvantages [8, 9]. The main disadvantages of the most of the known definitions of contrast are the uncertainty and the multiplicity of the conditions under which the extreme values of contrast are achieved. Also, the essential disadvantage of known contrast of contrast is great changes (non-invariance) of their values under linear transformations of the brightness scale of image.

Currently, the development of new efficient contrast metrics for the accurate quantitative assessment (of measurement) of the objective quality of images is an extremely urgent task in imaging, image processing and analysis. For elimination of these disadvantages the metric of generalized contrast of image on the basis of the averaged contrast for all pairs of image elements (objects and background) with the using various definitions of contrast kernels is proposed. This will also improve the accuracy of

measurements of the generalized contrast of multi-element images with a complex structure. Histogram-based method for no-reference measuring of generalized contrast of complex images is also proposed.

The subject of study is the histogram-based methods of no-reference contrast measurement for complex images.

The purpose of the work is to increase the accuracy of formation of quantitative assessments (of measurement) of contrast of multi-element images with complex structure by development of new metrics of the generalized contrast.

1 PROBLEM STATEMENT

Let's suppose that given the initial image $X = \{ X(S, L) \}$, where L is a function of brightness which is defined on the closed set S of image pixels, where $L: S \rightarrow [0, 1] \subset R$.

We suppose there is a partition $S = \{ S_1, S_2, \dots, S_k \}$ of the closed set S of pixels of image X on k ($k \geq 2$) the nonempty connected subsets (regions) $S_i, i = \overline{1, k}$ which correspond to the image elements (to the objects and the background), and $S_i \subset S, \bigcup_{i=1}^k S_i = S, S_i \cap S_j = \emptyset \forall i \neq j, i, j \in [1, k], k \in N \wedge k \geq 2, L_i = L(z | z \in S_i), L: S_i \rightarrow L_i \in [0, 1] \subset R, i = \overline{1, k}$.

Also the probability density $p(L)$ of brightness L of image X is known,

where $p(L_i) = |S_i| / |S| = |S_i| / \sum_{j=1}^k |S_j|, L_i \in [0, 1], 1 \leq i \leq k$.

Suppose given the definition of the contrast $C(\cdot, \cdot)$ of two contiguous image elements, $C: L \times L \rightarrow [-1, 1] \subset R$, which is the asymmetric dimensionless function and satisfies the main requirements to contrast definition, namely:

$$C(L_i, L_j) = -C(L_j, L_i), \quad C(L_i, L_j) = 0 \quad \text{only when} \\ L_i = L_j, \quad |C(L_i, L_j)| = \max_{(n,m)} |C(L_n, L_m)| \quad \text{only when} \\ |L_i - L_j| = \max_{(n,m)} |L_n - L_m|.$$

The purpose of the work is the measurement of generalized contrast of multi-element images with complex structure. The generalized contrast C_{gen} is defined as average value of contrasts $C(\cdot, \cdot)$ at the boundaries of the objects and background, where $r(\cdot)$ is density distribution of contrast $C(\cdot, \cdot)$

$$C_{gen} = g(C, r(C)) = \int_{-\infty}^{\infty} |C(L_i, L_j)| \cdot r(C(L_i, L_j)) dC(L_i, L_j),$$

where $g: (C, r(C)) \rightarrow [0, 1]$.

However, the edges detection and the assessment of distribution $r(\cdot)$ of contrast values $C(\cdot, \cdot)$ on the boundaries of objects and background are very challenging.

For a given definition of $C(\cdot, \cdot)$ and the known values $\{ p(L_i) \}_{i=\overline{1, k}}$ the problem of measuring the generalized contrast C_{gen} can be presented as the problem of measurement

of the mean of the all values of contrast for all pairs of elements on current image, $C_{gen} = f(C, p(L))$. In turn, the problem of measurement of the mean of the all values of contrast for all pairs of image elements is to find such function $f : (C, \{p(L)\}) \rightarrow [0, 1] \subset R$, which satisfy to all main requirements to the definition of contrast and is invariant under the linear transformations of the brightness scale of the image.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

The unambiguous and generally accepted definition of the generalized contrast for complex images is currently unknown. The contrast measurement for complex images is usually carried out by analyzing of contrast values of image elements. Contrast of image elements is usually defined as the difference of brightness values on the boundary of the two image elements (of two objects or object and background). Currently, the various definitions of the contrast of pairs of image elements for various applications are known [8]. In [6] Nesteruk (1970) proposed a definition of the weighted contrast for two elements of a complex image for adaptation level L_0 :

$$C^N(L_1, L_2) = (L_1 \cdot L_2 - L_0^2) / (L_1 \cdot L_2 + L_0^2). \quad (1)$$

The value L_0 of the level of adaptation is most often equal to the average brightness of the current image [6], $L_0 = \bar{L}$. The most wide practical application is characteristic for the definition of a weighted contrast of image elements [10, 11]:

$$C^{wei}(L_1, L_2) = (L_1 - L_2) / (L_1 + L_2). \quad (2)$$

Another known definition of contrast is relative contrast, which is defined as [8]:

$$C^{rel_1}(L_1, L_2) = (L_1 - L_2) / \max(L_1, L_2), \quad (3)$$

$$C^{rel_2}(L_1, L_2) = (L_1 - L_2) / (1 - \min(L_1, L_2)). \quad (4)$$

The main disadvantages of contrast definitions (1)–(4) are the uncertainty and the multiplicity of the conditions under which the extreme values of weighted contrast are achieved [8]. In [8] Vorobel (1999) has offered the linear definition of the absolute contrast of image elements which provides performance of the basic (discussed earlier) requirements to contrast:

$$C^{Vrb}(L_1, L_2) = (L_1 - L_2) / LMAX. \quad (5)$$

In [9] Vorobel and Berehulyak (2007) have proposed a generalized definition for absolute contrast (where $n > 0$):

$$C^{VB}(L_1, L_2) = \text{sign}(L_1^n - L_2^n) \cdot |L_1^n - L_2^n|^{1/n}. \quad (6)$$

The linear definition of contrast, which satisfies the conditions of asymmetry and equivalence of impact of the arguments, of unambiguity and certainty of the conditions under which the equality to zero and the extreme values of contrast are achieved, and which is invariant to the linear transformations of the brightness scale, has the form:

$$C^Y(L_1, L_2) = (L_1 - L_2) / (L_{\max} - L_{\min}). \quad (7)$$

The definitions (1)–(7) of the contrast of image elements are called the contrast kernels [8] and are the basis for the construction of metrics of contrast for complex images.

The assessment of generalized contrast for complex (multi-element) images is usually carried out by measuring of contrast values of image elements (of objects and background) [6]. The various approaches to the measurement of the generalized contrast of complex image are known [6, 8]. Currently, as a measure of generalized contrast of complex image most often used the averaged value of the contrast of image elements in relation to the preset value of adaptation level.

For example, in [6] Nesteruk (1970) proposed the definition of the generalized contrast for anisotropic images on the base of the weighted contrast C^N (1):

$$C_{gen}^N(L_0) = \int_0^1 |(L^2 - L_0^2) / (L^2 + L_0^2)| \cdot p(L) dL. \quad (8)$$

Currently, for the contrast measurement of image elements the definition of weighted contrast is most widely used, which has the form [8]:

$$C_{gen}^{wei}(L_0) = \int_0^1 |(L - L_0) / (L + L_0)| \cdot p(L) dL. \quad (9)$$

However, contrast definitions (1)–(4) have significant disadvantages. Their main disadvantages are the uncertainty and the multiplicity of conditions of equality the extreme values.

To address the shortcomings specific to definitions (1) and (2) of weighted contrast, Vorobel (1999) has proposed the definition of generalized contrast on the base of the contrast C^{Vrb} (5) [8]:

$$C_{gen}^V(L_0) = \frac{1}{2LMAX} \int_0^1 |2 \cdot (L - L_0) + LMAX - |2 \cdot (L - L_0) - LMAX|| \cdot p(L) dL. \quad (10)$$

In [9] Vorobel and Berehulyak (2007) have proposed the generalized definition of the contrast for complex image:

$$C_{gen}^{VB}(L_0) = \frac{1}{2} \int_0^{LMAX} \left| \sqrt[n]{2(L^n - L_0^n)} + 1 - \sqrt[n]{2(L^n - L_0^n)} - 1 \right| \cdot p(L) dL. \quad (11)$$

The known definitions (8)–(11) are no-reference metrics for measurement of image contrast. The choice of concrete value of adaptation level L_0 for current image is a very difficult problem to the practical implementation of this approach to measurement of contrast and largely determines the accuracy of measuring of image contrast with the using (8)–(11).

3 MATERIALS AND METHODS

In this paper the no-reference method of assessment of generalized contrast of complex image by finding the mean of all values of generalized contrast for all possible values L_0 of the level of adaptation for the current image is proposed.

As an assessment of the generalized contrast we propose the using of the average value from all possible values of

generalized contrast which correspond to all possible values of the level of adaptation for the current image:

$$C_{age} = \int_{L_{min}}^{L_{max}} C_0(L_i) \cdot p(L_i) dL_i. \quad (12)$$

In this case we propose to define the generalized contrast of complex image at a given value of a level of adaptation as:

$$C_0(L_0) = \int_0^1 |C(L_j, L_0)| \cdot p(L_j, L_0) / p(L_0) dL_j, \quad (13)$$

$$L_0 \in [L_{min}, L_{max}],$$

$$p(L_0) = \int_0^1 p(L_j, L_0) dL_j. \quad (14)$$

The proposed method of no-reference assessment of generalized contrast of complex image is defined in accordance with (12) and (13). The expressions (12), (13) define the metric for the contrast measurement of multi-element images with using various known definitions of contrast kernels.

It should be noted that the two-dimensional distribution $p(L_j, L_0)$ of brightness values on the current image is overwhelmingly not known.

In the case where the objects on image are the equally important and independent and have no influence on each other (are independent events of relative to each other), we have:

$$p(L_j, L_0) = p(L_j) \cdot p(L_0). \quad (15)$$

In this case for (13), (12) using (15) we obtain:

$$C_0(L_0) = \int_0^1 |C(L_j, L_0)| \cdot p(L_j) dL_j, \quad (16)$$

$$C_{ave} = \int_{L_{min}}^{L_{max}} \int_0^1 |C(L_j, L_0)| \cdot p(L_j) \cdot p(L_0) dL_j dL_0. \quad (17)$$

The proposed method (12), (13), (16) provides the opportunity of creating the contrast metrics with using the various known definitions (1)–(7) of contrast of image elements (of contrast kernels). Accordingly, the histogram-based metrics of contrast on the basis of the definitions (12), (16) using known definitions (1), (2), (5)–(7) of contrast kernels can be defined as follows:

$$C_{ave}^N = \int_0^1 \int_0^1 \left| (L_i \cdot L_j - \bar{L}^2) / (L_i \cdot L_j + \bar{L}^2) \right| \cdot p(L_i) \cdot p(L_j) dL_i dL_j, \quad (18)$$

$$C_{ave}^{wei} = \int_0^1 \int_0^1 \left| (L_i - L_j) / (L_i + L_j) \right| \cdot p(L_i) \cdot p(L_j) dL_i dL_j, \quad (19)$$

$$C_{ave}^V = \int_0^1 \int_0^1 \frac{|L_i - L_j|}{L_{MAX}} \cdot p(L_i) \cdot p(L_j) dL_i dL_j, \quad (20)$$

$$C_{ave}^{VB} = \int_0^1 \int_0^1 \left| L_i^n - L_j^n \right|^{1/n} \cdot p(L_i) \cdot p(L_j) dL_i dL_j, \quad (21)$$

$$C_{ave}^Y = \int_0^1 \int_0^1 \left| \frac{L_i - L_j}{L_{max} - L_{min}} \right| \cdot p(L_i) \cdot p(L_j) dL_i dL_j. \quad (22)$$

The known (8)–(11) and the proposed (18)–(22) definitions are no-reference contrast metric for quantitative assessment of generalized contrast of complex images. A comparison of the proposed and known histogram-based methods of contrast assessment for complex images was carried out in Sections 4, 5 and 6.

4 EXPERIMENTS

Known (8)–(11) and proposed (18)–(22) metrics of contrast were programmed in the interactive environment of programming MATLAB to carry out a subsequent comparative analysis of their effectiveness. A comparison of the known (8)–(11) and proposed (18)–(22) methods were carried out on the basis of measurement of generalized contrast for the two groups of test images. The first group consists of fifteen test images, which are the results of linear stretching of a well-known initial image (Fig. 1) for the ranges [0,00–0,40], [0,15–0,55], [0,30 0,70], [0,45 0,85], [0,60–1,00], [0,00–0,60], [0,10–0,70], [0,20–0,80], [0,30–0,90], [0,40–1,00], [0,00–0,85], [0,05–0,90], [0,10–0,95], [0,15–1,00], [0,00–1,00] (Fig. 2). The second group of the test images consists of fifteen reference images with complex structural nature (Fig. 3).

The results of measurements of generalized contrast for the two groups of test images (Fig. 2 and Fig. 3) with the use of known (8)–(11) and proposed (18)–(22) metrics are shown in Section 5.

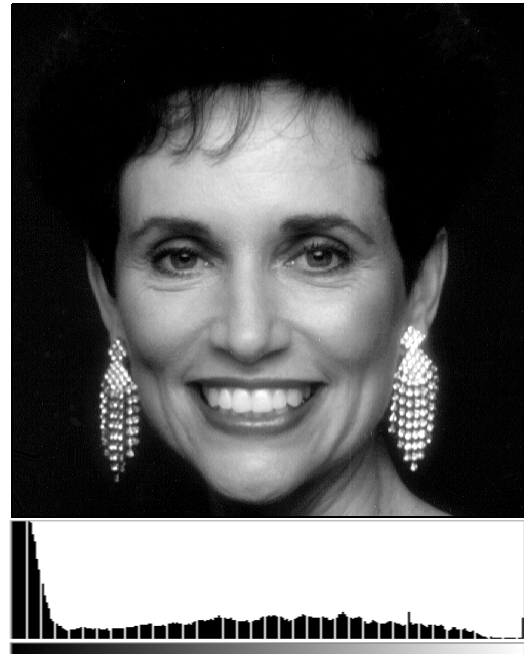


Figure 1 – Initial test image and its histogram

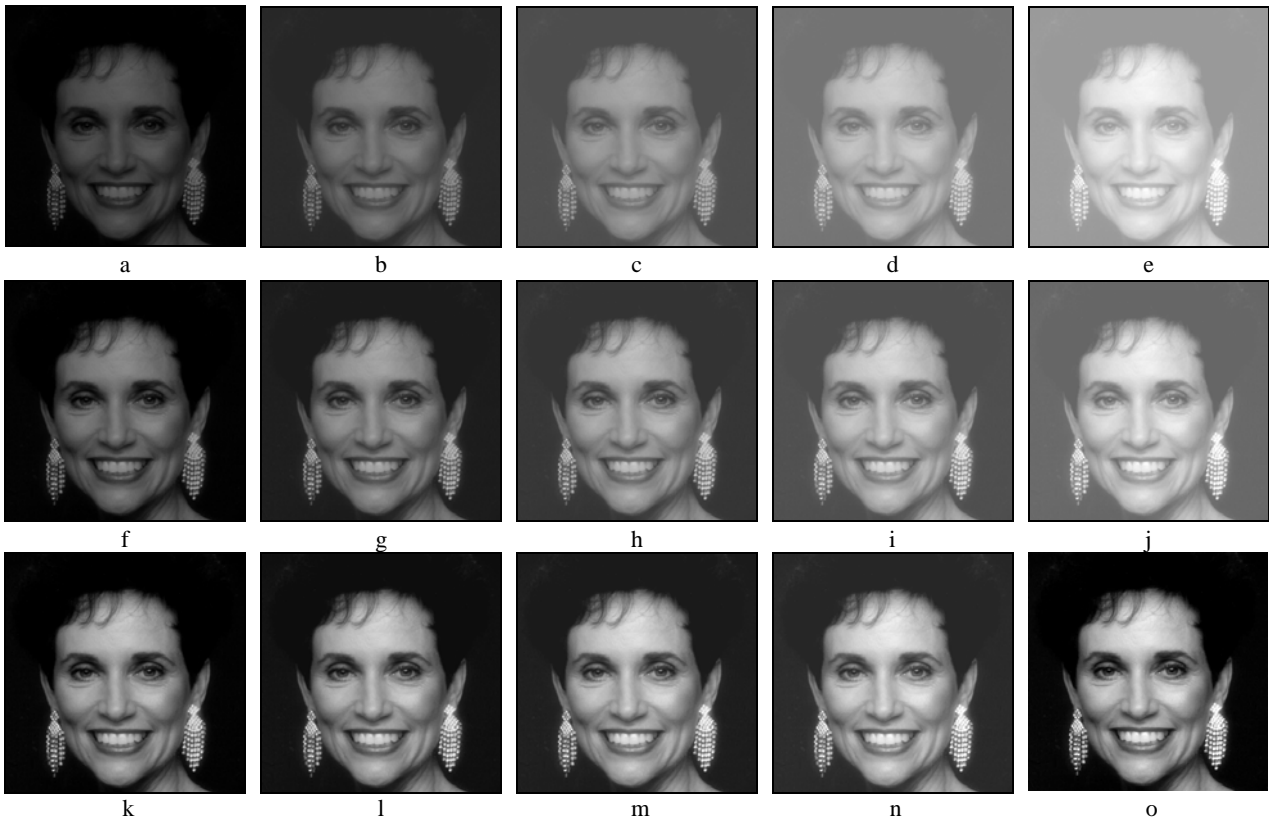


Figure 2 – The appearance of test images of the first group with the dynamic range:
 a – [0,00–0,40]; b – [0,15–0,45]; c – [0,30–0,70]; d – [0,45–0,85]; e – [0,60–1,00];
 f – [0,00–0,60]; g – [0,10–0,70]; h – [0,20–0,80]; i – [0,30–0,90]; j – [0,40–1,00];
 k – [0,00–0,85]; l – [0,05–0,90]; m – [0,10–0,95]; n – [0,15–1,00]; o – [0,00–1,00]



Figure 3 –Test images of the second group

5 RESULTS

Researches of the effectiveness of the proposed (8)–(11) and known (18)–(22) no-reference metrics of contrast were carried out by measuring (by quantitative assessment of the value) of the generalized contrast for two groups of test images with complex structure.

The results of the measurement for the first and the second groups of test images are shown in Table 1 and Table 2. Graphs of the values (Tab. 1) of generalized contrast for test images of the first group (Fig. 2) are shown in Fig. 4. Graphs of the values (Tab. 2) of generalized contrast for test images of the second group (Fig. 3) are shown in Fig. 5.

6 DISCUSSION

The results of the measurements show that the definitions (8), (9) and (18), (19) of the weighted contrast using contrast kernels (1), (2) are invariant to linear stretching of brightness range, but their values are significantly changed at additive transformations of brightness values on image (of mean value of brightness on image) (Fig. 4). The assessments (10), (20) on the basis of absolute kernel

of Vorobel (5) of absolute contrast are invariant to additive transformations and are proportional to multiplicative transformations of image brightness scale (Fig. 4). The assessments (11), (21) on the basis of non-linear absolute kernel of Vorobel and Berehulyak (6) are changed substantially under linear transformations of the image brightness (Fig. 4). The contrast assessment (22) on the basis of linear kernel (7) is invariant to linear transformations of image brightness scale (Fig. 4). The assessments of averaged contrast (20) and (22) for absolute kernel of Vorobel (5) and of linear kernel (7) coincide when analyzing pre-normalized images (Fig. 4). The values of known assessments of the generalized contrast (10), (11) on the basis of contrast kernel of Vorobel (5) and contrast kernel of Vorobel and Berehulyak (6) are proportional the proposed assessments (20), (21) of averaged contrast, however known definitions (10), (11) of the generalized contrast give the significantly overstated values of contrast assessments (Fig. 4 and Fig. 5). The assessments (20) and (22) used absolute kernel of Vorobel (5) and linear kernel (7) are the closest and are most suitable for quantitative assessment of contrast of images with complex structure (Fig. 5).

Table 1 – Results of calculating for the first group of test images

	2.a	2.b	2.c	2.d	2.e	2.f	2.g	2.h	2.i	2.j	2.k	2.l	2.m	2.n	2.o
L_{min}	0.00	0.15	0.30	0.45	0.60	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.00	0.05	0.10	0.15	0.00
L_{max}	0.40	0.45	0.70	0.85	1.00	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	0.85	0.90	0.95	1.00	1.00
C_{gen}^N	0.802	0.392	0.247	0.182	0.144	0.802	0.567	0.417	0.327	0.270	0.802	0.721	0.631	0.558	0.802
C_{gen}^{wei}	0.647	0.207	0.126	0.092	0.073	0.646	0.321	0.222	0.170	0.139	0.646	0.471	0.374	0.315	0.646
C_{gen}^V	0.207	0.207	0.206	0.206	0.207	0.310	0.309	0.310	0.310	0.310	0.436	0.436	0.435	0.437	0.504
C_{gen}^{VB}	0.205	0.252	0.276	0.295	0.310	0.307	0.347	0.373	0.392	0.408	0.431	0.456	0.474	0.489	0.496
C_{ave}^N	0.813	0.251	0.158	0.117	0.093	0.810	0.379	0.267	0.209	0.173	0.810	0.562	0.442	0.372	0.813
C_{ave}^{wei}	0.688	0.224	0.142	0.105	0.084	0.697	0.325	0.237	0.186	0.155	0.696	0.450	0.370	0.322	0.688
C_{ave}^V	0.123	0.123	0.122	0.122	0.123	0.184	0.183	0.184	0.183	0.184	0.261	0.260	0.260	0.261	0.307
C_{ave}^{VB}	0.131	0.159	0.172	0.184	0.193	0.196	0.219	0.235	0.246	0.256	0.278	0.293	0.303	0.314	0.327
C_{ave}^Y	0.307	0.307	0.305	0.306	0.307	0.307	0.306	0.307	0.306	0.307	0.306	0.306	0.307	0.307	0.307

Table 2 – Results of calculating for the second group of test images

	3.a	3.b	3.c	3.d	3.e	3.f	3.g	3.h	3.i	3.j	3.k	3.l	3.m	3.n	3.o
C_{gen}^N	0.122	0.348	0.250	0.297	0.780	0.232	0.532	0.325	0.408	0.820	0.857	0.412	0.422	0.363	0.463
C_{gen}^{wei}	0.065	0.184	0.132	0.159	0.563	0.128	0.306	0.178	0.236	0.552	0.745	0.231	0.281	0.259	0.270
C_{gen}^V	0.208	0.196	0.243	0.262	0.303	0.289	0.328	0.304	0.336	0.375	0.455	0.393	0.410	0.441	0.640
C_{gen}^{VB}	0.301	0.242	0.322	0.333	0.304	0.378	0.367	0.370	0.387	0.380	0.439	0.454	0.468	0.508	0.746
C_{ave}^N	0.102	0.238	0.186	0.220	0.678	0.194	0.386	0.253	0.329	0.623	0.920	0.318	0.441	0.432	0.366
C_{ave}^{wei}	0.092	0.229	0.176	0.213	0.537	0.184	0.345	0.246	0.311	0.434	0.618	0.292	0.368	0.358	0.321
C_{ave}^V	0.142	0.126	0.159	0.175	0.198	0.201	0.209	0.215	0.235	0.228	0.265	0.264	0.263	0.281	0.370
C_{ave}^{VB}	0.218	0.168	0.224	0.237	0.214	0.280	0.251	0.283	0.292	0.247	0.277	0.331	0.315	0.333	0.446
C_{ave}^Y	0.142	0.170	0.176	0.195	0.198	0.237	0.213	0.244	0.235	0.228	0.266	0.276	0.263	0.281	0.370

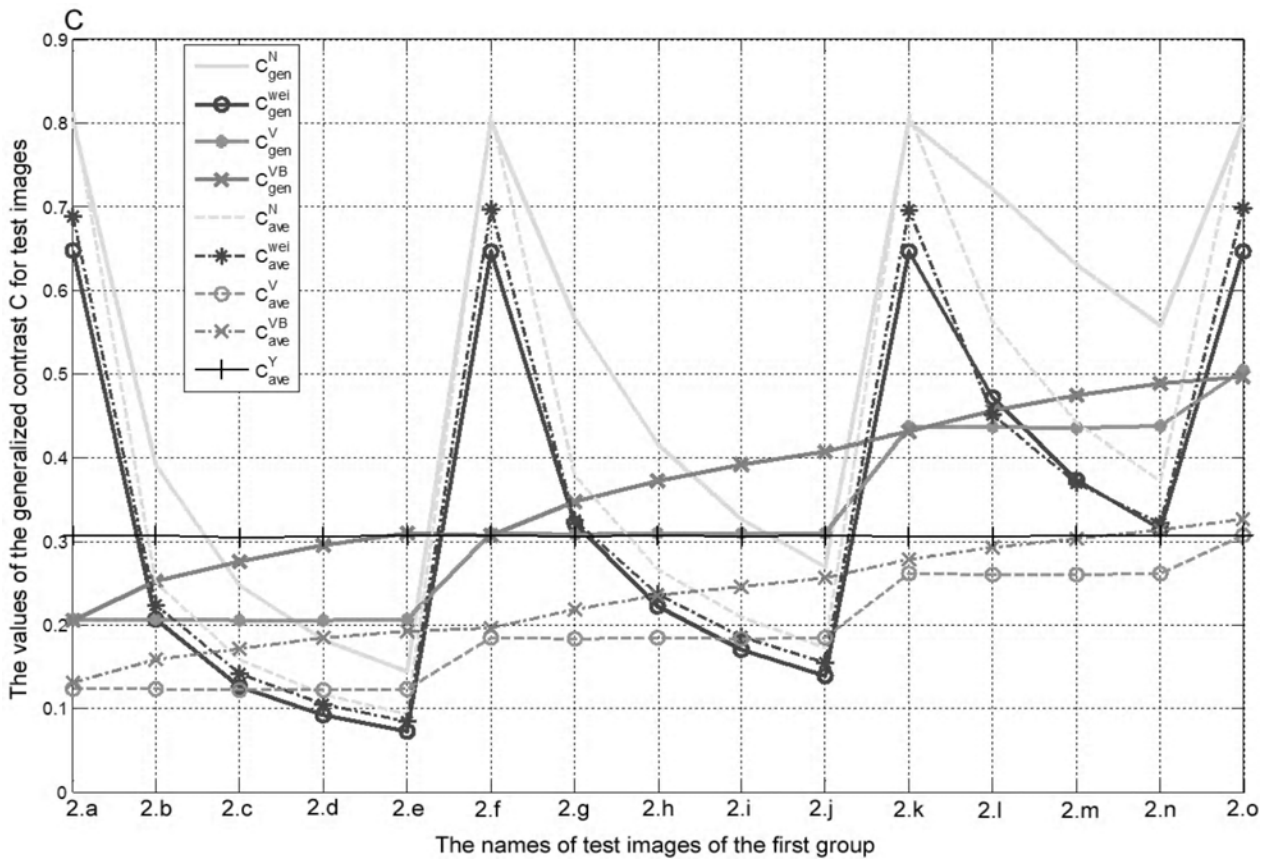


Figure 4 – Values of generalized contrast for test images of the first group

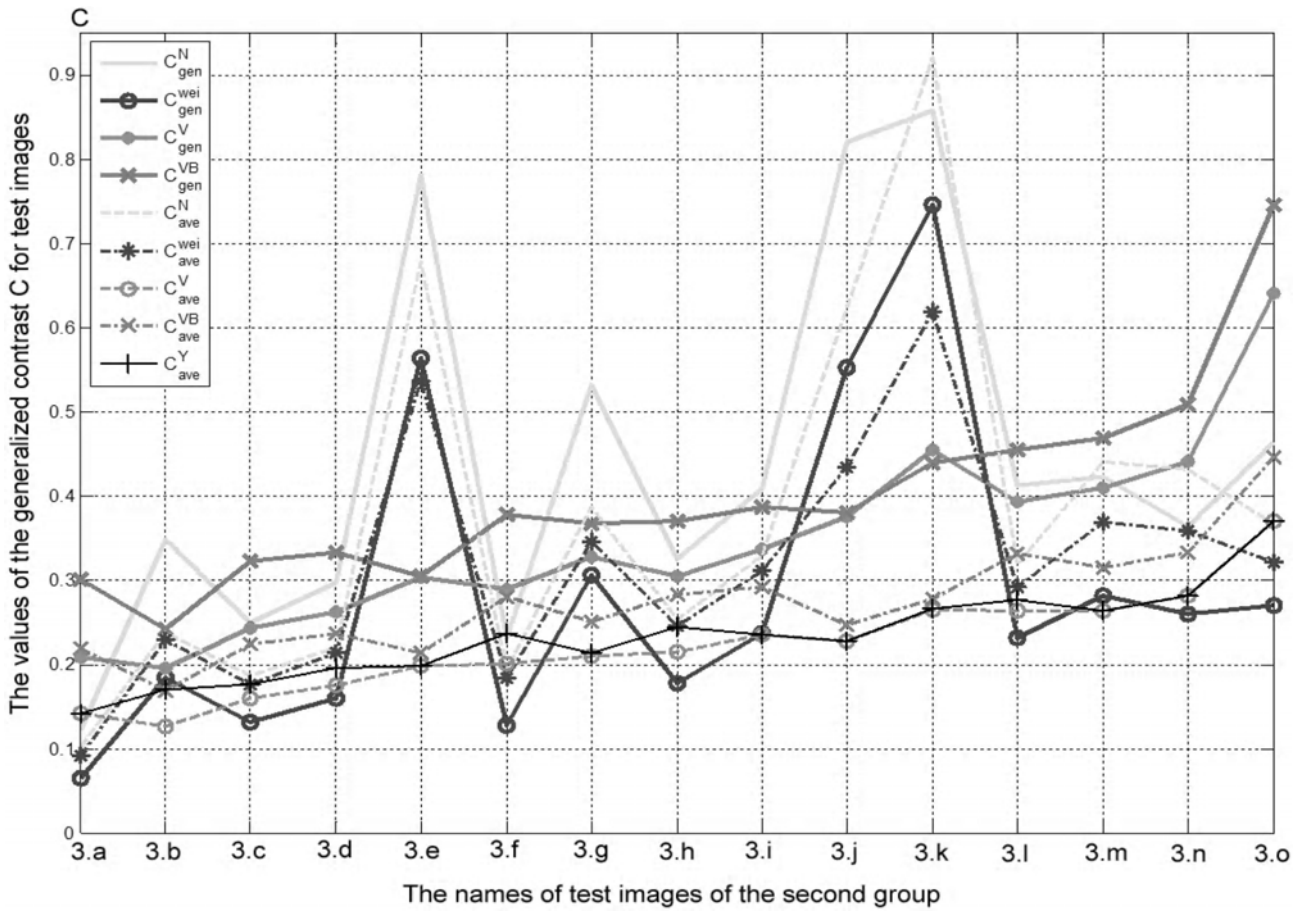


Figure 5 – Values of generalized contrast for test images of the second group

CONCLUSIONS

The problem of no-reference measuring of a generalized contrast of complex images is considered. The urgent problem of increasing the accuracy and reliability of no-reference measurements of contrast for multi-element images with complex structure is solved to improve the accuracy of the image quality assessment in automatic mode.

The histogram-based method of no-reference contrast measurement of multi-element image with complex structure by finding the mean of all values of generalized contrast for all possible values of the level of adaptation for the current image is firstly proposed. The no-reference contrast metrics on the basis of the averaged value of contrast for all pairs of image elements (objects and background) using various definitions of contrast of image elements (contrast kernels) is firstly proposed. This allows to increase the accuracy of measuring of generalized contrast for multi-element images with complex structure and, as a consequence, to improve exactness and reliability of image quality assessment for complex images. This also allows to provide the operative measurement of contrast and the assessment of image quality in the automatic mode with the level of computing costs which is acceptable to processing and image analysis in real time. The practical significance of obtained results is that software implementation of the proposed contrast metrics is developed, as well as experiments to study their properties at various definitions of contrast kernels are carried out.

The experimental results allow to recommend the proposed method of no-reference measurement of contrast to use in practice for image quality assessment in automatic mode as well as to ensure the effective choice of the definitions of contrast of image elements (of contrast kernels) and conditions of their use for various practical applications.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out within the framework of the project of Special design office of television systems (Lviv,

Ukraine) "On-board system of enhanced vision for transport vehicles" (No. 118/16).

REFERENCES

1. Wang Z. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity / Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, E. P. Simoncelli // IEEE Transactions on Image Processing. – 2004. – Vol. 13, № 4. – P. 600–612. DOI: 10.1109/TIP.2003.819861.
2. Wang Z. Why is image quality assessment so difficult? / Z. Wang, A. C. Bovik, L. Lu // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Orlando, FL, USA, May 2002. – Vol. 4. – P. 3313–3316. DOI: 10.1109/ICASSP.2002.1004620.
3. Wang Z. A universal image quality index / Z. Wang and A. Bovik // Signal Processing Letters. – 2002. – Vol. 9, № 3. – P. 81–84. DOI: 10.1109/97.995823.
4. Wang Z. Modern Image Quality Assessment / Z. Wang, A. C. Bovik. – San Rafael, CA, USA: Morgan & Claypool, 2006. – 160 p. DOI: 10.2200/S00010ED1V01Y200508IVM003.
5. No-reference image and video quality assessment: a classification and review of recent approaches / [M. Shahid, A. Rossholm, B. Löveström, H.-J. Zepernick] // EURASIP Journal on Image and Video Processing. – 2014. – № 1. – P. 1–32. DOI: 10.1186/1687-5281-2014-40.
6. Нестерук В. Ф. Контрастный закон восприятия света / В.Ф. Нестерук, Н. Н. Порфирьева // Оптика и спектроскопия. – 1970. – Т. XXIX, вып. 6. – С. 1138–1143.
7. Peli E. Contrast in Complex Images / E. Peli // Journal of the Optical Society of America A. – October 1990. – Vol. 7, №10. – P. 2032–2040. DOI: 10.1364/JOSAA.7.002032.
8. Воробель Р. Логарифмічна обробка зображень / Р. Воробель. – Київ, Наукова думка, 2012. – 231 с.
9. Vorobel R. Image contrast and its connection with fuzzy logic / R. Vorobel, O. Berehulyak // Proceedings of II International Workshop on Inductive Modeling (IWIM), Prague, Czech Republic, 2007. – P. 104–110. ISBN 978-80-01-03881-9.
10. Gonzalez R. C. Digital Image Processing, 2nd Edition / R. C. Gonzalez, R. E. Woods. – NY: Prentice Hall, 2002. – 976 p. ISBN 13: 978-0201180756, ISBN10: 0201180758.
11. Pratt W. K. Digital Image Processing / William K. Pratt. – New York, Chichester : John Wiley & Sons, second edition, 1993. – 720 p. DOI: 10.1002/0471221325.

Article was submitted 16.04.2017.

After revision 25.05.2017.

Слманова О. С.¹, Романишин Ю. М.²

¹Аспірант, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

²Д-р техн. наук, завідувач кафедри електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна, професор кафедри, Вармінсько-Мазурський університет в Ольштині, Ольштин, Польща

КІЛЬКІСНА ОЦІНКА БЕЗ ЕТАЛОНУ ДЛЯ УЗАГАЛЬНЕНОГО КОНТРАСТУ СКЛАДНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Актуальність. В наш час вимірювання (кількісна оцінка) якості зображень у автоматичному режимі є надзвичайно актуальною проблемою для більшості практичних застосувань. Вимірювання якості зображення без еталону є одним із найбільш актуальних і складних завдань обробки та аналізу зображень. Контраст є найбільш важливою кількісною характеристикою, яка визначає об'єктивну якість зображення в цілому. В наш час розробка нових ефективних методів (метрик) для вимірювання узагальненого контрасту зображень у автоматичному режимі є однією з найбільш актуальних задач обробки і аналізу зображень.

Мета. Розробка методу вимірювання узагальненого контрасту багатоелементних зображень зі складною структурою за їх гістограмою на основі усередненого контрасту елементів зображення (об'єктів і фону) з використанням різних визначень ядра контрасту.

Метод. Аналіз відомих підходів до вимірювання локального контрасту елементів зображення, відомих методів кількісної оцінки узагальненого контрасту складних зображень, а також результатів експериментальних досліджень для ряду складних реальних і тестових зображень дозволив виявити властиві їм закономірності (відповідність основним вимогам до визначення контрасту, характер і динаміку змін контрасту при лінійних перетвореннях шкали яскравості зображення), які проявляються в залежності від використання різних визначень ядер контрасту і метрик узагальненого контрасту зображень.

Результати. Запропоновано новий метод вимірювання узагальненого контрасту без еталону для складних зображень на основі гістограми. Запропоновано метрику вимірювання узагальненого контрасту для складних зображень на основі усередненого контрасту для всіх окремих пар елементів зображення (об'єктів і фону) для різних визначень ядра контрасту.

Висновки. Запропонована нова метрика контрасту на основі середнього для всіх значень контрасту всіх елементів зображення дозволяє забезпечити точну кількісну оцінку узагальненого контрасту складних реальних зображень і оцінити (прогнозувати) якість сприйняття зображення при проведенні суб'єктивних (якісних) експертних оцінок.

Ключові слова: обробка зображень, оцінка якості зображення, вимірювання контрасту, метрика без еталону, узагальнений контраст, складне зображення, гістограма.

Елманова Е. С.¹, Романишин Ю. М.²

¹Аспирант, Национальный университет «Львовская политехника», Львов, Украина

²Д-р техн. наук, заведующий кафедры электронных средств информационно-компьютерных технологий, Национальный университет «Львовская политехника», Львов, Украина, ²профессор кафедры, Университет Вармии и Мазур в Ольштыне, Ольштын, Польша

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА БЕЗ ЭТАЛОНА ДЛЯ ОБОБЩЕННОГО КОНТРАСТА СЛОЖНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Актуальность. В настоящее время измерение (количественная оценка) качества изображений в автоматическом режиме является чрезвычайно актуальной задачей для большинства практических приложений. Измерение качества изображения без эталона является одной из наиболее актуальных и сложных задач обработки и анализа изображений. Контраст является наиболее важной количественной характеристикой, которая определяет объективное качество изображения в целом. В настоящее время одной из наиболее актуальных задач анализа изображений является разработка новых эффективных методов (метрик) для измерения обобщенного контраста изображений в автоматическом режиме.

Цель. Разработка метода измерения обобщенного контраста многоэлементных изображений со сложной структурой по их гистограмме на основе измерения среднего значения контраста всех элементов изображения для различных определений ядра контраста.

Метод. Анализ известных подходов к измерению контраста элементов изображения и известных методов количественной оценки обобщенного контраста сложных изображений, а также результатов экспериментальных исследований для ряда сложных реальных и тестовых изображений позволил выявить существующие закономерности (соответствие требованиям к определению контраста, характер изменений контраста при линейных преобразованиях шкалы яркости), которые проявляются в зависимости от использования различных определений ядер контраста и метрик обобщенного контраста изображений.

Результаты. Предложен новый метод измерения обобщенного контраста без эталона для сложных изображений. Предложена метрика измерения обобщенного контраста сложных изображений по их гистограмме на основе усредненного контраста для всех отдельных пар элементов изображения для различных определений ядра контраста.

Выводы. Предложенная новая метрика контраста позволяет обеспечить точную количественную оценку обобщенного контраста сложных реальных изображений и оценить воспринимаемое качество изображений при проведении субъективных экспертных оценок.

Ключевые слова: обработка изображений, оценка качества изображения, измерение контраста, метрика без эталона, обобщенный контраст, сложное изображение, гистограмма.

REFERENCES

1. Wang Z., Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity, *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, Vol. 13, No. 4, pp. 600–612. DOI: 10.1109/TIP.2003.819861.
2. Wang Z., Bovik A. C., Lu L. Why is image quality assessment so difficult?, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Orlando, FL, USA, May 2002*, Vol. 4, pp. 3313–3316. DOI: 10.1109/ICASSP.2002.1004620.
3. Wang Z., Bovik A. A universal image quality index, *Signal Processing Letters*, 2002, Vol. 9, No. 3, pp. 81–84. DOI: 10.1109/97.995823.
4. Wang Z., Bovik A. C. Modern Image Quality Assessment. San Rafael, CA, USA, Morgan & Claypool, 2006, 160 p. DOI: 10.2200/S00010ED1V01Y200508IVM003.
5. Shahid M., Rossholm A., Lö vström B., Zepernick H.-J. No-reference image and video quality assessment: a classification and review of recent approaches, *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2014, No. 1, pp. 1–32. DOI: 10.1186/1687-5281-2014-40.
6. Nesteruk V. F., Porfireva N. N. Kontrastnyiy zakon vospriyatiya sveta, *Optika i spektroskopiya*, 1970, Vol. XXIX, vyp. 6, pp. 1138–1143.
7. Peli E. Contrast in Complex Images, *Journal of the Optical Society of America A*, October 1990, Vol. 7, No. 10, pp. 2032–2040. DOI: 10.1364/JOSAA.7.002032.
8. Vorobel' R. Logaryfmichna obrobka zobrazhen'. Kiev, Naukova dumka, 2012, 231 p.
9. Vorobel R., Berehulyak O. Image contrast and its connection with fuzzy logic, *Proceedings of II International Workshop on Inductive Modeling (IWIM), Prague, Czech Republic*, 2007, pp. 104–110. ISBN 978-80-01-03881-9.
10. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing, 2nd Edition. NY, Prentice Hall, 2002, 976 p. ISBN13: 978-0201180756, ISBN10: 0201180758.
11. Pratt W.K. Digital Image Processing. New York, Chichester, John Wiley & Sons, second edition, 1993, 720 p. DOI: 10.1002/0471221325.

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 001.4

Луценко И. А.¹, Фомовская Е. В.², Оксанич И. Г.³, Сердюк О. Ю.⁴

¹Д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электронных аппаратов Кременчугского национального университета им. М. Остроградского, Кременчуг, Украина

²Канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой электронных аппаратов Кременчугского национального университета им. М. Остроградского, Кременчуг, Украина

³Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информационно-управляющих систем Кременчугского национального университета им. М. Остроградского, Кременчуг, Украина

⁴Аспирант кафедры компьютерных систем и сетей ГВУЗ «Криворожский национальный университет», Кривой Рог, Украина

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ВЕРИФИКАЦИИ КРИТЕРИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ОПЕРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Актуальность. Решена актуальная задача верификации критерия для оптимизации операционных процессов с распределенными параметрами.

Цель работы – создание метода верификации оценочных критериев, обладающих высокой избирательностью и позволяющих исключить из рассмотрения те показатели, которые обеспечивают противоречивые результаты по отношению к результатам частных критериев эффективности.

Метод. Предложен метод верификации глобального критерия для оптимизации операционных процессов с распределенными параметрами продуктовых потоков, который основан на формировании классов эталонных операций, идентифицированных с использованием частных критериев эффективности, которые, в свою очередь, основаны на использовании выявленных особенностей вторых интегральных параметров от интегральных функций входа и выхода глобальной модели операции, адекватность которых математически доказана, обеспечивая тем самым отбор показателя, оценочные особенности которого позволяют согласовать результаты операционной деятельности управляемых систем с целью их владельца за счет выхода в режим управления соответствующего максимуму эффективности использования ресурсов.

Результаты. Разработан алгоритм реализации метода верификации оценочных показателей, который был использован при проведении вычислительных экспериментов связанных с иллюстрацией возможностей предложенного метода.

Выводы. Впервые разработано три класса эталонных моделей операций с распределенными параметрами, каждая из которых идентифицирована с использованием частного критерия эффективности.

Разработка предложенного метода позволяет осуществлять обоснованный выбор единого показателя для использования в качестве глобального критерия оптимизации операционных процессов с распределенными параметрами любых систем, процессы которых этого требуют. Возможность выбора адекватного критерия оптимизации обеспечит повышение темпов развития производственных структур.

Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного метода, реализованного в виде алгоритма, что позволяет рекомендовать его специалистам – практикам для отбора оценочного критерия из множества показателей, которые предлагаются исследователями в качестве критерия оптимизации операционных процессов с распределенными параметрами. Показатель, который успешно прошел верификацию, обеспечивает возможность согласования параметров операционного процесса с целью владельца (суперсистемы). При этом, предполагается, что целью суперсистемы является максимизация собственных возможностей, прямо связанных с эффективностью использования доступных ресурсов.

Ключевые слова: критерий оптимизации, верификация показателей, эталонная модель операции, операции с распределенными параметрами, оценка эффективности операций.

НОМЕНКЛАТУРА

ТО – время операции;

ЧКЭ – частный критерий эффективности;

r_i – вид модели i - входного продуктового потока;

$rq_i(t)$ – количественный параметр модели i - входного продуктового потока;

i – количество входных продуктов операции;

rs – экспертная (стоимостная) оценка единицы количественного параметра $rq_i(t)$;

$re_i(t)$ – текущее значение экспертной (стоимостной) оценки модели потока $rq_i(t)$;

$re(t)$ – глобальная функция входа;

t_{sr} – момент начала подачи первого входного продуктового потока;

t_{fr} – момент завершения выдачи последнего входного продуктового потока;

IRE – параметр интегральной оценки глобальной функции входа $re(t)$;

VRE – параметр интегральной оценки от интегральной функции входа $ire(t)$;

p_j – вид модели j - выходного продуктового потока;

$pq_j(t)$ – количественный параметр модели j -выходного продуктового потока;

j – количество выходных продуктов операции;

ps – экспертная (стоимостная) оценка единицы количественного параметра $pq_j(t)$;

$pe_j(t)$ – текущее значение экспертной (стоимостной) оценки модели потока $pq_j(t)$;

$pe(t)$ – глобальная функция выхода;

t_{sp} – момент начала подачи первого выходного продуктового потока;

t_{fp} – момент завершения выдачи последнего выходного продуктового потока;

IPE – параметр интегральной оценки глобальной функции выхода $pe(t)$;

VPE – параметр интегральной оценки от интегральной функции выхода $ipe(t)$;

$se(t)$ – текущие запасы ценностей для проведения операций;

SE_0 – начальный объем запасов ценностей;

Ψ – модель операции с распределенными параметрами во времени функций $re(t)$ и $pe(t)$;

Θ – модель простой операции с единичной продолжительностью во времени;

RL – абсолютный оценочный показатель;

EL – относительный оценочный показатель;

k – коэффициент добавленной ценности;

t_a – момент времени операции, который определяется из равенства $vre(t) = vpe(t)$;

$vre(t)$ – вторая интегральная функция от функции входа $re(t)$;

$vpe(t)$ – вторая интегральная функция от функции выхода $pe(t)$.

ВВЕДЕНИЕ

Для того чтобы результаты функционирования управляемой системы были максимально согласованы с целью ее владельца (суперсистемы), необходимо оптимизировать процессы управления. В настоящее время функция оптимизации крайне редко автоматизируется и связано это с тем, что в качестве критерия оптимизации используются показатели, возможности которых, как указателей на самое эффективное управление, системно не обосновываются.

Например, широко используется попытка оптимизации по критерию минимума затрат. Однако использование показателя «затраты» в качестве критерия оптимизации, не позволяет максимизировать возможности управления. Если, к примеру, рентабельность операционного процесса составляет 10%, а, повышение затрат на 1%, повышает производительность в два раза и снижает добавленную ценность на 1%, то в рамках ранее необходимого интервала времени можно провести две системные операции. При этом каждая такая операция, проведенная с добавленной ценностью 9%, практически ее удвоит за время прошлого операционного процесса.

Таким образом, для решения задачи оптимального управления среди множества показателей, которые определяются исследователями как показатели эффективности или критерии оптимизации, необходимо отобрать именно тот показатель, который позволит максимально точно согласовать результаты процессуальной деятельности управляемой системы с целью суперсистемы.

Для решения этой задачи можно воспользоваться методом верификации, основанным на использовании формальных признаков (первый этап верификации) [1] и создании классов эталонных идентифицированных моделей операций, эффективность которых предварительно определена с использованием ЧКЭ (второй этап верификации) [2].

Частными критериями эффективности в работе определены показатели, каждый из которых обеспечивает возможность рейтинговой оценки эффективности моделей эталонных операций в рамках специально созданного класса таких операций.

Тот верифицируемый показатель, который успешно прошел все множество тестовых заданий на непротиворечивость, с высокой долей вероятности может использоваться в системах автоматического управления в качестве критерия оптимизации.

В настоящее время частные показатели и классы эталонных моделей тестовых операций разработаны для верификации оценочных показателей простых моделей операций [2].

Поскольку реальные процессы имеют распределенные во времени параметры потоков ресурсопотребления и ресурсоотдачи, необходимо разработать ЧКЭ для создания классов эталонных моделей операций, которые позволяют учитывать влияние характера распределенных параметров исследуемых моделей операции на эффективность их операционных процессов.

Использование классов идентифицированных относительно рейтинговой эффективности тестовых операций, обеспечит возможность верификации оценочных показателей с целью выбора лучшего объекта для использования в качестве критерия оптимизации.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для достижения цели необходимо следующее:

1. Доказать, что из двух синхронизированных операций с распределенными параметрами вида

$$\Psi_1 = [re_1(t), pe_1(t)] \quad \text{и} \quad \Psi_2 = [re_2(t), pe_2(t)], \quad \text{где}$$

$$\int_{t_{sr}}^{t_{fr}} re_1(t) dt = \int_{t_{sr}}^{t_{fr}} re_2(t) dt, \quad \int_{t_{sr}}^{t_{fr}} \left(\int_{t_{sr}}^t re_1(t) dt \right) dt \neq \int_{t_{sr}}^{t_{fr}} \left(\int_{t_{sr}}^t re_2(t) dt \right) dt$$

и $pe_1(t) = pe_2(t)$, эффективней будет операция с меньшим значением параметра второй интегральной характеристики функции $re(t)$.

2. Доказать, что из двух синхронизированных операций с распределенными параметрами вида

$$\Psi_1 = [re_1(t), pe_1(t)] \quad \text{и} \quad \Psi_2 = [re_2(t), pe_2(t)],$$

где $re_1(t) = re_2(t)$, $\int_{t_{sp}}^{t_{fp}} pe_1(t) dt = \int_{t_{sp}}^{t_{fp}} pe_2(t) dt$,

$$\int_{t_{sp}}^{t_{fp}} \left(\int_{t_{sp}}^t pe_1(t) dt \right) dt \neq \int_{t_{sp}}^{t_{fp}} \left(\int_{t_{sp}}^t pe_2(t) dt \right) dt$$

будет операция с большим значением параметра второй интегральной характеристики функции $pe(t)$.

3. Разработать метод формирования классов эталонных синхронизированных операций для верификации показателей, которые предлагаются для отбора критерия оптимизации.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В работе [1] установлено, что формальными признаками показателя для оценки эффективности глобальной модели операции с распределенными параметрами является двойка $(re(t), pe(t))$, а для глобальных моделей простых операций – тройка (IRE, TO, IPE) , где

$$IRE = \int_{t_{sr}}^{t_{fr}} re(t) dt; \quad TO = t_{fr} - t_{sr}; \quad IPE = \int_{t_{sp}}^{t_{fp}} pe(t) dt.$$

Так, если каждому потоку количественной оценки значимой входной продукции $rq_i(t)$ и выходной про-

дукции $pq_j(t)$ поставить в соответствие его эксперт-

ную (стоимостную) оценку rs_i и ps_j , то множество сопоставимых функций входа и выхода можно представить в виде глобальных функций входа $re(t)$, выхода

$$pe(t). \quad \text{При этом,} \quad re_i(t) = rs_i \cdot rq_i(t) \quad \text{и}$$

$$pe_j(t) = ps_j \cdot pq_j(t) \quad (\text{рис. 1}).$$

Кроме того, установлено [2], что критерий оптимизации должен обладать чувствительностью к форме распределения функции входа и функции выхода. Высказана гипотеза, что такую чувствительность обеспечивает использование второго интегрального параметра от ин-

тегральной функции входа $\int_{t_{sr}}^{t_{fr}} \left(\int_{t_{sr}}^t re(t) dt \right) dt$ и интеграль-

ной функции выхода $\int_{t_{sp}}^{t_{fp}} \left(\int_{t_{sp}}^t pe(t) dt \right) dt$.

Все системные операции в действительности имеют распределенные во времени потоки входных и выходных продуктов. Приведение модели операции вида $(re(t); pe(t))$ к виду (IRE, TO, IPE) повышает погрешность в определении параметров оптимального управления. Поэтому существует потребность в создании метода верификации, чувствительного к характеру глобальных функций входа и выхода и создания классов эталонных моделей операций с распределенными параметрами.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для доказательства возможности использования второго интегрального параметра функций $re(t)$ и $pe(t)$ в качестве указателей на эффективность исследуемых операций, был разработан метод непрямої оценки эффективности использования доступных ресурсов.

Суть метода состоит в том, что доступные ценности (ресурсы) $se_1(t)$ и $se_2(t)$, одинаковые на начальном этапе ($se_1(t_0) = se_2(t_0)$), по мере необходимости, передаются в системы, которые формируют модели синхронизированных операций вида Ψ_1 и Ψ_2 . При этом,

$$IRE_1(\Psi_1) = IRE_2(\Psi_2), \quad VRE_1(\Psi_1) \neq VRE_2(\Psi_2), \quad \text{а}$$

$$pe_1(t) = pe_2(t), \quad \text{где} \quad VRE_1(\Psi_1) = \int_{t_{sr}}^{t_{fr}} \left(\int_{t_{sr}}^t re_{1(\Psi_1)}(t) dt \right) dt,$$

$$VRE_2(\Psi_2) = \int_{t_{sr}}^{t_{fr}} \left(\int_{t_{sr}}^t re_{2(\Psi_2)}(t) dt \right) dt.$$

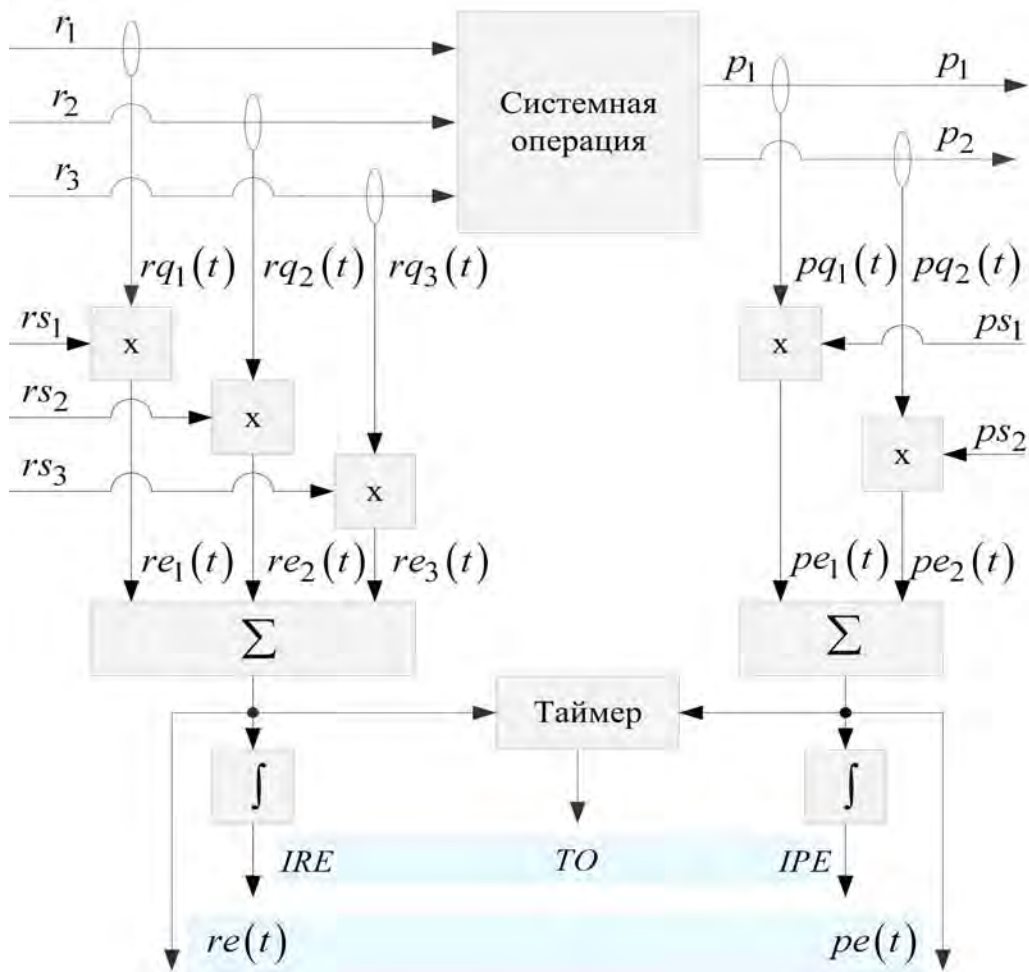


Рисунок 1 – Принцип формирования глобальной модели операции

Принципы реализации метода рассмотрим для случая формирования двух импульсных функций входа $re_{\Psi_1}[n]$ и $re_{\Psi_2}[n]$ операций Ψ_1 и Ψ_2 соответствующими системами.

Остаток доступных ценностей используются системами, которые формируют модели простых равноэффективных операций $\Theta_{1.1}$, $\Theta_{1.2}$ и $\Theta_{2.1}$, $\Theta_{2.2}$ единичной продолжительности. Результаты операций вида Θ_1 доступны системам, которые формируют операции вида Ψ и Θ_2 , при этом системы формирующие операции вида Ψ имеют приоритет в использовании доступных ценностей, а системы формирующие операции вида Θ_2 используют их остаток.

Условие $pe_1[n] = pe_2[n]$ означает, что вид функций $re_1[n]$ и $re_2[n]$, моделей операций вида Ψ_1 и Ψ_2 , не влияет на результат этих операций. Поэтому только результаты операций вида Θ_1 и Θ_2 оказывают влияние на эффективность использования ресурсов $se[n]$.

По отношению к моделям операций с распределенными параметрами понятие «синхронизированные опе-

рации» означает, что все ненулевые значения функций $re_1[n] > 0$ и $re_2[n] > 0$ находятся в рамках интервала времени $[n_{sr}, n_{fr}]$, а все ненулевые значения функций $pe_1[n] > 0$ и $pe_2[n] > 0$ находятся в рамках интервала времени $[n_{sp}, n_{fp}]$ (рис. 2).

Принцип формирования результата от использования доступных ресурсов рассмотрим на примере реализации двух сценариев развития событий (рис. 3).

Функция $se[n]$ отображает объем доступных ценностей в определенный момент времени. В начальный момент времени величина доступных ценностей $SE_0 = 3$ ед.

В момент n_1 для проведения операции Ψ_1 необходимо получение ценностей в размере 1 ед.

Поскольку потребление запасов величиной $RE_{\Psi_{1.1}} = 1$ ед. обеспечивает на момент n_1 остаток средств в размере 2 ед., появляется возможность сформировать простую операцию $\Theta_{1.1}$ с коэффициентом добавленной ценности $k = 1,5$ и единичной продолжительностью во времени.

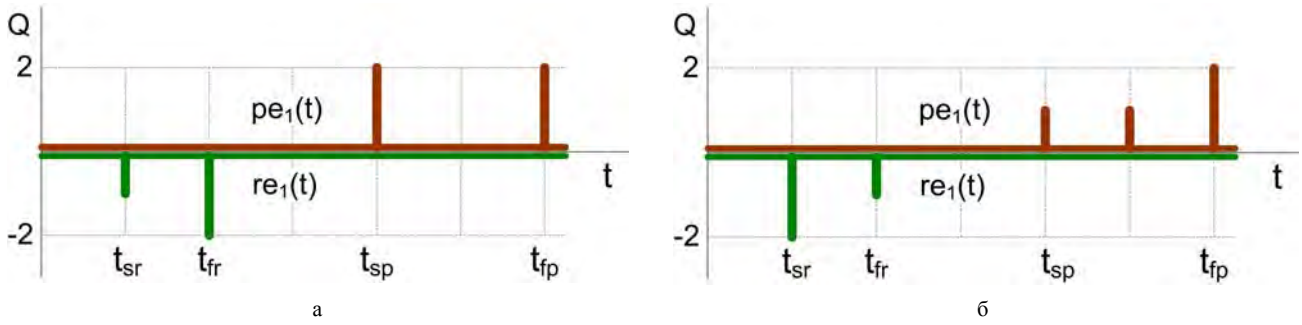


Рисунок 2 – Пример синхронизированных операций а) и б) с распределенными параметрами

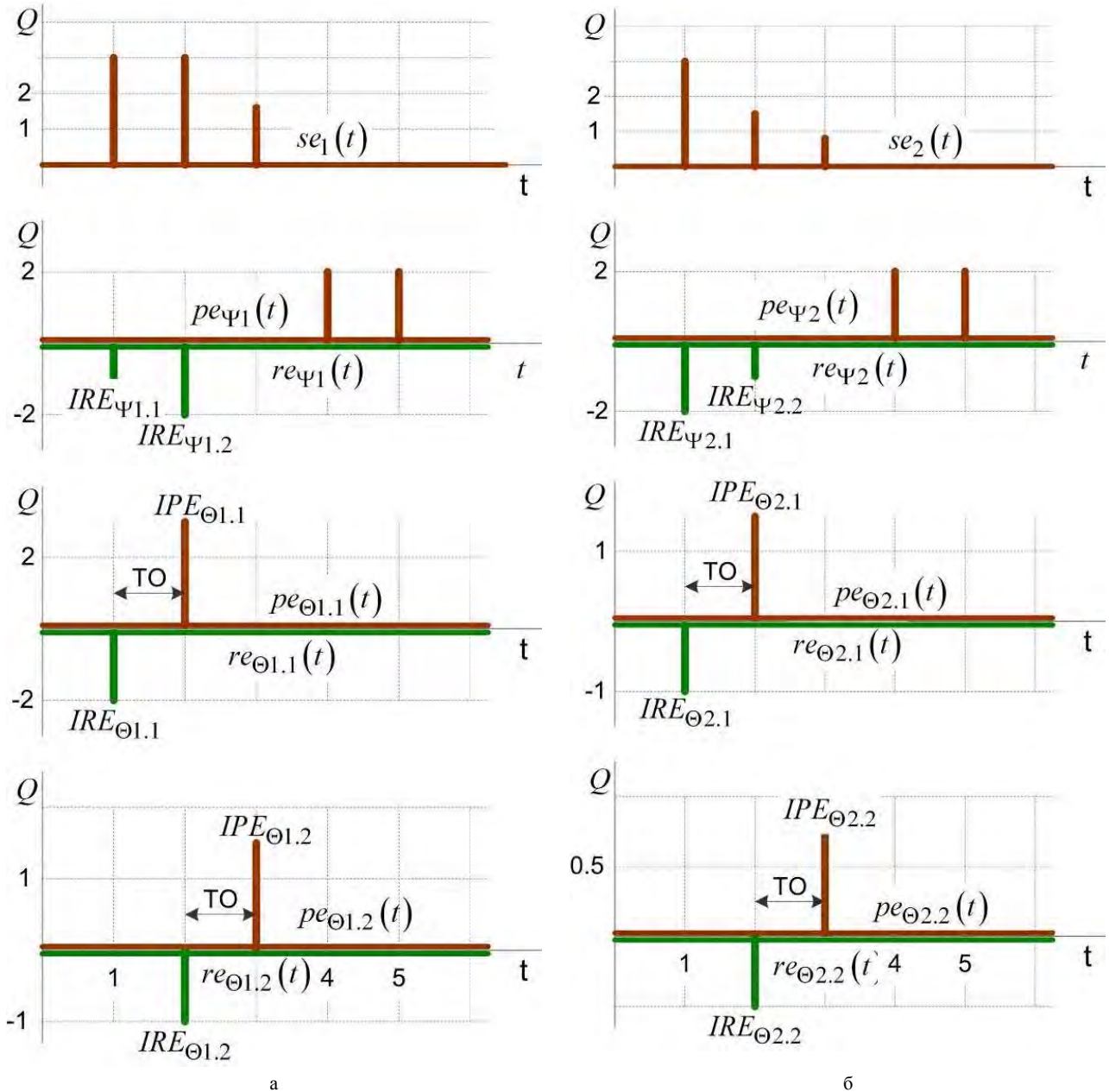


Рисунок 3 – Пример определения эффективности использования ресурсов при характере функции входа операций вида Ψ :
 а – нарастающем; и б – спадающем

В таком случае, на момент n_2 на выходе операции $\Theta_{1.1}$ формируется выходной продукт операции, ценность которого равна величине $PE_{\Theta_{1.1}} = k \cdot RE_{\Theta_{1.1}} = 1,5 \cdot 2 = 3$ ед.

Таким образом, на момент n_2 становится доступным объем ценностей 3 ед.

При этом часть этой ценности, в эквиваленте, составляющем 1 ед., передается операции Ψ_1 ($RE_{\Psi_{1.2}}=2$). Оставшаяся часть, в размере 1 ед., используется для проведения дополнительной операции $\Theta_{1.2}$.

В результате проведения операции $\Theta_{1.2}$ с $k=1,5$ и $TO=1$, формируется результат $PE_{\Theta_{1.2}} = k \cdot RE_{\Theta_{1.2}} = 1,5 \cdot 1 = 1,5$ ед.

Следовательно, использование текущих запасов, которые остаются после формирования операции Ψ_1 по сценарию (рис. 3а), обеспечило получение ценности в размере 1,5 ед. от проведения простых операций $\Theta_{1.1}$ и $\Theta_{1.2}$.

Аналогичные расчеты, проведенные по сценарию (рис. 3б) с $k=1,5$, когда $IRE_{\Psi_{2.1}}=2$ ед., $IRE_{\Psi_{2.2}} = 1$ ед. показывают, что $IPE_{\Theta_{2.2}} = (IRE_{\Psi_{2.2}} \cdot k - IRE_{\Psi_{2.2}}) \cdot k = 0,75$. Таким образом, развитие событий по варианту (рис. 5а) выгодней для суперсистемы. То есть, характер распределения во времени функции $re_{\Psi}[n]$ влияет на эффективность использования доступных ресурсов $se[n]$.

Покажем, что это справедливо в общем случае, а также то, что второй интегральный параметр от интегральной функции $re[n]$ является указателем на более выгодный вариант развития событий.

Определим показатель второго интегрального параметра от интегральной функции $re[n]$ символами VRE , а показатель второго интегрального параметра от интегральной функции $pe(t)$ символами VPE . Тогда

$$VRE = \int_{t_{sr}}^{t_{fr}} \left(\int_{t_{sr}}^t re(t) dt \right) = \sum_{n_{sr}}^{n_{fr}} \sum_{n_{sr}}^n re[n]; \quad (1)$$

$$VPE = \int_{t_{sp}}^{t_{fp}} \left(\int_{t_{sp}}^t pe(t) dt \right) = \sum_{n_{sp}}^{n_{fp}} \sum_{n_{sp}}^n pe[n]. \quad (2)$$

Теорема 1. Из двух синхронизированных операций с распределенными параметрами $\Psi_1 = (re_1[n], pe_1[n])$ и $\Psi_2 = (re_2[n], pe_2[n])$, где $IRE_1 = IRE_2$, $VRE_1 \neq VRE_2$ и $pe_1[n] = pe_2[n]$, эффективней будет операция с меньшим значением параметра второй интегральной характеристики функции $re[n]$.

Доказательство 1. Учитывая, что $SE_1 = IRE_{\Psi_{1.1}} + IRE_{\Theta_{1.1}}$, $IRE_{\Theta_{1.1}} = SE_1 - IRE_{\Psi_{1.1}}$, тог-

да $IPE_{\Theta_{1.1}} = k \cdot IRE_{\Theta_{1.1}}$, $IPE_{\Theta_{1.2}} = k \cdot IRE_{\Theta_{1.2}} = k(IPE_{\Theta_{1.1}} - IRE_{\Psi_{1.2}}) = k(k \cdot IRE_{\Theta_{1.1}} - IRE_{\Psi_{1.2}}) = k(k \cdot IRE_{\Psi_{1.2}} - IRE_{\Psi_{1.2}})$.

Если $k=1,5$, $IRE_{\Psi_{1.1}} = x$, $IRE_{\Psi_{1.2}} = 2x$, $(IRE_{\Psi_{1.1}} + IRE_{\Psi_{1.2}}) = IRE_{\Psi_1} = 3x$, $IPE_{\Theta_{1.2}} = 2,25 \cdot 2x - 1,5 \cdot 2x = 1,5x$.

Если $k=1,5$, $IRE_{\Psi_{2.1}} = 2x$, $IRE_{\Psi_{2.2}} = x$, $(IRE_{\Psi_{2.1}} + IRE_{\Psi_{2.2}}) = IRE_{\Psi_2} = 3x$, $IPE_{\Theta_{2.2}} = 2,25x - 1,5x = 0,75x$.

Таким образом, $IRE_{\Psi_{1.1}} < IRE_{\Psi_{2.1}}$, $IPE_{\Theta_{1.2}} > IPE_{\Theta_{2.2}}$.

Анализируя закономерности в изменении внутренней структуры выражения $IPE_{\Theta_{1.i}}$ (табл. 1 столбец 3), можно записать общее выражение для количества продуктов импульсной функции SE_N движения запасов инвестиций на момент N

$$SE_N = k^N \cdot IRE_{\Psi_{1.2}} + k^N \cdot IRE_{\Psi_{1.3}} + \dots + k^N \cdot IRE_{\Psi_{1.i}} - k^{N-1} \cdot IRE_{\Psi_{1.2}} - k^{N-2} \cdot IRE_{\Psi_{1.3}} - \dots - k^{N-i} \cdot IRE_{\Psi_{1.i}} = \sum_{i=1}^N k^N \cdot IRE_{\Psi_{1,i+1}} - \sum_{i=1}^N k^{N-i} \cdot IRE_{\Psi_{1,i+1}},$$

где $N = n_{fr} - n_{sr}$, i – порядковый номер интервала дискретизации ($i_1 = n_{fr}$, $i \in [n_{fr}; n_{sr}]$).

На основании выявления закономерности в изменении внутренней структуры выражения $VRE_{\Psi_{1.i}}$ (табл. 2 столбец 3), можно записать общее выражение для второго интегрального параметра на момент N .

Общее выражение для определения интегрального параметра от интегральной функции $IRE_{\Psi_{1.i}}$ будет иметь вид:

$$VRE_N = N \cdot IRE_{\Psi_{1.1}} + (N-1) \cdot IRE_{\Psi_{1.2}} + (N-2) \cdot IRE_{\Psi_{1.3}} + \dots + IRE_{\Psi_{1.i}} = \sum_{i=1}^N IRE_{\Psi_{1.i}} \cdot (N-i+1).$$

Рассмотрим пример расчета данного показателя для двух выше приведенных случаев доказательства:

1. Если $IRE_{\Psi_{1.1}} = x$, $IRE_{\Psi_{1.2}} = 2x$, $VRE_N = N \cdot IRE_{\Psi_{1.1}} + (N-1) \cdot IRE_{\Psi_{1.2}} = 2 \cdot x + 2x = 4x$

2. Если $IRE_{\Psi_{2.1}} = 2x$, $IRE_{\Psi_{2.2}} = x$, $VRE_N = N \cdot IRE_{\Psi_{2.1}} + (N-1) \cdot IRE_{\Psi_{2.2}} = 2 \cdot 2x + x = 5x$.

Следовательно, $IRE_{\Psi_{1.1}} < IRE_{\Psi_{2.1}}$, $IPE_{\Theta_{1.2}} > IPE_{\Theta_{2.2}}$, $VRE_N < VRE_N$.

Таблица 1 – Изменение выражений для параметров $IRE_{\Theta_{1,i}}$ и $IPE_{\Theta_{1,i}}$ простых операций $\Theta_{1,i}$ в зависимости от величины потребления ресурсов $IRE_{\Psi_{1,i}}$ операции Ψ_1 для $I = 5$

$IRE_{\Psi_{1,i}}$	Изменение выражения для параметра $IRE_{\Theta_{1,i}}$ простых операций $\Theta_{1,i}$ в зависимости от величины $IRE_{\Psi_{1,i}}$ операции Ψ_1
1	2
$IRE_{\Psi_{1,1}}$	$SE - IRE_{\Psi_{1,1}} = IRE_{\Theta_{1,1}}$
$IRE_{\Psi_{1,2}}$	$(SE - IRE_{\Psi_{1,1}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,2}} = IRE_{\Theta_{1,2}}$
$IRE_{\Psi_{1,3}}$	$((SE - IRE_{\Psi_{1,1}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,2}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,3}} = IRE_{\Theta_{1,3}}$
$IRE_{\Psi_{1,4}}$	$((((SE - IRE_{\Psi_{1,1}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,2}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,3}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,4}} = IRE_{\Theta_{1,4}}$
$IRE_{\Psi_{1,5}}$	$(((((SE - IRE_{\Psi_{1,1}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,2}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,3}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,4}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,5}} = IRE_{\Theta_{1,5}}$
1	3
$IRE_{\Psi_{1,1}}$	$(SE - IRE_{\Psi_{1,1}}) \cdot k = IPE_{\Theta_{1,1}}$
$IRE_{\Psi_{1,2}}$	$((SE - IRE_{\Psi_{1,1}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,2}}) \cdot k = IPE_{\Theta_{1,2}}$
$IRE_{\Psi_{1,3}}$	$((((SE - IRE_{\Psi_{1,1}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,2}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,3}}) \cdot k = IPE_{\Theta_{1,3}}$
$IRE_{\Psi_{1,4}}$	$(((((SE - IRE_{\Psi_{1,1}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,2}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,3}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,4}}) \cdot k = IPE_{\Theta_{1,4}}$
$IRE_{\Psi_{1,5}}$	$((((((SE - IRE_{\Psi_{1,1}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,2}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,3}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,4}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,5}}) \cdot k = IPE_{\Theta_{1,5}}$

Таблица 2 – Изменение выражения определения первой и второй интегральных характеристик по функции входа операции Ψ_1 для $I = 5$

$IRE_{\Psi_{1,i}}$	Изменение выражения для интегрального значения ряда $IRE_{\Psi_{1,i}}$ операции Ψ_1
1	2
$IRE_{\Psi_{1,1}}$	$IRE_{\Psi_{1,1}}$
$IRE_{\Psi_{1,2}}$	$IRE_{\Psi_{1,1}} + IRE_{\Psi_{1,2}}$
$IRE_{\Psi_{1,3}}$	$IRE_{\Psi_{1,1}} + IRE_{\Psi_{1,2}} + IRE_{\Psi_{1,3}}$
$IRE_{\Psi_{1,4}}$	$IRE_{\Psi_{1,1}} + IRE_{\Psi_{1,2}} + IRE_{\Psi_{1,3}} + IRE_{\Psi_{1,4}}$
$IRE_{\Psi_{1,5}}$	$IRE_{\Psi_{1,1}} + IRE_{\Psi_{1,2}} + IRE_{\Psi_{1,3}} + IRE_{\Psi_{1,4}} + IRE_{\Psi_{1,5}}$
1	3
$IRE_{\Psi_{1,1}}$	$IRE_{\Psi_{1,1}}$
$IRE_{\Psi_{1,2}}$	$2 IRE_{\Psi_{1,1}} + IRE_{\Psi_{1,2}}$
$IRE_{\Psi_{1,3}}$	$3 IRE_{\Psi_{1,1}} + 2 IRE_{\Psi_{1,2}} + IRE_{\Psi_{1,3}}$
$IRE_{\Psi_{1,4}}$	$4 IRE_{\Psi_{1,1}} + 3 IRE_{\Psi_{1,2}} + 2 IRE_{\Psi_{1,3}} + IRE_{\Psi_{1,4}}$
$IRE_{\Psi_{1,5}}$	$5 IRE_{\Psi_{1,1}} + 4 IRE_{\Psi_{1,2}} + 3 IRE_{\Psi_{1,3}} + 2 IRE_{\Psi_{1,4}} + IRE_{\Psi_{1,5}}$
$IRE_{\Psi_{1,5}}$	$5 IRE_{\Psi_{1,1}} + 4 IRE_{\Psi_{1,2}} + 3 IRE_{\Psi_{1,3}} + 2 IRE_{\Psi_{1,4}} + IRE_{\Psi_{1,5}}$

Поскольку тенденция увеличения последующего значения вложения ценности по отношению к предшествующему вложению в операцию Ψ приводит к увеличению показателя $IPE_{\Theta_{1,N}}$ и к снижению VRE_N , то минимальное значение второго интегрального параметра от интегральной функции $re[n]$ является указателем на лучшую операцию. Теорема доказана.

Теорема 2. Из двух синхронизированных операций с распределенными параметрами $\Psi_1 = (re_1[n], pe_1[n])$ и $\Psi_2 = (re_2[n], pe_2[n])$, где $re_1[n] = re_2[n]$,

$IPE_1 = IPE_2$, $VPE_1 \neq VPE_2$, эффективней будет операция с большим значением параметра второй интегральной характеристики функции $pe[n]$.

Доказательство 2. Учитывая, что с каждым этапом получения выходной продукции мы получаем дополнительную возможность вложить высвободившиеся ресурсы в качестве добавленной ценности в параллельные операции. Тогда $IPE_{\Psi_{1,1}}$ является входной продукцией $IRE_{\Theta_{1,1}}$, а полученный выходной продукт будет равен $IPE_{\Theta_{1,1}} = k \cdot IRE_{\Theta_{1,1}} = k \cdot IPE_{\Psi_{1,1}}$. В свою очередь, если

имеется второй импульс $IPE_{\Psi_{1,2}}$ операции Ψ , он может быть использован при формировании ресурсов второй параллельной операции Θ , входная продукция которой равна $IRE_{\Theta_{1,2}} = k \cdot IRE_{\Theta_{1,1}} + IPE_{\Psi_{1,2}} = k \cdot IPE_{\Psi_{1,1}} + IPE_{\Psi_{1,2}}$.

Рассмотрим случай, когда $k=1,5$, $IPE_{\Psi_{1,1}} = x$, $IPE_{\Psi_{1,2}} = 2x$, тогда $IPE_{\Theta_{1,2}} = 1,5 \cdot x + 2x = 3,5x$.

Если $k = 1,5$, $IPE_{\Psi_{2,1}} = 2x$, $IPE_{\Psi_{2,2}} = x$, $IPE_{\Theta_{2,2}} = 3x + 1,5x = 4,5x$.

Следовательно, $IPE_{\Psi_{1,1}} < IPE_{\Psi_{2,1}}$, $IPE_{\Theta_{1,2}} < IPE_{\Theta_{2,2}}$.

Анализируя закономерности в изменении внутренней структуры выражения $IPE_{\Theta_{1,i}}$ от изменения интервала дискретизации (табл. 3 столбец 3), можно записать общее выражение для количества продуктов импульсной функции SE_N движения запасов инвестиций на момент N

$$SE_N = IPE_{\Psi_{1,1}} \cdot k^N + IPE_{\Psi_{1,2}} \cdot k^{N-1} + IPE_{\Psi_{1,3}} \cdot k^{N-2} + \dots + IPE_{\Psi_{1,N}} \cdot k = \sum_{i=1}^{i=N} IPE_{\Psi_{1,i}} \cdot k^{N-i+1},$$

где $N = n_{fp} - n_{sp}$, i – порядковый номер интервала дискретизации ($i_1 = n_{fp}, i \in [n_{fp}; n_{sp}]$).

На основании выявления закономерности в изменении внутренней структуры выражения $VPE_{\Psi_{1,i}}$ (табл. 4 столбец 3), можно записать общее выражение для второго интегрального параметра на момент N

$$VPE_N = N \cdot IPE_{\Psi_{1,1}} + (N-1) \cdot IPE_{\Psi_{1,2}} + (N-2) \cdot IPE_{\Psi_{1,3}} + \dots + IPE_{\Psi_{1,i}} = \sum_{i=1}^N IPE_{\Psi_{1,i}} \cdot (N-i+1).$$

Рассмотрим пример расчета данного показателя для двух случаев доказательства:

1. Если $IPE_{\Psi_{1,1}} = x$, $IPE_{\Psi_{1,2}} = 2x$, $VPE_N = N \cdot IPE_{\Psi_{1,1}} + (N-1) \cdot IPE_{\Psi_{1,2}} = 2 \cdot x + 2x = 4x$

2. Если $IPE_{\Psi_{2,1}} = 2x$, $IPE_{\Psi_{2,2}} = x$, $VPE_N = N \cdot IPE_{\Psi_{2,1}} + (N-1) \cdot IPE_{\Psi_{2,2}} = 2 \cdot 2x + x = 5x$.

Следовательно, $IPE_{\Psi_{1,1}} < IPE_{\Psi_{2,1}}$, $VRE_N < VRE_N$. Теорема доказана.

Формула общеизвестного показателя, определяемого как прибыль или как добавленная ценность (A) связывает вход, и выход системного процесса с использованием параметров глобальной модели простой операции IRE и $IPE - A = IPE - IRE$.

Для обеспечения чувствительности абсолютного показателя к форме функций $re(t)$ и $pe(t)$, можно попытаться чисто технически обеспечить возможность определения второго интегрального параметра от этих функций для показателя определенного как VA . Для этого обеспечим чувствительность данного показателя путем сопоставления входа и выхода исследуемой глобальной модели операции с использованием ЧКЭ (1) и (2). Тогда

$$VA = VPE - VRE. \tag{3}$$

Определим относительный частный критерий VK – как отношение частного критерия VA к частному критерию VRE :

$$VK = \frac{VA}{VRE}. \tag{4}$$

Адекватность полученных ЧКЭ проверим для случая – оценки равноэффективных моделей операций. Концеп-

Таблица 3 – Изменение выражений для параметров $IRE_{\Theta_{1,i}}$ и $IPE_{\Theta_{1,i}}$ простых операций $\Theta_{1,i}$ в зависимости от величины поступления ресурсов $IPE_{\Psi_{1,i}}$ операции Ψ_1 для $I = 5$

$IPE_{\Psi_{1,i}}$	Изменение выражения для параметра $IRE_{\Theta_{1,i}}$ простых операций $\Theta_{1,i}$ в зависимости от величины $IPE_{\Psi_{1,i}}$ операции Ψ_1	
1	2	
$IPE_{\Psi_{1,1}}$	$IPE_{\Psi_{1,1}}$	
$IPE_{\Psi_{1,2}}$	$IPE_{\Psi_{1,1}} \cdot k + IPE_{\Psi_{1,2}}$	
$IPE_{\Psi_{1,3}}$	$(IPE_{\Psi_{1,1}} \cdot k + IPE_{\Psi_{1,2}}) \cdot k + IPE_{\Psi_{1,3}}$	
$IPE_{\Psi_{1,4}}$	$((IPE_{\Psi_{1,1}} \cdot k + IPE_{\Psi_{1,2}}) \cdot k + IPE_{\Psi_{1,3}}) \cdot k + IPE_{\Psi_{1,4}}$	
$IPE_{\Psi_{1,5}}$	$((((IPE_{\Psi_{1,1}} \cdot k + IPE_{\Psi_{1,2}}) \cdot k + IPE_{\Psi_{1,3}}) \cdot k + IPE_{\Psi_{1,4}}) \cdot k + IPE_{\Psi_{1,5}}$	
1	3	
$IPE_{\Psi_{1,1}}$	$IPE_{\Psi_{1,1}} \cdot k$	
$IPE_{\Psi_{1,2}}$	$(IPE_{\Psi_{1,1}} \cdot k + IPE_{\Psi_{1,2}}) \cdot k$	
$IPE_{\Psi_{1,3}}$	$((IPE_{\Psi_{1,1}} \cdot k + IPE_{\Psi_{1,2}}) \cdot k + IPE_{\Psi_{1,3}}) \cdot k$	
$IPE_{\Psi_{1,4}}$	$((((IPE_{\Psi_{1,1}} \cdot k + IPE_{\Psi_{1,2}}) \cdot k + IPE_{\Psi_{1,3}}) \cdot k + IPE_{\Psi_{1,4}}) \cdot k$	
$IPE_{\Psi_{1,5}}$	$(((((IPE_{\Psi_{1,1}} \cdot k + IPE_{\Psi_{1,2}}) \cdot k + IPE_{\Psi_{1,3}}) \cdot k + IPE_{\Psi_{1,4}}) \cdot k + IPE_{\Psi_{1,5}}) \cdot k$	

ция этого теста, основана на принципе эквивалентности операционных процессов.

Пусть имеется три синхронизированные модели глобальных операций Ψ , Θ_1 и Θ_2 , где модели операции и являются эквивалентными (рис. 4).

Если $re_{\Theta_1}[n] + re_{\Theta_2}[n] = re_{\Psi}[n]$, а $pe_{\Theta_1}[n] + pe_{\Theta_2}[n] = pe_{\Psi}[n]$, то модели операций Ψ и Θ_1 или Ψ и Θ_2 априори являются равноэффективными.

Если идентифицировать операции вида Ψ и Θ с использованием относительного ЧКЭ (2), то получим, что $VK_{\Psi} = VK_{\Theta_1} = VK_{\Theta_2} = 0,5$.

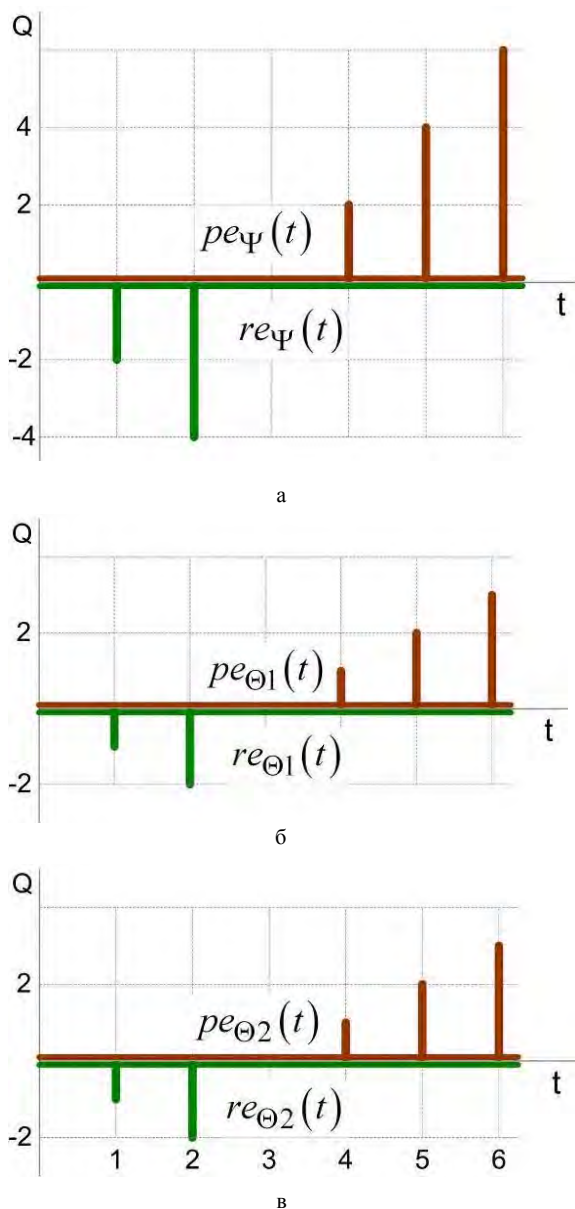


Рисунок 4 – Пример операции с распределенными параметрами $(re_{\Psi}[n], pe_{\Psi}[n])$ а) и равноэффективных синхронизированных с ней операций $(re_{\Theta_1}[n], pe_{\Theta_1}[n])$ б) и $(re_{\Theta_2}[n], pe_{\Theta_2}[n])$ в)

Однако использовать искусственно созданные показатели, которые дают смещенную оценку необходимо крайне осторожно, поскольку исследование функций входа и выхода с использованием второго интегрального параметра осуществляется в рамках интервалов синхронизации. Так, сближение интервалов синхронизации, при прочих равных условиях, априори приводит к повышению эффективности операции. При этом вес функции входа должен ослабевать, а функции выхода возрастать. Поскольку показатели V_A и V_K не обладают чувствительностью к изменению интервала $[t_{fr}; t_{sp}]$, неизвестным является вес вторых интегральных параметров.

Следовательно, показатели V_A и V_K нельзя использовать в задачах рейтинговой оценки эффективности без специального обоснования адекватности оценивания.

Экспериментально установлено, что показатель V_K можно использовать для формирования множества моделей равноэффективных операций типа $(re_1(t), pe_1(t))$ и $(re_2(t) = k \cdot re_1(t), pe_2(t) = k \cdot pe_1(t))$.

Разработаем метод создания классов эталонных моделей, рейтинговая эффективность которых будет определяться с использованием определенных ЧКЭ.

Первый класс эталонных моделей предназначен для верификации чувствительности оценочных показателей к характеру функции $re[n]$. При этом:

1) формируется две последовательности случайных вещественных положительных чисел $re_1[n]$ и $re_2[n]$ для заданного диапазона временного ряда $n \in [n_{rs}, n_{rf}]$;

2) путем масштабирования значений одного из рядов данные приводятся к виду удовлетворяющего условие $IRE_1 = IRE_2$;

3) с использованием рекуррентного выражения формируются интегральные функции $ire_1[n]$ и $ire_2[n]$.

4) с использованием рекуррентного выражения $vre[n] = vre[n-1] + ire[n]$ формируются интегральные функции и $vre_2[n]$.

5) формируется последовательность случайных вещественных положительных чисел $pe_1[n] = pe_2[n]$ для заданного диапазона временного ряда $n \in [n_{ps}, n_{pf}]$ с ограничением $n_{sp} > n_{fp}$ и $IPE > IRE$.

6) с использованием рекуррентного выражения $ipe[n] = ipe[n-1] + pe[n]$ формируются интегральные функции $ire_1[n]$ и $ire_2[n]$.

7) с использованием рекуррентного выражения $vpe[n] = vpe[n-1] + ipe[n]$ формируются интегральные функции $vpe_1[n]$ и $vpe_2[n]$.

8) по минимуму значения полученного с использованием выражения (1) осуществляется рейтинговая оценка эффективности моделей операций.

9) модели $ire_1[n]$ и $ire_2[n]$ оцениваются с использованием верифицируемого показателя.

10) осуществляется оценка непротиворечивости полученного результата, на основании которой принимается решение о необходимости дальнейшего тестирования данного показателя.

Пример формирования тестовых операций и их интегральных характеристик для верификации чувствительности оценочного показателя по входу модели операции изображен в табл. 5

Второй класс эталонных моделей предназначен для верификации чувствительности оценочных показателей к характеру функции $pe[n]$. При этом:

1) формируется последовательность случайных вещественных положительных чисел которая используется для формирования функций $re_1[n] = re_2[n]$ для заданного диапазона временного ряда $n \in [n_{rs}, n_{rf}]$;

3) с использованием рекуррентного выражения формируются интегральные функции $ire_1[n]$ и $ire_2[n]$.

4) с использованием рекуррентного выражения $vre[n] = vre[n-1] + ire[n]$ формируются интегральные функции $vre_1[n]$ и $vre_2[n]$.

5) формируется последовательность случайных вещественных положительных чисел $pe_1[n] = pe_2[n]$ для заданного диапазона временного ряда $n \in [n_{ps}, n_{pf}]$ с ограничением $n_{sp} > n_{fp}$ и $IPE > IRE$.

6) с использованием рекуррентного выражения $ipe[n] = ipe[n-1] + pe[n]$ формируются интегральные функции $ipe_1[n]$ и $ipe_2[n]$.

7) с использованием рекуррентного выражения $vpe[n] = vpe[n-1] + ipe[n]$ формируются интегральные функции $vpe_1[n]$ и $vpe_2[n]$.

8) по минимуму значения полученного с использованием выражения (2), (3), (4) осуществляется рейтинговая оценка эффективности моделей операций.

9) модели $ire_1[n]$ и $ire_2[n]$ оцениваются с использованием верифицируемого показателя.

10) осуществляется оценка непротиворечивости полученного результата, на основании которой принимается решение о необходимости дальнейшего тестирования данного показателя.

Пример формирования тестовых операций и их интегральных характеристик для верификации чувствительности оценочного показателя по выходу модели операции изображен в табл. 6.

На следующем этапе верификации оценочные показатели тестируются на моделях равноэффективных операций. Здесь нет необходимости в генерировании множества пар тестовых операций, поскольку показатели, которые успешно прошли на противоречивость предыдущие тесты, на первой тестовой паре третьего класса эталонных операций сразу проявляют возможность оценивать равноэффективные операции для которых $VRE_1 = k \cdot VRE_2$, что влечет за собой $IPE_1 = k \cdot IPE_2$.

Пример тестовых операций и их интегральных характеристик для тестирования возможностей относительного оценивания верифицируемых показателей приведен в табл. 7.

Таблица 5 – Данные эталонных моделей операций первого класса и их интегральных характеристик

n	$re_1[n]$	$ire_1[n]$	$vre_1[n]$	$pe_1[n]$	$ipe_1[n]$	$vpe_1[n]$	$re_2[n]$	$ire_2[n]$	$vre_2[n]$	$pe_2[n]$	$ipe_2[n]$	$vpe_2[n]$
0	0	0	0	0			0	0	0	0		
1	1	1	1	0			5	5	5	0		
2	2	3	4	0			4	9	14	0		
3	3	6	10	0			3	12	26	0		
4	4	10	20	0			2	14	40	0		
5	5	15	35	0			1	15	55	0		
6	0			0	0	0	0			0	0	0
7	0			3	3	3	0			3	3	3
8	0			3	6	9	0			3	6	9
9	0			3	9	18	0			3	9	18
10	0			3	12	30	0			3	12	30
11	0			3	15	45	0			3	15	45
12	0			3	18	63	0			3	18	63
13	0			3	21	84	0			3	21	84

Таблица 6 – Данные эталонных моделей операций второго класса и их интегральных характеристик

n	$re_1[n]$	$ire_1[n]$	$vre_1[n]$	$pe_1[n]$	$ipe_1[n]$	$vpe_1[n]$	$re_2[n]$	$ire_2[n]$	$vre_2[n]$	$pe_2[n]$	$ipe_2[n]$	$vpe_2[n]$
0	0	0	0	0			0	0	0	0		
1	1	1	1	0			1	1	1	0		
2	2	3	4	0			2	3	4	0		
3	3	6	10	0			3	6	10	0		
4	4	10	20	0			4	10	20	0		
5	5	15	35	0			5	15	35	0		
6	0			0	0	0	0			0	0	0
7	0			1	1	1	0			7	7	7
8	0			2	3	4	0			6	13	20
9	0			3	6	10	0			5	18	38
10	0			4	10	20	0			4	22	60
11	0			5	15	35	0			3	25	85
12	0			6	21	56	0			2	27	112
13	0			7	28	84	0			1	28	140

Таблица 7 – Данные эталонных моделей операций третьего класса и их интегральных характеристик

n	$re_1[n]$	$ire_1[n]$	$vre_1[n]$	$pe_1[n]$	$ipe_1[n]$	$vpe_1[n]$	$re_2[n]$	$ire_2[n]$	$vre_2[n]$	$pe_2[n]$	$ipe_2[n]$	$vpe_2[n]$
0	0	0	0	0			0	0	0	0		
1	1	1	1	0			2	2	2	0		
2	1	2	3	0			2	4	6	0		
3	1	3	6	0			2	6	12	0		
4	1	4	10	0			2	8	20	0		
5	1	5	15	0			2	10	30	0		
6	0			0	0	0				0	0	0
7	0			2	2	2				4	4	4
8	0			2	4	6				4	8	12
9	0			2	6	12				4	12	24
10	0			2	8	20				4	16	40
11	0			2	10	30				4	20	60
12	0			2	12	42				4	24	84
13	0			2	14	56				4	28	112

Как уже ранее было показано, для таких моделей

$$VK_1 = VK_2.$$

Далее используются классы эталонных моделей, разработанные для верификации простых операций [2].

На основании результатов верификации принимается решение о возможности использования оценочного показателя в качестве критерия оптимизации операционных процессов с распределенными во времени параметрами.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проведения тестирования осуществляется отбор показателей по наличию формальных признаков. Таким внешним признакам отвечают, например, показатели RL [3] и EL [4].

$$RL = \int_{t_0}^{t_a} \left[\int_{t_0}^t \left(\int_{t_0}^t |re(t)| dt \right) dt - \int_{t_0}^t \left(\int_{t_0}^t pe(t) dt \right) dt \right] dt. (5)$$

$$EL = \frac{\int_{t_a}^{t_d} \left(\int_{t_a}^t \left[\int_{t_0}^t pe(t) dt - \int_{t_0}^t |re(t)| dt \right] dt \right) dt}{\int_{t_0}^{t_a} \left[\int_{t_0}^t \left(\int_{t_0}^t |re(t)| dt \right) dt - \int_{t_0}^t \left(\int_{t_0}^t pe(t) dt \right) dt \right] dt}, (6)$$

где $t \in [0, t_a]$; $t_d = t_a + 1$.

С использованием предложенного метода исследовались пары моделей операций приведенных в табл. 5 – табл. 7.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты верификации показателей на четырех классах моделей эталонных операций приведены в табл. 8.

Таблица 8 – Сопоставление рейтинговых оценок эталонных моделей операций и оценок полученных с использованием верифицируемых показателей

Оценочные показатели	Классы операций		
	1	2	3
VRE_1	35		
VRE_2	55		
VPE_1		84	
VPE_2		140	
VK_1	1,4	1,4	2,73
VK_2	0,53	3	2,73
RL_1	1023	840	168
RL_2	1513	430	336
EL_1	0,0029	0,0077	0,0268
EL_2	0,0020	0,0155	0,0268

Каждый класс моделей позволяет верифицировать отдельный аспект модели операции. Это связано с тем, что среди исследуемых показателей может не оказаться такого, который непротиворечиво оценивает все классы операций. В таком случае, если выбор все же необходимо сделать, он осуществляется с учетом особенностей оптимизируемого процесса.

Первый класс операций позволяет определить чувствительность верифицируемого показателя по отношению к особенностям распределения плотности входной функции $re(t)$, второй класс – соответственно, позволяет определить чувствительность показателя по отношению к особенностям распределения плотности выходной функции $pe(t)$.

Третий класс эталонных моделей операций позволяет определить возможности комплексного оценивания вход-выход.

Четвертый класс операций позволяет оценивать не только относительные возможности показателей.

Анализ структуры верифицируемых объектов показывает, что показатель (1) является абсолютным показателем, а показатель (2) – относительным. Максимальному значению эффективности соответствует минимальное значение показателя (1) и максимальное значение показателя (2).

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследований показывают, что в качестве критерия оптимизации пытаются использовать разные показатели. Это может быть «энергетический продукт» [5], «критическая нагрузка» [6], «надежность» [7], «критерий заполнения» [8], «постоянная энергия ошибки выборки» [9], «минимальное отклонение» [10] и т. д. Перечень работ можно расширять достаточно долго. Возникает естественный вопрос: «Можно ли в качестве критерия оптимизации процесса использовать показатель, который характеризует некоторый технический аспект исследуемого процесса?».

В этом смысле оптимизация по критерию минимума «затрат» [11] находится в несколько более выгодном

положении, поскольку это понятие можно трактовать как кибернетическое. Это связано с тем, что затраты, по крайней мере, сопутствуют любому системному процессу. Критический анализ данному показателю был дан выше, однако в системах которые не работают в непрерывном режиме, этот показатель может использоваться в качестве критерия оптимизации, поскольку режим управления по минимуму затрат, если не учитывать фактор времени, соответствуют получению максимума добавленной ценности.

Второй аспект, который является характерным для работ связанных с разработкой кибернетических критериев оптимизации, попытка использования кибернетических показателей основанных на определении первого интегрального параметра по входу или входу [11], выходу или выходу исследуемой операции [12]. Естественно, это исключает возможность учитывать распределенный характер во времени технологических потоков управляемых систем, а соответственно, и фактор времени.

В рамках разработанного класса идентифицированных моделей с распределенными параметрами обеспечивается проверка верифицируемого показателя на непротиворечивость сравнительной оценки.

Все дело в том, что частные показатели обеспечивают адекватное ранжирование моделей операций только своего класса, и не отображают численное значение самой эффективности, поскольку показателями эффективности, по сути, не являются. По этой причине численные значения оценки одних и тех же моделей операций, с использованием разных частных показателей, между собой не сопоставимы.

По этой же причине значения частных показателей, полученных в результате оценивания моделей операций своего класса, не являются эталонами эффективности.

С другой стороны, использование предложенного метода в рамках созданных классов эталонных моделей уже позволяет специалистам практикам критически сузить круг показателей, которые планируется использовать в качестве критерия оптимизации для оценки моделей операций с распределенными параметрами.

Таким образом, дальнейшие исследования в данном направлении могут быть направлены на расширение классов эталонных моделей операций.

ВЫВОДЫ

Впервые доказано, что из двух синхронизированных операций с распределенными параметрами $\Psi_1 = [re_1(t), pe_1(t)]$ и $\Psi_2 = [re_2(t), pe_2(t)]$, где $IRE_1 = IRE_2$, $VRE_1 \neq VRE_2$ и $pe_1(t) = pe_2(t)$, эффективней будет операция с меньшим значением параметра второй интегральной характеристики функции $re(t)$.

Впервые доказано, что из двух синхронизированных операций с распределенными параметрами $\Psi_1 = [re_1(t), pe_1(t)]$ и $\Psi_2 = [re_2(t), pe_2(t)]$, где $re_1(t) = re_2(t)$, $IPE_1 = IPE_2$, $VPE_1 \neq VPE_2$, эффективней будет операция с большим значением параметра второй интегральной характеристики функции $pe(t)$.

Впервые разработано три класса эталонных моделей операций с распределенными параметрами и метод идентификации эталонных операций в рамках своего класса с использованием частных показателей.

Разработка предложенного метода позволяет осуществлять обоснованный выбор показателя для использования в качестве критерия оптимизации операционных процессов с распределенными параметрами. Возможность выбора адекватного критерия оптимизации обеспечит повышение темпов развития производственных структур с оптимизированными процессами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Lutsenko I. Formal signs determination of efficiency assessment indicators for the operation with the distributed parameters / [I. Lutsenko, E. Fomovskaya, I. Oksanych et al] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 1, Issue 4 (85). – P. 24–30. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.91025
2. Development of the method for testing of efficiency criterion of models of simple target operations / [I. Lutsenko, E. Vihrova, E. Fomovskaya, O. Serduik] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 2, Issue 4 (80). – P. 42–50. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.66307
3. Lutsenko I. Identification of target system operations. 2. Determination of the value of the complex costs of the target operation / I. Lutsenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – Vol. 1, Issue 2 (73). – P. 31–36. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.35950
4. Lutsenko I. Identification of target system operations. Development of global efficiency criterion of target operations / I. Lutsenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – Vol. 2, Issue 2 (74). – P. 35–40. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.38963
5. Vasilyev E. S. Optimization of the architecture of a charge pump device on the basis of the energy efficiency criterion /

- E. S. Vasilyev // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2013. – Volume 58, Issue 1. – P. 95 – 99. <http://dx.doi.org/10.1134/s1064226913010099>
6. Wu Y. Henig efficiency of a multi-criterion supply-demand network equilibrium model / Y. Wu, T. C. Cheng // Journal of Industrial and Management Optimization. – 2006. – Volume 2, Issue 3. – P. 269–286. <http://dx.doi.org/10.3934/jimo.2006.2.269>
7. Optimization of the structure of multifunctional information systems according to the criterion of a required value of the efficiency ratio / [U. V. Anishchenka, L. I. Kul'bak, A. N. Kryuchkov, T. S. Martinovich] // Automatic Control and Computer Sciences. – 2008. – Volume 42, Issue 4. – P. 203–209. DOI: 10.3103/S0146411608040068
8. Miskowicz M. Efficiency of Event-Based Sampling According to Error Energy Criterion / M. Miskowicz // Instrumentation, Signal Treatment and Uncertainty Estimation in Sensors. – 2010. – 10(3). – P. 2242–2261. DOI: 10.3390/s100302242
9. Xu Q. Adaptive surrogate-based design optimization with expected improvement used as infill criterion / Q. Xu, E. Wehrle, H. Baier // A Journal of Mathematical Programming and Operations Research. – 2012. – Volume 61, Issue 6. – P. 661–684. <http://dx.doi.org/10.1080/02331934.2011.644286>
10. Xia L. Optimization of Markov decision processes under the variance criterion / L. Xia // Automatica. – 2016. – Volume 73. – P. 269–278. <http://dx.doi.org/10.1016/j.automatica.2016.06.018>
11. Харченко В.П. Оптимізація мережі інформаційних аеронавігаційних засобів за узагальненим критерієм ефективності / В. П. Харченко, Д. Г. Бабейчук, О. С. Слюняев // Аерокосмічні системи моніторингу та керування. – 2009. – № 1. – С. 3–5. DOI: 10.18372/2306-1472.38.1650
12. Köhl M. Performance Requirements and Criteria / M. Köhl // Journal of Chromatography Library. – 2004. – Vol. 35. – P. 85–90. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4770\(08\)60418-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4770(08)60418-2)

Статья поступила в редакцию 12.02.2017.

После доработки 01.06.2017.

Луценко І. А.¹, Фомовська О. В.², Оксанич І. Г.³, Сердюк О. Ю.⁴

¹Д-р техн. наук, професор, професор кафедри електронних апаратів Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського, Кременчук, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри електронних апаратів Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського, Кременчук, Україна

³Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційно-управляючих систем Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського, Кременчук, Україна

⁴Аспірант кафедри комп'ютерних систем та мереж ДВНЗ «Криворізький національний університет», Кривий Ріг, Україна

РОЗРОБКА МЕТОДА ВЕРИФІКАЦІЇ КРИТЕРІЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ОПЕРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Актуальність. Вирішено актуальне завдання верифікації критерію для оптимізації операційних процесів з розподіленими параметрами.

Мета роботи – створення методу верифікації оціночних критеріїв, що має властивості високої вибірковості і дозволяє вилучити ті показники, які забезпечують суперечливі результати по відношенню до результатів приватних критеріїв ефективності.

Метод. Запропоновано метод верифікації глобального критерію для оптимізації операційних процесів з розподіленими параметрами продуктивних потоків, який заснований на формуванні класів еталонних операцій, ідентифікованих з використанням локальних критеріїв ефективності, які, в свою чергу, засновані на використанні виявлених особливостей других інтегральних параметрів від інтегральних функцій входу і виходу глобальної моделі операції, адекватність яких математично доведена, забезпечуючи тим самим відбір показника, оціночні особливості якого дозволяють узгодити результати операційної діяльності керованих систем з метою їх власника за рахунок виходу в режим управління відповідного максимуму ефективності використання ресурсів.

Результати. Розроблено алгоритм реалізації методу верифікації оціночних показників, який був використаний при проведенні обчислювальних експериментів, пов'язаних з ілюстрацією можливостей запропонованого методу.

Висновки. Вперше розроблено три класи еталонних моделей операцій з розподіленими параметрами, кожна з яких ідентифікована з використанням локального критерію ефективності.

Розробка запропонованого методу дозволяє здійснювати обґрунтований вибір єдиного показника для використання в якості глобального критерію оптимізації операційних процесів з розподіленими параметрами будь-яких систем, процеси яких цього вимагають. Можливість вибору адекватного критерію оптимізації забезпечить підвищення темпів розвитку виробничих структур.

Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованого методу, реалізованого у вигляді алгоритму, що дозволяє рекомендувати його фахівцям-практикам для відбору оціночного критерію з безлічі показників, які пропонуються дослідниками в якості критерію оптимізації операційних процесів з розподіленими параметрами. Показник, який успішно пройшов верифікацію, забезпечує

можливість узгодження параметрів операційного процесу з метою власника (суперсистеми). При цьому, передбачається, що метою суперсистеми є максимізація власних можливостей, прямо пов'язаних з ефективністю використання доступних ресурсів.

Ключові слова: критерій оптимізації, верифікація показників, еталонна модель операції, операції з розподіленими параметрами, оцінка ефективності операцій.

Lutsenko I.¹, Fomovskaya E.², Oksanych I.³, Serdiuk O.⁴

¹Dr.Sc., Professor, Professor of Department of Electronic Devices of Kremenchug national University them. M. Ostrogradskii, Ukraine

²PhD, Associate Professor, Head of Department of Electronic Devices, Kremenchug national University them. M. Ostrogradskii, Ukraine

³PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Information and Control Systems, Kremenchug national University them. M. Ostrogradskii, Ukraine

⁴Postgraduate student of Department of Computer Systems and Networks, SIHE «Kryvyi Rih National University», Ukraine

DEVELOPMENT OF CRITERION VERIFICATION METHOD FOR OPTIMIZATION OF OPERATIONAL PROCESSES WITH THE DISTRIBUTED PARAMETERS

Context. The urgent verification problem of criterion for optimization of operational processes with the distributed parameters is solved.

Objective is creation of a verification method for estimated criteria which have high selectivity and allow excluding those indicators, which provide contradictory results in relation to results of local efficiency criteria

Method. The verification method of global criterion for optimization of operational processes with the distributed parameters of product flows which is based on reference operations classes formation identified with use of the local efficiency criteria, in turn, are based on use of the revealed features of the second integrated parameters from integrated functions of an input and output of global operation model, which adequacy is mathematically proved is offered, providing thereby indicator selection, the estimated features of which allow processing activities coordinating results of the operated systems with the purpose of their owner at the expense of an output in control mode corresponding to a maximum of resources efficiency.

Results. The algorithm of realization of a verification method for estimated indicators which has been used when carrying out computing experiments connected with the illustration of the offered method opportunities is developed.

Conclusions. For the first time three classes of reference models of operations with distributed parameters, each of which is identified with the local criterion of efficiency have been developed.

The development of the proposed method let us to make an informed choice of the one indicator for its using as a global optimization criterion of any system operational processes with distributed parameters which require this. The ability to select the adequate optimization criterion will improve the production structures development rate.

The experiments have been confirmed the operability of the proposed method, implemented in the algorithm form so it should be recommended to practicing experts for the estimated criteria selection from the indicators set which are offered by the researchers as an optimization criterion for operational processes with distributed parameters. The indicator which has successfully passed the verification enables coordination of the operational process parameters with the owner's (supersystem's) goal. At the same time, it is supposed that the purpose of supersystem is the maximization of own available resources opportunities which are directly connected with use of resources efficiency.

Keywords: optimization criterion, indicators verification, operation reference model, operation with the distributed parameters, operation efficiency evaluation.

REFERENCES

- Lutsenko I., Fomovskaya E., Oksanych I., Vihrova E., Serdiuk O. Formal signs determination of efficiency assessment indicators for the operation with the distributed parameters, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, Vol. 1, Issue 4 (85), pp. 24–30. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.91025
- Lutsenko I., Vihrova E., Fomovskaya E., Serdiuk O. Development of the method for testing of efficiency criterion of models of simple target operations, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, Vol. 2, Issue 4 (80), pp. 42–50. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.66307
- Lutsenko I. Identification of target system operations. Determination of the value of the complex costs of the target operation, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2015, Vol. 1, Issue 2 (73), pp. 31–36. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.35950
- Lutsenko I. Identification of target system operations. Development of global efficiency criterion of target operations, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2015, Vol. 2, Issue 2 (74), pp. 35–40. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.38963
- Vasilyev E. S. Optimization of the architecture of a charge pump device on the basis of the energy efficiency criterion, *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2013, Volume 58, Issue 1, pp. 95–99.
- Wu Y., Cheng T. C. Henig efficiency of a multi-criterion supply-demand network equilibrium model, *Journal of Industrial and Management Optimization*, 2006, Volume 2, Issue 3, pp. 269–286.
- Anishchenko U. V., Kul'bak L. I., Kryuchkov T. S., Martinovich A. N. Optimization of the structure of multifunctional information systems according to the criterion of a required value of the efficiency ratio, *Automatic Control and Computer Sciences*, 2008, Volume 42, Issue 4, pp. 203–209.
- Miskowicz M. Efficiency of Event-Based Sampling According to Error Energy Criterion. Instrumentation, *Signal Treatment and Uncertainty Estimation in Sensors*, 2010, 10 (3), pp. 2242–2261.
- Xu Q., Wehrle E., Baier H. Adaptive surrogate-based design optimization with expected improvement used as infill criterion, *A Journal of Mathematical Programming and Operations Research*, 2012, Volume 61, Issue 6, pp. 661–684.
- Xia L. Optimization of Markov decision processes under the variance criterion, *Automatica*, 2016, Volume 73, pp. 269–278.
- Harchenko V. P., Babeychuk D. G., Slyunyaev O. S. Optimizatsiya merezhi informatsiynih aeronavigatsiynih zasobiv za uzagalnenim kriteriem efektnosti, *Aerokosmichni sistemi monitoringu ta keruvannya*, 2009, No. 1, pp. 3–5.
- Köhl M. Performance Requirements and Criteria, *Journal of Chromatography Library*, 2004, Vol. 35, pp. 85–90.

UDC 519.714: 622.7

Morkun V. S.¹, Morkun N. V.², Tron V. V.³

¹Dr., Professor, Vice rector for research, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

²PhD, Associate Professor, Associate Professor of Economics Cybernetics and Projects Management Department, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

³PhD, Associate Professor, Associate Professor of Computer Science, Automation and Control Systems Department, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

AUTOMATIC CONTROL OF THE ORE SUSPENSION SOLID PHASE PARAMETERS USING HIGH-ENERGY ULTRASOUND

Context. The authors have solved the urgent problem of controlling automatically the parameters of solid ore suspension aimed for conversion thus increasing the end product quality and facilitating the choice and adherence to the concentration specifications.

Objective. The research aims at developing the method of obtaining operational data as to iron ore characteristics while concentrating, namely distribution of solid pulp particles as to their sizes and estimated grade applying multi-channel ultrasonic measurements.

Method. In order to solve the problem of controlling automatically the parameters of solid ore suspension, the authors suggest the method of measuring the intensity of high-frequency bulk ultrasonic waves covering a fixed distance in a measuring chamber containing ore suspension under the influence of ultrasonic vibrations and in case of their absence. The calculated correlations of the measured values make it possible to determine the parameters of solid ore suspension. Besides, while measuring we can observe the formation of gamma-radiation and low-frequency bulk ultrasonic waves in the ore suspension flow. It is possible to measure the intensity of gamma-radiation and low-frequency bulk ultrasonic waves covering the fixed distance if the measuring chamber contains some reference fluid and the ore suspension flow under ultrasonic vibrations and in the absence thereof. The intensity of ultrasonic vibrations influencing the suspension flow is changed according to the relevant law.

Results. The dynamic effects of high-frequency ultrasound provide a theoretical basis and a practical approval of the method controlling the solid phase of iron ore pulps in order to displace the particles of the required grain-size class to the measuring zone and to determine the grade in ore particles.

The developed purpose-designed programme realizes a numerical analysis and graphical representation of simulation results of changing solid pulp particle-sizes under the controlled influence of high-energy ultrasonic radiation pressure.

Conclusions. The authors have devised the method for controlling the distribution of the grade in crushed ore particle-size classes in the pulp flow by means of measuring the changes in the distribution parameters of high- and low-frequency ultrasonic waves as well as gamma-radiation. The method is different from the existing ones by the fact that in the course of measuring, the crushed ore particles of the required size and density are displaced to the measuring zone by exposing the pulps to the high-energy ultrasound influence thus increasing the measurement accuracy by 0.76%.

Keywords: automatic control, ore, suspension, solid phase, particle size distribution, crushed ore, high energy ultrasound.

NOMENCLATURE

\bar{E} is a time average energy density in the incident wave;

σ_s is a effective cross sections of scattering;

σ_p is a effective cross sections of absorption;

I_v is a value of the scattered wave intensity at an angle v ;

$n(Z, t)$ is a the concentration of pulp solid phase particles;

R is a radius;

Z is a coordinate Z in ultrasonic field;

T is a time;

$V_r(Z, t)$ is a particle displacement speed;

I is a intensity of ultrasonic waves;

ν_0 is a frequency of the sound;

α is a attenuation coefficient;

$n_r(Z, t)$ is a concentration of particles

ρ_T , is a particle density;

c_T is a velocity of ultrasound in the material of particle;

ρ is a density of investigated medium;

c is a ultrasound velocity in investigated medium;

μ_s is a mass attenuation coefficients of suspension ore material;

μ_w is a mass attenuation coefficients of water;

ρ_w is a density of water;

ρ_s is a density of suspension ore material particles;

W is a volume fraction of ore particles in suspension;

$S(t)$ is the signal, which is generated;

S_b is the measured value S in the presence of high intensity ultrasonic oscillations influence;

S_0 is the measured value S in the absence of this influence;

k_1 is a proportionality coefficient.

INTRODUCTION

One of the most important parameters, which has a decisive influence on the qualitative and quantitative indicators of separation beneficiation technology is the degree of minerals disclosure at every stage of the process. For operational control of this parameter during the technological process it is proposed to use measurable redistribution of pulp solid phase particles under the influence of the dynamic effects of high-energy ultrasound.

Due to the radiation pressure of the high-energy ultrasound in the measurement zone there is a redistribution of crushed ore particles by size. At a constant pulp flow rate the characteristics of this redistribution are determined by the intensity of the ultrasound field and the concentration and the characteristics of the pulp solid phase.

Thus a method of ore suspension parameters automatic control allows to increase the stability and reliability of measurement results of ore suspension solid phase.

1 PROBLEM STATEMENT

The object of the invention is to improve a method of ore suspension parameters automatic control by increasing the stability and reliability of measurement results.

The problem is solved by the fact that the method of automatic control of the ore suspension solid phase parameters, which comprising the forming of ore suspension material flow and the reference fluid in the measuring chamber, periodic influence of ultrasonic vibrations on suspension flow, formation of high frequency bulk ultrasonic waves in the ore suspension flow, intensity measurement of high frequency bulk ultrasonic waves, which are passed a fixed distance in the presence of reference liquid and ore suspension flow in the measuring chamber in periods of ultrasonic oscillations influence on suspension flow, and for its absence, and calculation of measured values ratios, according to which the parameters of ore suspension solid phase are determined.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

Three types of controlled parameters, which characterizing respectively the quality and quantity of processed ore materials, and the production situations, the state of the technological equipment are necessary for effective concentrating factories process control [2–4, 7, 11]. The known ultrasonic testing methods of the pulp parameters allow to identify two of its main characteristics – density and particle size distribution [2, 3, 8, 10–13, 16].

In [1, 12, 15] several methods of ultrasonic testing of mineral disclosure degree (useful component) during ore grinding are proposed and investigated. It is noted that the mineral disclosure degree control with the known fineness of analyzed particle may be reduced to measuring of this particle density.

One of the proposed methods is based on the action of a powerful (high-energy) ultrasound on the particle during its motion. The strength of the radiation pressure on a particle in a plane wave is determined by the formula, which was obtained by Westervelt [2, 5]

$$F_r = \bar{E}(\sigma_s + \sigma_p) - \bar{E} \oint I_v \cos v dS. \quad (1)$$

For estimation of particles displacement under the influence of high-intensity ultrasound the change in the value of ultrasonic probe signal with frequency ν in a direction perpendicular to the motion of pulp is determined. In [7] the ratio of two probe signal values was studied, one of which S_0 is determined without the influence of a powerful ultrasonic field, the other S_1 – with the presence. It is concluded that the density of the pulp solid phase particles can be determined by value of S_1/S_0 .

However, this determination method has its disadvantages. First of all, it should be noted that the ultrasonic attenuation coefficient of the probe signal α depends on the volume fraction of solids in the pulp, therefore change of this value can have a greater effect than the change in particle density. Furthermore, the expression, which defining the value of S_1/S_0 , is strong enough approximation, since it does not considers a number of factors, such as changes in particle size distribution law by a coefficient α etc. It should be noted that the use of high-

intensity ultrasound of given intensity is a promising direction for a preliminary purposeful redistribution of crushed material particles in a controlled pulp flow at development of its parameters control systems.

The closest technical solution, which is selected as a prototype, is a method of automatic control of the ore suspension solid phase parameters [6]. The disadvantage of this method is that the Love waves intensity in the measuring chamber wall, which contacts with the controlled medium flow varies according to condition of the metal film on the measuring chamber wall, which is in constant contact with the ore suspension abrasive medium. Wear and removing of the metal film leads to ambiguity of measured values, which are determined according to the parameters of the ore suspension solid phase. Thus, the known method requires constant monitoring and determining the state of metal film on the wall of the measuring chamber, and in the existing production is impossible. This fact leads to errors and, consequently, reduces the stability and reliability of measurement results.

According to the invention, gamma radiation and low frequency bulk ultrasonic waves in the flow of ore material slurry is formed, the intensity of gamma radiation and low-frequency bulk ultrasonic waves is measured.

3 MATERIALS AND METHODS

To solve the problem of the automatic control parameters of ore solid slurries is proposed the method, which consists in measuring the intensity of the high frequency bulk ultrasonic waves transmitted at a fixed distance in the measuring container during periods ore slurry flow to affect the suspension with ultrasonic vibrations and in their absence. In this case, the calculated ratio of the measured values allows to determine the parameters of the solid phase of the ore slurry. Also, during the measurement are formed gamma radiation and low-frequency bulk ultrasonic waves in the ore slurry flow and are measured the intensity gamma-radiation and low-frequency bulk ultrasonic waves transmitted at a fixed distance in the presence of the reference fluid in the measuring chamber and the ore slurry flow during effect on the slurry flow with ultrasonic vibrations and in their absence. At the same time, the intensity of ultrasonic vibrations during their effect on the flow of suspension is changed under the relevant law [8–10].

Functional scheme of automation, designed according to the stated principle of operation, is shown in Fig. 1.

Scheme of automation control product processing industry (Fig. 1) consists of three circuits. The circuit 1 is designed to generate directed high-energy ultrasound and consists of elements: 1A – control device (BC); 1B – switchgear (NS) of ultrasonic phased array. The contour 2 is designed for measurement of the pulp density on the basis of the ultrasonic signal to determine the concentration of ore particles in the pulp.

The circuit consists of the following elements: 2A – transducer ultrasonic signal transmitter (BE); 2B – indicating and recording secondary transducer of the ultrasonic signal (BIR); 2C – control device (BC); 2D – switchgear (NS) source of ultrasonic vibrations. Contour 3 is designed to measure the iron content in the ore particles on the basis of gamma radiation. The circuit consists of the following elements: 3A –

primary transducer of gamma-radiation signal (RE); 3b – indicating and recording secondary transducer of ultrasonic signal (RIR); 3b – control device (RC); 3G – switchgear (NS) source of ultrasonic vibrations.

The character of concentration and particle size distribution change in the field of high-energy ultrasound depends on the density of the particles themselves, the frequency and intensity of the incident radiation [4, 9, 13, 14, 16]. Let's estimate the influence of ultrasound radiation pressure to concentration change of particle with radius of

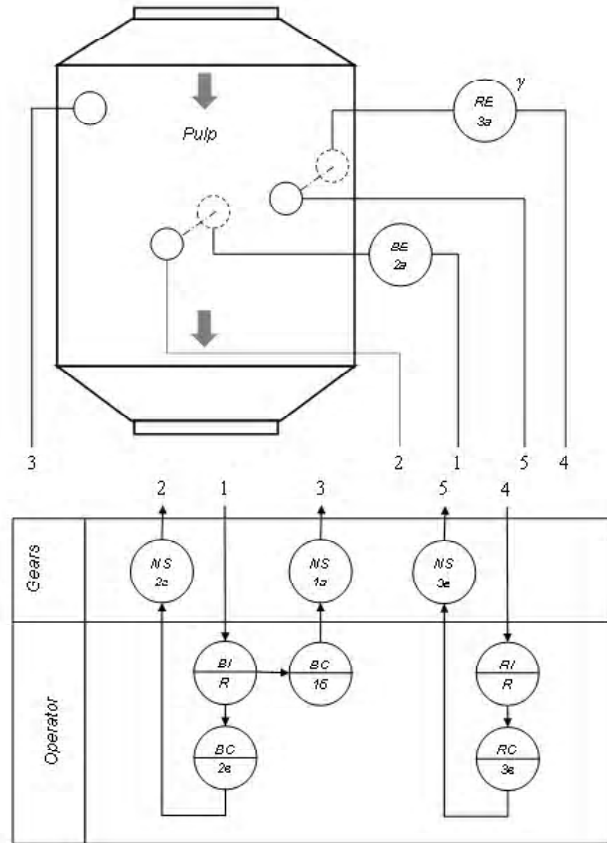


Figure 1 – Functional scheme of automation control product processing industry

r . Suppose that in a positive direction of x -axis pulp flows at a rate of V . Let's denote by $n_r(Z, t)$ the concentration of the particle radius of r at a depth of Z at time t .

$$\frac{\partial n_r(Z, t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial Z} [V_r(Z, t)n_r(Z, t)]. \quad (2)$$

In this equation $V_r(Z, t)$ – is the particle displacement speed with radius r and coordinate Z in ultrasonic field. Speed is directed along the axis z , ie perpendicular to the flow of pulp. Generally, it depends on the time t , as the concentration of particles changes as a result of ultrasound action, and this leads to a change in the intensity of the ultrasound, which ultimately affects the particle displacement speed. However, this greatly complicates the solution of the equation (2), therefore we will assume that speed depends only on the coordinate Z . Position of the particle in relative units is determined by the axis of ordinates, as well the number of its steps by the abscissa axis. Considering that the intensity of ultrasonic waves I changes exponentially (initial value I_0), its attenuation coefficient α depends on the frequency of the sound ν_0 and considering the analysis carried out in [7], the concentration of particles $n_r(Z, t)$ is determined by the formula

$$n_r(Z, t) = n_0 \frac{e^{\alpha z}}{e^{\alpha z} - \alpha \beta t} St(e^{\alpha z} - 1 - \alpha \beta t). \quad (3)$$

$$St(X) = \begin{cases} 0, & X < 0, \\ 1, & X \geq 0; \end{cases}$$

$$\beta = \frac{2r(kr)^4}{27\eta c} I_0(a_1^2 + a_1a_2 + \frac{3}{4}a_2^2); \quad \epsilon_1 = 1 - \frac{rc^2}{\rho c^2};$$

$$\epsilon_2 = 2 \frac{\rho - \rho}{2\rho + \rho}.$$

Displacement of ore suspension solid particles leads to their redistribution by size and concentration in zone of high energy ultrasound influence (Fig. 2) [8–10].

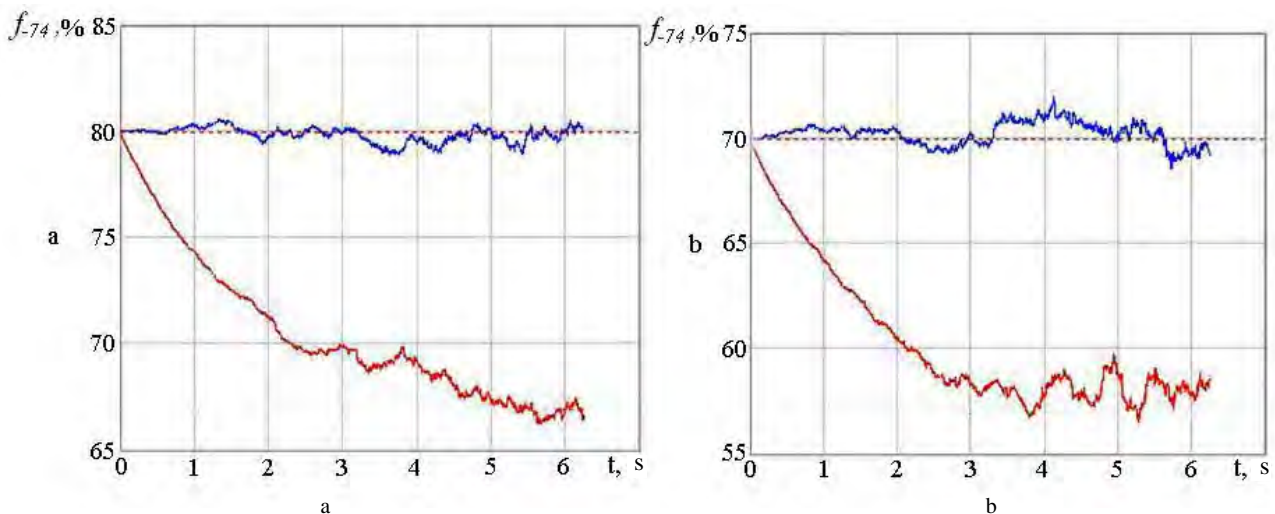


Figure 2 – The particle size measurement in controlled volume of pulp under the influence of the high-energy ultrasound radiation pressure: pulp density – 1250 g/l, the initial class content – 74 μm – 80% (a) and 70% (b)

With increasing of high energy ultrasound intensity from zero to a certain value and at a constant pulp flow rate all or only certain crushed material size classes can be removed to the measurement zone. In the low-frequency region ($\nu \leq 10^5$ Hz) the ultrasonic attenuation caused mainly by viscous inertial losses, so $\sigma \approx \sigma_\nu$.

Consequently about the pulp density or solid phase content in it can be judged by the magnitude of the signal S_1 . In accordance with the above, we will control the value S_1 in measurement zone at each current moment of time. Then, with known law of change of high energy ultrasound intensity we will obtain the particle size distribution function of the crushed material in pulp flow.

4 EXPERIMENTS

The method is implemented as follows [8–10]. First, the reference liquid (water) is fed into the measuring chamber. Gamma radiation in the measuring chamber is formed, and passes a fixed distance in it. The obtained result is attenuation of the gamma radiation intensity. It is reference (basic). In operation condition, the ore material suspension flow in the measuring chamber is formed. Gamma radiation, which passes a fixed distance in the measurement chamber in the presence of ore material suspension flow is formed. The attenuation coefficient of gamma radiation, which passed a fixed distance in ore suspension material flow is determined by expression

$$\mu = (1-W)\rho_B\mu_B + W\rho_T\mu_T. \quad (4)$$

The intensity of gamma radiation, which passed a distance l in ore suspension material flow, can be presented as follows

$$I = I_0 \exp\{-[(1-W)\rho_B\mu_B + W\rho_T\mu_T]l\}. \quad (5)$$

If water is present in the measuring chamber then the intensity of gamma radiation will be determined by the formula

$$I^* = I_0 \exp(-\rho_B\mu_B l). \quad (6)$$

Considering (5) and (6), the intensity of gamma radiation can be represented as

$$I = I^* \exp\{-W[\rho_T\mu_T - \rho_B\mu_B]l\}. \quad (7)$$

This value does not depend on the particle size of solid phase ie ore slurry material, and determined only by the slurry solid phase concentration and its particles density. According to the proposed method the value S_r for the gamma radiation is formed

$$S_\gamma = \ln \frac{I^*}{I} = AW[(\rho_T\mu_T - \rho_B\mu_B)l]. \quad (8)$$

This expression shows that the density of the controlled medium, which depends on the ore suspension solid phase concentration and its particle density is determined by logarithm of intensity ratio of the gamma radiation in the presence of water flow and ore suspension in measuring chamber. Similarly, the value S_1 is determined for high frequency and S_2 for low frequency bulk ultrasonic waves, which passed a fixed distance through the flow of water and ore suspension.

According to the proposed method the value S_r is determined as

$$S_r = k_1 \frac{S_B - S_0}{S_B}. \quad (9)$$

To obtain a signal which depends on the useful component content of ore suspension solid phase fractions of corresponding size, ie disclosure of useful component, the ratio of S_K is calculated

$$S_K = k_2 \frac{S_\gamma}{S_r}. \quad (10)$$

All or only certain size classes of the crushed material ie a certain solid phase size fraction can be displaced in the measurement zone by increasing the intensity of ultrasonic oscillations from zero to a certain value and with ore suspension constant flow rate.

$$F(r) = \left(\int_0^{r_1} f(r)r^3 dr + \int_{r_1}^{r_2} f(r)r^3 dr + \dots + \int_{r_{m-1}}^{r_m} f(r)r^3 dr \right) / \int_0^{r_m} f(r)r^3 dr. \quad (11)$$

Thus, the value S_K , which is calculated at a certain ultrasonic oscillations intensity in the ore suspension flow determines the density of solid phase particles or useful component concentration in ore suspension solid phase fractions of appropriate size. Since all calculations are made on the basis of measurements relative to characteristics of the reference material, the obtained results are protected from various disturbing factors, which reduce the accuracy of measurement parameters of ore suspension solid phase.

5 RESULTS

Below are the simulation results of the crushed ore particles concentration redistribution in the pulp under the influence of high-energy ultrasound radiation pressure in accordance with the above expressions. The developed program realizes a numerical analysis and graphical representation of simulation results of changes in the pulp solid phase particle size characteristics in form, which is illustrated in Fig. 3.

The density of crushed ore particles may vary within a predetermined range (in model example 1.8–3.2 g/cm³ is accepted). Geometry of measurement, source position and intensity of the ultrasonic oscillations, solid phase particles concentration and their size distribution are set before starting the simulation. The simulated measurement zone is represented by a segment of the pipeline, the length and the diameter of which may vary depending on the task and is directly correlated with the strength of the ultrasonic radiation pressure, which in turn is determined by the intensity of its radiation generated by the source (emitter).

The measuring range is a defined number of sections of the pipeline, in which the counting of number of particles, which are caught in them is carried out.

The y-axis (Fig. 3) shows the number of processed particles, moreover the deducible scale is automatically extended with an increase in simulation time, ie, the number of passed particles.

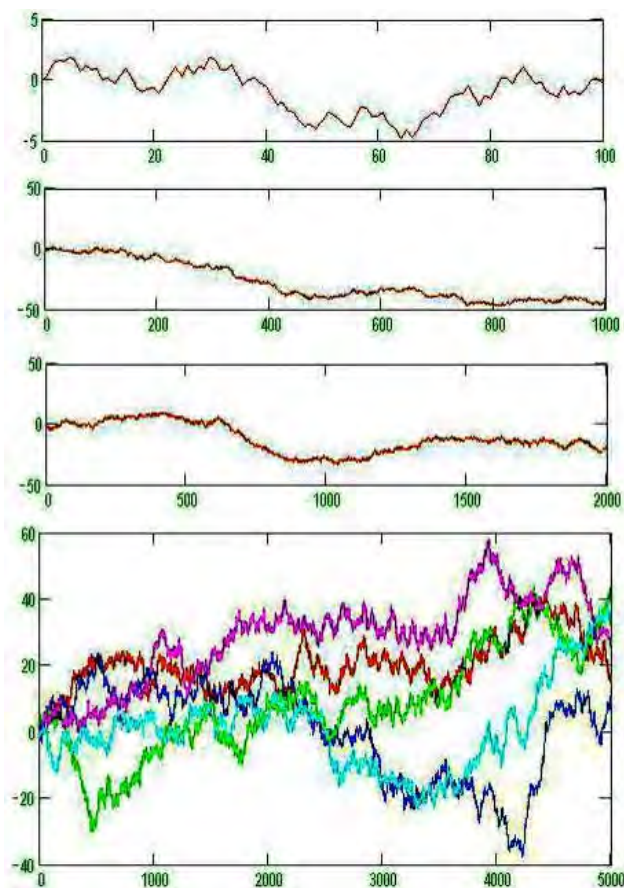


Figure 3 – The simulation results of ore particles coordinates change in the pulp with increasing of steps number

Figure 4 shows the simulation results at different time points, which demonstrates the independence of particles size distribution law on their number and simulation time.

6 DISCUSSION

Measurement of the useful component content can not be reduced to the determination of specific weight (density) of solid phase particles, which are located in the ore suspension. In the measuring chamber section, where the value S is determined the flow of enriched material suspension is periodically exposed to high intensity ultrasonic waves. Due to the radiation pressure and acoustic flows, there is a displacement of ore suspension solid phase particles from the trajectory of their normal movement in the flow in the direction of high-intensity ultrasonic oscillations influence. Displacement of ore suspension solid phase particles leads to their redistribution by size and concentration in the high intensity ultrasonic oscillations influence zone. The value of this redistribution for the same particle size is determined only by the mineral composition (the ratio of the useful component and gangue) and specific weight (density) of each component. For solid phase particles of the same size, which are crushed to a particle size of useful component inclusions, the value of the displacement is proportional only to their specific weight.

Thus, the intensity measurement of high-frequency ultrasonic vibrations, which have passed through a

controlled pulp volume, in the process of impact on it of high energy ultrasound with a given intensity allows to evaluate its solid phase particle size distribution.

CONCLUSIONS

Developed a method of evaluating the distribution function of the useful component by grade of particle size iron ore pulp using a high-frequency and low-frequency ultrasonic radiation and gamma radiation, which differs from existing ones that in the process of the measurement is carried out displacement of the particles of a given grade size in the measurement area by acting on the pulp with ultrasonic radiation of high intensity; the measurement results are compared with the reference substance characteristics, which improves the measurement accuracy by 0.76%.

The proposed measurement method does not require preliminary pulp degassing, because under the ultrasound radiation pressure influence the gas bubbles are removed from the measurement zone. The invention relates to acoustic measurements and can be used for automatic control of the main characteristics of the ore solids in suspension, in particular the concentration of solids, its size distribution and the useful component disclosure degree.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work is supported by the state budget scientific research project of Kryvyi Rih National University “The study of converting gamma rays, ultrasound body and surface waves on edges of heterophase environments for concentration technology optimization” (state registration number 0112U000359.30-88-12), “The study of dynamic effects of high-energy ultrasound on gas bubbles in the operating panel for controlling gas phase parameters during flotation” (state registration number № 0115U003031.30-100-15) and “Development of the method of determining mineral-technological varieties of iron ore using microwave electromagnetic radiation, gamma radiation and high-energy ultrasound” (state registration number № 0115U003030.30-101-15).

REFERENCES

1. Агранат Б. А. Физические основы технологических процессов, протекающих в жидкой фазе с воздействием ультразвука / Б. А. Агранат. – Москва : Машиностроение, 1969. – 266 с.
2. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман. – Москва : Изд-во иностран. лит., 1957. – 726 с.
3. Гринман И. Г. Контроль и регулирование гранулометрического состава продуктов измельчения / И. Г. Гринман, Г. И. Блях. – Алма-Ата : Наука, 1967. – 115 с.
4. Козин В. З. Опробование, контроль и автоматизация обогатительных процессов / В. З. Козин, О. Н. Тихонов. – Москва : Недра, 1990. – 343 с.
5. Ландау Л. Д. Теоретическая физика. Механика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – Москва : ГИТТЛ, 1954. – 796 с.
6. Патент України на корисну модель. № 27086. UA. Спосіб автоматичного контролю параметрів твердої фази пульпи / Моркун В. С., Поркунян О. В. – Опубл. 10.10.2007. – Бюл. № 16. – 3 с.
7. Morkun V. Simulation of the Lamb waves propagation on the plate contacts with gas containing iron ore pulp in Waveform Revealer toolbox / V. Morkun, N. Morkun, A. Pkilnyak // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – № 5. – P. 16–19.

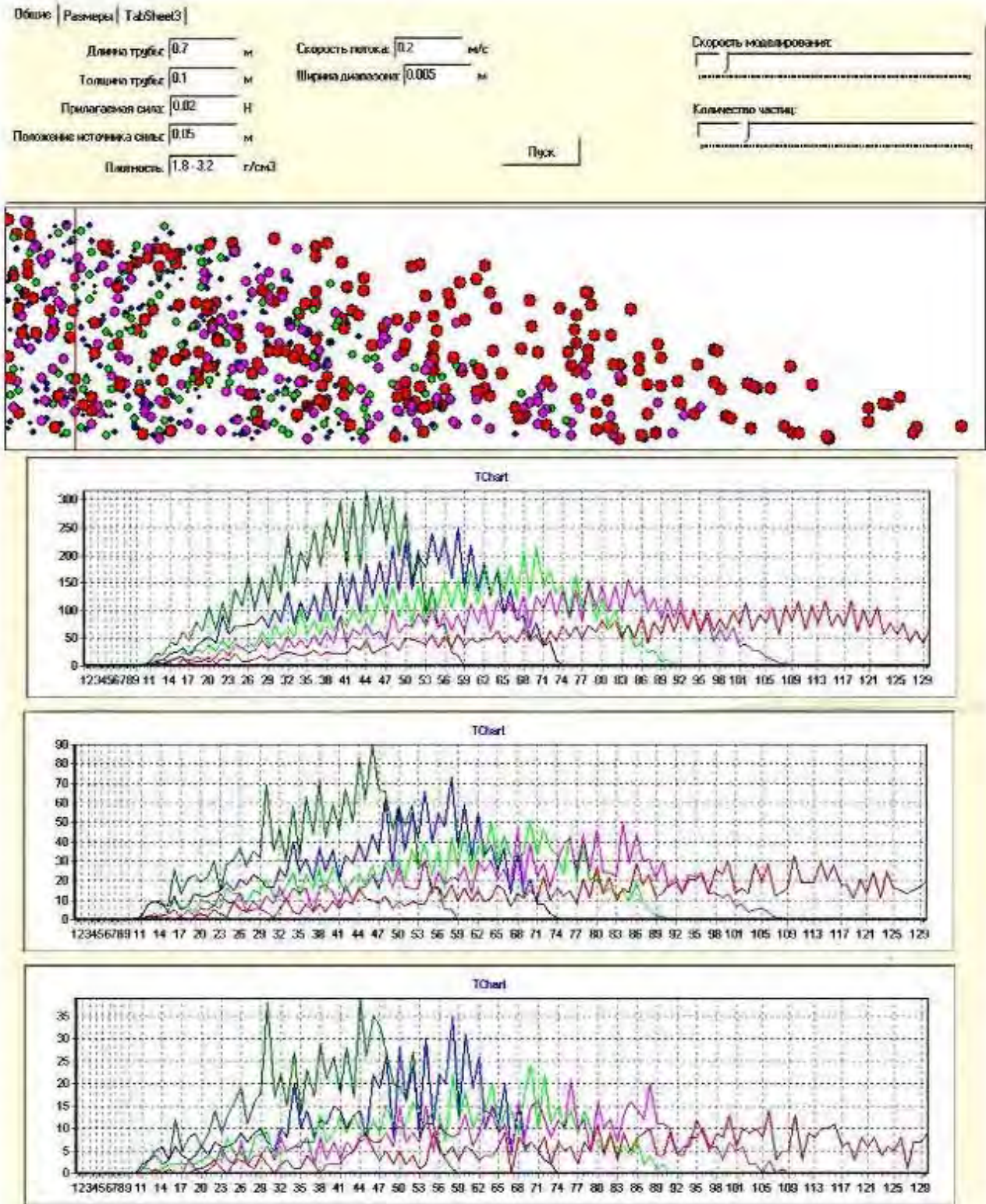


Figure 4 – The simulation results of redistribution of crushed ore particles concentration of five size fractions in the pulp flow under the influence of the high-energy ultrasound radiation pressure

8. Morkun V. The adaptive control for intensity of ultrasonic influence on iron ore pulp / V. Morkun, N. Morkun, A. Pikilnyak // Metallurgical and Mining Industry. – 2014, – №. 6. – P. 8–11.
9. Morkun V. Formalization and frequency analysis of robust control of ore beneficiation technological processes under parametric uncertainty / V. Morkun, N. Morkun, V. Tron // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – №. 5. – P. 7–11.
10. Morkun V. Adaptive control system of ore beneficiation process based on Kaczmarz projection algorithm / V. Morkun, N. Morkun, A. Pikilnyak, // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 2. – P. 35–38.
11. Назипов Р. А. Основы радиационного неразрушающего контроля / Р. А. Назипов, А. С. Храмов, Л. Д. Зарипова. – Казань : Изд-во Казанск. гос. ун-та, 2008. – 66 с.
12. Процуто В. С. Автоматизированные системы управления технологическими процессами обогатительных фабрик / В. С. Процуто. – Москва : Недра, 1987. – 253 с.
13. Физика и техника мощного ультразвука: [под ред. Л.Д. Розенберга, в 3 т]. – Москва : Наука. – 1967–1970.
14. Tabei M. A new k-space method for coupled first-order acoustic propagation equations / M. Tabei, T. D. Mast, R. C. Waag // Journal of the Acoustical Society of America (submitted). – 2001.
15. Трухан С. Н. Моделирование диффузии методом Монте-Карло / С. Н. Трухан. – Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН. Режим доступа: <http://www.exponenta.ru/educat/systemat/truhan>.
16. Wooh Shi-Chang Optimization of ultrasonic phased arrays / Wooh Shi-Chang, Shi Yijun // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. – 1998. – No. 17. – P. 883–890.

Article was submitted 17.01.2017.
After revision 10.05.2017.

Моркун В. С.¹, Моркун Н. В.², Тронь В. В.³

¹Д-р техн. наук, профессор, проректор з наукової роботи, ДВНЗ «Криворізький національний університет», Кривий Ріг, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри економічної кібернетики та управління проектами, ДВНЗ «Криворізький національний університет», Кривий Ріг, Україна

³Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформатики, автоматики і систем управління, ДВНЗ «Криворізький національний університет», Кривий Ріг, Україна

АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ ТВЕРДОЇ ФАЗИ ЗАЛІЗОРУДНОЇ ПУЛЬПИ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНОГО УЛЬТРАЗВУКУ

Актуальність. Вирішено актуальне завдання автоматичного контролю параметрів твердої фази рудної суспензії, що надходить на збагачувальний переділ. Це сприяє підвищенню якості кінцевого продукту і полегшує вибір і дотримання технологічного регламенту процесу збагачення.

Мета – розробка методу отримання оперативної інформації про характеристики залізної руди в процесі збагачення: розподіл часток твердої фази пульпи за крупністю і змістом корисного компонента з застосуванням багатоканальних ультразвукових вимірювань.

Метод. Для вирішення завдання автоматичного контролю параметрів твердої фази рудної суспензії запропонований спосіб, що полягає у вимірюванні інтенсивності високочастотних об'ємних ультразвукових хвиль, що пройшли фіксовану відстань в вимірювальній ємності з рудною суспензією в періоди впливу на потік суспензії ультразвукових коливань і при їх відсутності. При цьому отримані співвідношення вимірюваних величин дозволяють визначити параметри твердої фази рудної суспензії. Також, в процесі вимірювання здійснюється формування гамма-випромінювання і низькочастотних об'ємних ультразвукових хвиль в потоці суспензії рудного матеріалу, і здійснюють вимір інтенсивності гамма-випромінювання і низькочастотних об'ємних ультразвукових хвиль, що пройшли фіксовану відстань при наявності у вимірювальній камері еталонної рідини і потоку рудної суспензії в періоди впливу на потік суспензії ультразвукових коливань і при їх відсутності. Інтенсивність ультразвукових коливань в період їх впливу на потік суспензії змінюють за відповідним законом.

Результати. На основі динамічних ефектів високоенергетичного ультразвуку теоретично обґрунтований і експериментально апробований метод впливу на тверду фазу залізорудної пульпи для зміщення частинок певного класу крупності в зону вимірювань і визначення змісту корисного компонента в рудних частинках.

Розроблена спеціалізована програма, яка реалізує чисельний аналіз і графічне представлення результатів моделювання зміни гранулометричної характеристики твердої фази пульпи під керуванням впливом радіаційного тиску високоенергетичного ультразвуку.

Висновки. Пропонується метод оцінки функції розподілу корисного компонента по класах крупності частинок подрібненої руди в потоці пульпи на основі вимірів параметрів процесу поширення високочастотних і низькочастотних ультразвукових хвиль, а також гамма-випромінювання, який відрізняється від існуючих тим, що в процесі вимірювань здійснюють зсув частинок подрібненої руди певної крупності і щільності в область вимірювань шляхом впливу на пульпу високоенергетичного ультразвуку, що дозволяє підвищити точність вимірювань на 0,76%.

Ключові слова: автоматичне управління, руда, пульпа, тверда фаза, розподіл часток за розмірами, дроблення руди, високоенергетичний ультразвук.

Моркун В. С.¹, Моркун Н. В.², Тронь В. В.³

¹Д-р техн. наук, профессор, проректор по научной работе, ГВУЗ «Криворожский национальный университет», Кривой Рог, Украина

²Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры экономической кибернетики и управления проектами, ГВУЗ «Криворожский национальный университет», Кривой Рог, Украина

³Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информатики, автоматики и систем управления, ГВУЗ «Криворожский национальный университет», Кривой Рог, Украина

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ПУЛЬПЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УЛЬТРАЗВУКА

Актуальность. Решена актуальная задача автоматического контроля параметров твердой фазы рудной суспензии, поступающей на обогатительный передел, что способствует повышению качества конечного продукта и облегчает выбор и соблюдение технологического регламента процесса обогащения.

Цель – разработка метода получения оперативной информации о характеристиках железной руды в процессе обогащения: распределение частиц твердой фазы пульпы по крупности и содержанию полезного компонента с применением многоканальных ультразвуковых измерений.

Метод. Для решения задачи автоматического контроля параметров твердой фазы рудной суспензии предложен способ, заключающийся в измерении интенсивности высокочастотных объемных ультразвуковых волн, прошедших фиксированное расстояние в измерительной емкости с рудной суспензией в периоды влияния на поток суспензии ультразвуковых колебаний и при их отсутствии. При этом вычисленные соотношения измеренных величин позволяют определить параметры твердой фазы рудной суспензии. Также, в процессе измерения осуществляется формирование гамма-излучения и низкочастотных объемных ультразвуковых волн в потоке суспензии рудного материала, и замер интенсивности гамма-излучения и низкочастотных объемных ультразвуковых волн, прошедших фиксированное расстояние при наличии в измерительной камере эталонной жидкости и потока рудной суспензии в периоды воздействия на поток суспензии ультразвуковых колебаний и при их отсутствии. Интенсивность ультразвуковых колебаний в период их влияния на поток суспензии меняют по соответствующему закону.

Результаты. На основе динамических эффектов высокоэнергетического ультразвука теоретически обоснован и экспериментально апробирован метод воздействия на твердую фазу железорудной пульпы для смещения частиц определенного класса крупности в зону измерений и определения содержания полезного компонента в рудных частицах.

Разработана специализированная программа, которая реализует численный анализ и графическое представление результатов моделирования изменения гранулометрической характеристики твердой фазы пульпы под управляемым воздействием радиационного давления высокоэнергетического ультразвука.

Выводы. Предлагается метод оценки функции распределения полезного компонента по классам крупности частиц измельченной руды в потоке пульпы на основе измерений параметров процесса распространения высокочастотных и низкочастотных ультразвуковых волн, а также гамма-излучения, который отличается от существующих тем, что в процессе измерений осуществляют смещение частиц измельченной руды определенной крупности и плотности в область измерений путем воздействия на пульпу высокоэнергетическим ультразвуком, что позволяет повысить точность измерений на 0,76%.

Ключевые слова: автоматическое управление, руда, пульпа, твердая фаза, распределение частиц по размерам, дробление руды, высокоэнергетический ультразвук.

REFERENSES

1. Agranat B.A. Fizicheskie osnovy tehnologicheskikh processov, protekajushhix v zhidkoj faze s vozdejstviem ul'trazvuka. Moscow, Mashinostroenie, 1969, 266 p.
2. Bergman L. Ul'trazvuk i ego primeneniye v nauke i tehnikе. Moscow, Izd-vo inostran. lit., 1957, 726 p.
3. Grinman I. G., Bljah G. I. Kontrol' i regulirovaniye granulometricheskogo sostava produktov izmel'cheniya. Alma-Ata, Nauka, 1967, 115 p.
4. Kozin V. Z., Tihonov O. N. Oprobovanie, kontrol' i avtomatizacija obogatitel'nyh processov. Moscow, Nedra, 1990, 343 p.
5. Landau L. D., Lifshic E. M. Teoreticheskaja fizika. Mehanika sploshnyh sred. Moscow, GITTL, 1954, 796 p.
6. Morkun V. S., Porkujan O. V. Patent Ukraїni na korisnu model'. № 27086. UA. Sposib avtomatichnogo kontrolju parametriv tvrdoї fazi pul'pi/ Opubl. 10.10.2007. Bjul. № 16, 3 p.
7. Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A. Simulation of the Lamb waves propagation on the plate which contacts with gas containing iron ore pulp in Waveform Revealer toolbox, *Metallurgical and Mining Industry*, 2014, No. 5, pp. 16–19.
8. Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A. The adaptive control for intensity of ultrasonic influence on iron ore pulp, *Metallurgical and Mining Industry*, 2014, No. 6, pp. 8–11.
9. Morkun V., Morkun N., Tron V. Formalization and frequency analysis of robust control of ore beneficiation technological processes under parametric uncertainty, *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, No. 5, pp. 7–11.
10. Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A. Adaptive control system of ore beneficiation process based on Kaczmarz projection algorithm, *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, No. 2, pp. 35–38.
11. Nazipov R. A., Hramov A. S., Zaripova L. D. Osnovy radiacionnogo nerazrushajushhego kontrolja. Kazan', Izd-vo Kazansk. gos. un-ta, 2008, 66 p.
12. Procuto V. S. Avtomatizirovannye sistemy upravlenija tehnologicheskimi processami obogatitel'nyh fabrik. Moscow, Nedra, 1987, 253 p.
13. Fizika i tehnika moshhnogo ul'trazvuka: [pod red. L. D. Rozenberga, v 3 t]. Moscow, Nauka, 1967–1970.
14. Tabei M., Mast T. D., Waag R. C. A new k-space method for coupled first-order acoustic propagation equations, *Journal of the Acoustical Society of America (submitted)*, 2001.
15. Truhan S. N. Modelirovaniye diffuzii metodom Monte-Karlo. Institut kataliza im. G. K. Boreskova SO RAN. Rezhim dostupa: <http://www.exponenta.ru/educat/systemat/truhan>.
16. Wooh Shi-Chang, Shi Yijun Optimization of ultrasonic phased arrays. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1998, No. 17, pp. 883–890.

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ РЕЗАНИЯ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗА ИНДИВИДУАЛЬНОГО РЕСУРСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Актуальность. В статье изложены результаты исследований по разработке новой методологии прогнозирования индивидуального ресурса режущего инструмента, послужившей основой автоматизированной системы управления работой металлообрабатывающего оборудования. Прогнозирование индивидуального ресурса режущего инструмента является злободневной, но так и не решенной до сих пор проблемой, что и определяет актуальность изложенного в статье материала.

Цель работы – разработка новой методологии прогнозирования индивидуального ресурса режущего инструмента.

Метод. Предложен метод управления работой металлообрабатывающего оборудования, сочетающий в рамках единого процесса решения задач идентификации и управления. Идентификации подвергается модель тренда информационного сигнала, генерируемого в процессе работы обрабатывающей системы, которая используется в качестве модели, описывающей динамику поднадзорного оборудования. По результатам прогнозирования индивидуального ресурса инструмента и сопоставления его с требуемой длительностью механической обработки, принимается решение о варьировании величин управляющих параметров (подачи и оборотов шпинделя), обеспечивающих реализацию на вновь назначенных режимах необходимого периода бездефектной эксплуатации инструмента.

Результаты. Разработан программный продукт, составивший основу автоматизированной системы адаптивного управления работой металлообрабатывающих технологических систем, алгоритм работы которых отражает предложенную методологию прогнозирования индивидуального ресурса режущего инструмента.

Выводы. Проведенные эксперименты подтвердили эффективность предложенной методологии прогнозирования ресурса режущего инструмента и работоспособность аппаратно-программного комплекса, реализующего данную методологию в практике резания. Научная новизна изложенных в статье результатов исследований состоит в том, что впервые в практике машиностроения удалось разработать совершенно новую методологию прогнозирования индивидуального ресурса рабочего инструмента, что позволяет целенаправленно управлять длительностью протекания технологического процесса, ориентируясь на фактическое техническое состояние основного элемента технологической системы. Практическая значимость полученных результатов заключается в создании программно-аппаратного комплекса, автоматизирующего процесс адаптивного управления режимами резания и содержащего программное обеспечение, которое отражает алгоритм новой методологии прогнозирования индивидуального ресурса инструмента. Перспективы дальнейших исследований состоят в создании универсальной системы контроля любого технологического оборудования, работа которого сопровождается генерированием различных по физической природе информационных сигналов, объективно отражающих степень критичности технического состояния поднадзорного оборудования.

Внедрение подобной методологии контроля не только в процесс изготовления, но и в условия эксплуатации разнообразных по конструкции и назначению машин и механизмов, решает давно стоящую на повестке дня проблему определения индивидуального ресурса технических систем, что и определяет ценность проведенных исследований и их заметный вклад в науку управления.

Ключевые слова: автоматизация, адаптивное управление, индивидуальный ресурс, программный продукт, обработка резанием, обрабатывающие системы, прогноз ресурса, идентификация, тренд информационного сигнала, математическая модель, период бездефектной обработки, состояние поднадзорного оборудования.

НОМЕНКЛАТУРА

V – скорость резания;

S – подача;

t – глубина резания;

$[h_3]$ – предельно допустимая величина износа по задней поверхности лезвия режущего инструмента;

γ – интенсивность (скорость) изнашивания инструмента;

T – ресурс инструмента;

$T_{\text{Инд}}$ – индивидуальный ресурс инструмента;

$T_{\text{Тр}}$ – требуемая по техпроцессу длительность обработки детали (длительность прохода);

D – диаметр заготовки;

L – протяженность (длина) обработанной поверхности;

V_0 – исходное (заданное по техпроцессу) значение скорости резания;

S_0 – исходное (заданное по техпроцессу) значение подачи;

$E_{3В}^P$ – расчетное значение тренда звука;

$E_{3В0}^P$ – исходное расчетное значение тренда звука;

τ – текущая наработка режущего инструмента;

α – показатель степени;

$E_{3В}^Ф$ – фактическое значение тренда (временного ряда) звука, генерируемого процессом лезвийной обработки; k – количество измерений, проведенных за все время контроля состояния режущего инструмента;

$P_{\text{ПР}}$ – усилие прижатия, действующего в трущейся паре;

$V_{\text{СК}}$ – скорость относительного скольжения трущихся пар;

σ – механические напряжения;

σ_{-1} – предел усталости;

N_6 – базовое число циклов;

N – наработка в циклах режущего инструмента до разрушения;

m – показатель степени кривой усталости;
 $P_{x,y,z}$ – составляющие силы резания;
 C_p – постоянная для данного вида обработки, обрабатываемого и инструментального материалов;
 K_p – поправочный коэффициент;
 $V(\tau)$ – регулируемая (оптимальная) величина скорости резания;
 $S(\tau)$ – регулируемая (оптимальная) величина подачи;
 r_B – радиус вершины лезвия реза.
 R_a – текущее значение высотного параметра шероховатости обработанной поверхности;
 R_{a0} – исходное (заданное) значение высотного параметра шероховатости обработанной поверхности;
 $T_{гр}$ – машинное время, необходимое для завершения текущего прохода;
 $L_{дет}$ – длина поверхности детали, обрабатываемая за один проход.

ВВЕДЕНИЕ

Адаптивность (приспособляемость) управления лезвийной металлообработкой, выполняемой на станках с ЧПУ, обеспечивается за счет выбора по тем или иным алгоритмам оптимальных сочетаний трех управляемых параметров: глубины, подачи и скорости резания. Оптимум обеспечивается путем определения экстремума целевой функции, что позволяет достигать на данном станке в зависимости от решаемой задачи либо максимума производительности, либо минимума себестоимости получаемой при этом детали, либо поддержания граничного значения регулируемых параметров [1, 2].

При этом при всей развитости принятых алгоритмов адаптивного управления, существенной проблемой резания металлов является так и не решенная до сих пор задача эффективного контроля состояния режущего инструмента [3]. Действующие в настоящее время даже весьма прогрессивные методы прямого или косвенного контроля состояния инструмента ограничиваются лишь сравнением определенного тем или иным, порой весьма изощренным, способом фактической величины износа инструмента с его нормативной величиной [4].

Однако при этом не ставится задача прогнозирования наработки инструмента до момента достижения им своей предельно допустимой величины износа, что не позволяет заранее принимать решение об изменении режима обработки с целью предупреждения внезапного выхода инструмента из строя и исключения тем самым появления бракованной детали. Отсутствие подобного прогноза сводит на нет все усилия по разработке алгоритма адаптивного управления, каким бы эффективным, по желанию авторов, он ни был.

Отсутствие действенных методов прогнозирования ресурса инструмента отчасти объясняется тем, что даже знание фактической величины износа не позволяет с достаточной долей вероятности прогнозировать наработку инструмента до момента достижения предельно допустимой величины его износа. Это объясняется тем, что нормативная величина износа носит сугубо среднестатистический характер. По этой причине нормы износа только с определенной долей достоверности характеризуют фактически складывающиеся условия нагруже-

ния инструмента, определяемые конкретным сочетанием режимов резания и материалов как инструмента, так и заготовки.

Пронормировать непосредственно ресурс (стойкость) инструмента, исходя из условий его нагружения, так же не представляется возможным. Это объясняется тем, что в практике резания наблюдается не поддающееся нормированию бесконечное множество фактически реализующихся условий нагружения инструмента. Данные о ресурсе инструмента, приводимые их производителем, носят, так же как и нормы износа, среднестатистический характер, с малой долей вероятности, характеризующие индивидуальный ресурс инструмента, определяемый конкретно складывающимися условиями его эксплуатации. Результатом этой неопределенности является проявляющийся, на первый взгляд, как правило, внезапно, отказ инструмента, влекущий, в свою очередь, появление неисправимого брака детали.

Решение указанной проблемы потребовало разработки новой методологии прогнозирования индивидуального ресурса инструмента, составившей основу автоматизированной системы адаптивного управления процессом лезвийной обработки материалов. Новизна методологии прогнозирования ресурса инструмента заключается в том, что она в отличие от действующих методов, ориентирующихся на среднестатистические данные о предельном износе и ресурсе инструмента, обеспечивает прогнозирование в режиме реального времени индивидуального ресурса инструмента, отвечающего фактическим условиям его нагружения.

Разработка автоматизированной системы адаптивного управления процессом резания, основу которой составляет новая методология прогнозирования ресурса инструмента, является, несомненно, актуальной научно-практической задачей.

Предметом исследования является система адаптивного управления, основанная на прогнозе в режиме реального времени индивидуального ресурса режущего инструмента.

Целью работы является разработка алгоритма и отвечающего ему программного продукта, составляющего основу автоматизированной системы адаптивного управления процессом резания, обеспечивающей внедрение в практику машиностроительного производства новой методологии прогнозирования индивидуального ресурса инструмента.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При управлении металлообрабатывающими системами приходится иметь дело со случаем, когда математическая модель объекта управления известна не полностью, а динамические характеристики объекта, описываемые этой моделью, непрерывно изменяются в зависимости от внутренних условий, обусловленных в данном случае изменением в процессе резания геометрии заготовки и контура лезвия инструмента по причине его износа [4].

В данном случае в качестве модели объекта управления предлагается рассматривать математическое описание тренда различных по физической природе информационных сигналов, сопровождающих процесс резания, наибо-

лее информативным из которых является звук, генерируемый в точке контакта заготовки и инструмента [5].

Модель, описывающая поведение тренда звука, рассматриваемая в качестве модели динамического поведения обрабатывающей системы, позволила разработать и предложить для широкого применения в реальном производстве совершенно новую методологию прогнозирования ресурса режущего инструмента, составившую основу автоматизированной системы адаптивного управления процессом обработки материалов резанием. Алгоритм управления, разработанный в соответствии с данной методологией, решает в рамках единого процесса задачу идентификации и управления.

По результатам идентификации модели тренда в режиме реального времени прогнозируется индивидуальный ресурс инструмента. Далее, на основе сопоставления прогноза с требуемой по тех процессу длительностью обработки осуществляется выбор оптимального режима резания, позволяющего продлить период бездефектной эксплуатации инструмента, сведя практически к нулю вероятность появления дефекта изготавливаемой при этом детали.

При разработке алгоритма управления исходили из двух общеизвестных фактов, первое: определяющее влияние на качество обрабатываемой поверхности оказывает износ лезвия режущего инструмента, в частности, износ по его задней главной поверхности h_3 , второе: продолжительность бездефектной обработки детали определяется индивидуальным ресурсом инструмента T , реализующимся в данных условиях его нагружения. Предельно допустимая величина износа $[h_3]$ и ресурс T связаны следующим соотношением [6]:

$$T = \frac{[h_3]}{V \cdot \gamma}. \quad (1)$$

Величина $[h_3]$ стандартизирована ($[h_3] = \text{const}$), поэтому управлять длительностью бездефектной эксплуатации инструмента (управлять его ресурсом T), как следует из соотношения (1), можно осуществлять только за счет изменения режима резания (изменения скорости резания V) и интенсивности износа γ . Целью варьирования этих параметров является соблюдение в процессе резания следующего условия:

$$T_{\text{Инд}} \geq T_{\text{ТР}}. \quad (2)$$

Требуемая по техпроцессу длительность обработки $T_{\text{ТР}}$ рассчитывается по следующей формуле [7]:

$$T_{\text{ТР}} = \frac{\pi D \cdot L}{1000 \cdot V_0 \cdot S_0}. \quad (3)$$

Величина индивидуального ресурса инструмента $T_{\text{Инд}}$ определяется в процессе параметрической идентификации модели тренда звука, проводимой по результатам измерения в режиме реального времени уровня звука $E_{3В}^{\Phi}$, сопровождающего процесс резания [5]. При этом модель составлена таким образом, что искомый параметр $T_{\text{Инд}}$ входит в ее математическую структуру в каче-

стве одного из ее коэффициентов. Идентификация заключается в минимизации невязки (4) расчетных $E_{3В}^P$ и фактических значений тренда (временного ряда) $E_{3В}^{\Phi}$ звука:

$$U = \sum_i^k \left[E_{3Вi}^{\Phi} - E_{3Вi}^P \right]^2. \quad (4)$$

Модель тренда звука описывается следующим выражением [8]:

$$E_{3В}^P = E_{3В0}^P \cdot \left(\frac{T_{\text{Инд}}}{T_{\text{Инд}} - \tau} \right)^{\alpha}. \quad (5)$$

Отметим, что математическая структура модели тренда аналогична уравнению кривой усталости:

$$\sigma = \sigma_{-1} \cdot \left(\frac{N_6}{N} \right)^{1/m}. \quad (6)$$

Графики выражений (5) и (6) зеркальны (рис. 1).

Выражение (5) представляет собой дробно рациональную степенную функцию. Эта функция претерпевает разрыв при исчерпании ресурса инструмента, т.е. при выполнении следующего условия:

$$\tau = T_{\text{Инд}}. \quad (6)$$

Интенсивность износа γ пропорциональна произведению усилия прижатия $P_{\text{пр}}$, действующего в трущейся паре, и скорости их относительного скольжения $V_{\text{СК}}$ [6]. Применительно к резанию это условие запишется следующим образом:

$$\gamma \sim P_{\text{РЕЗ}} \cdot V. \quad (7)$$

В данном случае трущейся парой являются рабочие поверхности инструмента и поверхность резания на заготовке. Сила резания определяется по следующей формуле [7]:

$$P_{\text{РЕЗ}} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}. \quad (8)$$

Составляющие силы резания $P_{x,y,z}$ определяются по эмпирической степенной зависимости вида [9]:

$$P_{x,y,z} = 10 \cdot C_p t^x S^y V^n K_p. \quad (9)$$

Значения коэффициентов и показателей степеней, содержащихся в (9), приводятся в соответствующих справочниках [7].

Разделив обе части неравенства (2) на требуемую длительность обработки $T_{\text{ТР}}$ с учетом выражений (1), (7), (9) и соблюдении условия $t = \text{const}$, получим

$$\frac{T_{\text{Инд}}}{T_{\text{ТР}}} = \frac{V(\tau)}{V_0} \cdot \frac{\gamma(\tau)}{\gamma_0} = \frac{V(\tau)}{V_0} \cdot \frac{P(\tau)V(\tau)}{P_0 V_0}. \quad (10)$$

Отняв от левой части равенства (10) его правую часть, и возведя получившееся при этом выражение в квадрат, получим выражение для целевой функции:

$$U = \left[\frac{T_{\text{Инд}}}{T_{\text{ТР}}} - \left(\frac{V(\tau)}{V_0} \right)^2 \cdot \frac{P(\tau)}{P_0} \right]^2. \quad (11)$$

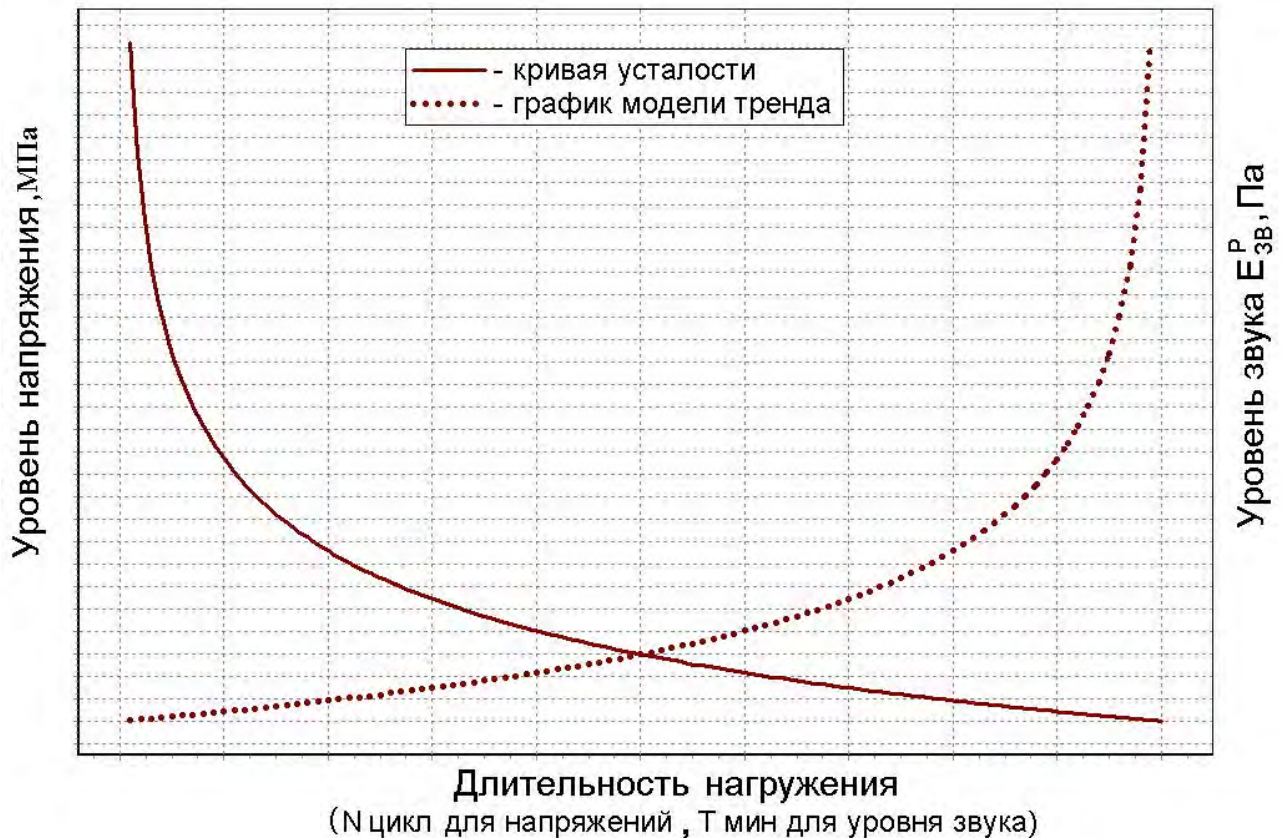


Рисунок 1 – Сравнение кривой усталости и графика модели тренда звука

Величина варьируемых параметров режима резания $V(\tau)$ и $P(\tau)$ выбирается из условия выполнения неравенства (2). При этом диапазон варьирования режимов резания ограничен степенью изменения силы резания. С учетом этого ограничения целевая функция (11) примет следующий вид:

$$U = \left[\frac{T_{\text{ИНД}}}{T_{\text{ТР}}} - \left(\frac{V(\tau)}{V_0} \right)^2 \cdot \frac{P(\tau)}{P_0} \right]^2 + \left[1 - \frac{P(\tau)}{P_0} \right]^2. \quad (12)$$

Адаптивное управление режимом лезвийной обработки осуществляется по следующему алгоритму:

- по принятой в технологии обработки металлов резанием методике [7] и в зависимости от класса адаптивной системы (система оптимизации или граничного регулирования) назначается исходный режим обработки, т. е. задаются исходные величины управляющих параметров: t_0 , S_0 , V_0 ;

- в режиме реального времени измеряется уровень звука $E_{\text{ЗВ}}^{\Phi}$, генерируемого процессом резания, и по результатам этих измерений осуществляется идентификация модели тренда, в число определяемых при этом параметров модели входит и численное значение искомого ресурса инструмента $T_{\text{ИНД}}$;

- если ресурс инструмента превышает требуемое для обработки детали (деталей) время, т.е. выполняется условие $T_{\text{ИНД}} > T_{\text{ТР}}$, то возможны два варианта развития событий:

- если резание осуществляется в условиях единичного или мелкосерийного производства дорогостоящих изделий, то резание продолжается на исходном режиме;

- если резание осуществляется в условиях серийного производства недорогостоящих деталей, то возможно форсирование (ужесточение) режимов резания с целью повышения производительности (решение принимает оператор);

- если же наблюдается соотношение $T_{\text{ИНД}} < T_{\text{ТР}}$, то для обоих типов производств режим резания изменяется таким образом, чтобы выполнить условие (2).

Причем при обработке длинномерных объектов требуемый ресурс $T_{\text{ТР}}$ принимается равным времени, необходимым для завершения текущего прохода $T_{\text{ТР}} (T_{\text{ТР}} = T_{\text{ПР}})$.

$$T_{\text{ПР}} = \pi D \cdot \frac{L_{\text{ДЕТ}}}{1000 \cdot S(\tau) V(\tau)}. \quad (13)$$

Для автоматизации системы адаптивного управления процессом резания, воспроизводящей данный алгоритм, основанный на новой методологии прогнозирования индивидуального ресурса режущего инструмента, в дополнение к штатной системе ЧПУ станка был разработан специальный аппаратно-программный комплекс.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

При металлообработке уровень оптимальности принятых режимов резания зависит от того, насколько точно начальная информация характеризует действительные условия протекания обработки. Другими словами, насколько изменяются: припуск, твердость обрабатываемого материала, жесткость обрабатывающей системы, износ инструмента и его ресурс, принятые при расчете и составлении техпроцесса и управляющей программы [1, 2].

В настоящее время работа большинства автоматизированных станков подчиняется «жесткому» программированию, ориентирующемуся на среднестатистические данные (нормы) износа инструмента и его стойкости [10–18]. Так, например, в зависимости от качества режущего инструмента его ресурс в одной партии колеблется от 15 до 35% от среднего значения. Если же время работы инструмента определяется худшим образцом в партии, то наиболее устойчивые образцы при фиксированной наработке используют свой ресурс, в лучшем случае, только на 65% [4]. При этом под ресурсом в соответствии с [9] понимается временной ресурс, равный наработке режущего инструмента от начала резания новым инструментом до достижения им предельного состояния.

По причине нестабильности ресурса инструмента основная часть процесса резания протекает либо с недоиспользованием возможностей режущего инструмента, либо не исключает появление брака детали из-за непредвиденного отказа инструмента [9]. Для борьбы с этими отказами предусматривается принудительная замена инструмента, в результате этого он снимается с эксплуатации преждевременно, имея существенный запас ресурса [10].

Контроль же состояния инструмента непосредственно в процессе резания с целью определения степени его критичности, а соответственно, и для прогнозирования его наработки до замены, является достаточно сложным процессом. Так, например, измерение износа лезвийного режущего инструмента надо проводить после каждого цикла обработки [19], но в этом случае сложно прогнозировать наступление критического состояния инст-

румента: предельного износа, выкрашивания, скола, поломки, а, тем более, осуществлять долгосрочные прогнозы для определения момента его замены. Подобный контроль требует, как правило, прерывания процесса обработки, что существенно снижает ее эффективность. Поэтому для оперативной диагностики нередко применяют косвенные методы, в частности, контролируют состояние инструмента по уровню звука, сопровождающего процесс резания [5].

Общим недостатком действующих методов прогнозирования, основанных на среднестатистических по природе нормативных величинах, является то, что они приводят к существенным погрешностям прогноза, что делает невозможным применение их при адаптивном управлении процессом резания.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Алгоритм адаптивного управления послужил основой для разработки программно-аппаратного комплекса (рис. 3). Программная часть комплекса отражает новую методологию прогнозирования ресурса инструмента и обеспечивает выбор оптимальных режимов резания, позволяющих продлить период бездефектной обработки заготовки. Программный продукт, построен по модульному принципу (рис. 2).



Рисунок 2 – Модули, из которых состоит программная часть

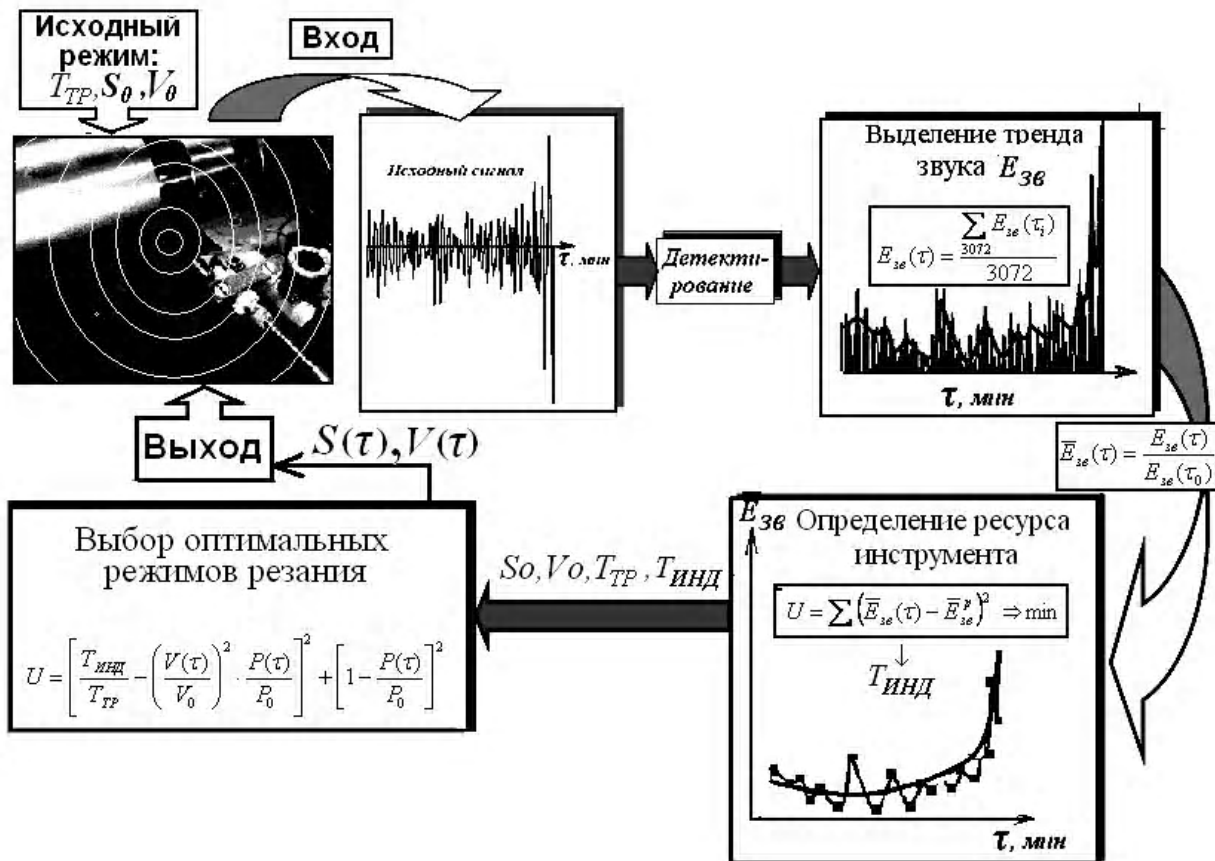


Рисунок 3 – Визуализация алгоритма функционирования программно-аппаратного комплекса

Модульний принцип побудови програмного продукту дозволяє гнучко змінювати його структуру применливо до особливостей підконтрольного об'єкта. Для забезпечення універсальності програмного комплексу по відношенню до апаратних засобів (рис. 3) він реалізований на кількох алгоритмічних мовах: Turbo Паскаль, Делфі, Сі і JAVA. Останній варіант комплексу розрахований на мікропроцесорні пристрої, що працюють на платформі Android.

Алгоритм функціонування комплексу в наглядній формі представлений на рис. 3. Комплекс забезпечує: реєстрацію, накопичення, обробку інформації і адаптивне управління на основі цього роботою підконтрольного обладнання. Відповідно до алгоритму функціонування програмно-апаратного комплексу його робота (рис. 3) починається з введення вихідних даних: режимів різання і геометричних параметрів заготовки і деталі, на основі яких розраховується необхідна тривалість роботи оброблюваної системи ($T_{\text{тр}}$).

Далі проводиться реєстрація амплітуди звукової хвилі і прогнозування індивідуального ресурсу ($T_{\text{інд}}$) інструмента. Якщо прогнозоване значення ресурсу перевищує необхідне ($T_{\text{інд}} > T_{\text{тр}}$), то обробка деталі продовжується на старих режимах. В протилежному випадку розраховуються режими роботи, що забезпечують виконання умови ($T_{\text{інд}} \geq T_{\text{тр}}$).

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Ефективність роботи автоматизованої системи адаптивного управління була перевірена в процесі токарної обробки заготовки на станку 16К20Т1, оснащеному ЧПУ. Кінематична схема станка дозволяє змінювати обороти шпинделя n на III режимі його роботи від 125 об/хв до 2000 об/хв, подачу S можна змінювати з кроком 0,01 мм/об від 0,01 до 2,8 мм/об.

Заготовка підвергалася полувисхідній обробці різцем з різальною пластинкою з твердого сплаву Т15К6 на наступних вихідних режимах: $V_0 = 63$ м/хв, ($n = 100$ об/хв), $S_0 = 0,5$ мм/об, $t_0 = 1,0$ мм. Режими вибиралися згідно з вимогами довідника [7]. Довжина деталі становила 310 мм, кількість проходів рівнялось трьом, діаметр заготовки становив 200 мм, а деталі – 194 мм. Показники степеней в формулі (9) мали наступні значення: $n_{P_x} = -0,4$ (для P_x); $n_{P_y} = -0,3$ (для P_y), $n_{P_z} = -0,15$ (для P_z); $y_{P_x} = 0,2$ (для P_x), $y_{P_y} = 0,8$ (для P_y), $y_{P_z} = 0,9$ (для P_z). Необхідна по технологічному процесу тривалість обробки (машинне час) $T_{\text{тр}}$ становила 18,6 хв.

Контроль звуку здійснювався неперервно в процесі обробки деталі з допомогою мікрофона, встановленого поблизу зони різання [5]. Сигнал з мікрофона (рис. 3) подавався на «звукову карту» комп'ютера, де підвергалася оцифровці і подальшій обробці. Згідно з викладеним вище алгоритму адаптивного управління процесом різання по результатам обробки звукового сигналу прогнозувався індивідуальний ресурс інструмента $T_{\text{інд}}$, і вибиралося, шляхом мінімізації цільової функції (12), оптимальне поєднання керуючих параметрів (швидкості різання $V(\tau)$ і продольної подачі $S(\tau)$, що забезпечують виконання умови (2).

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Результати експерименту наведені на рис. 4 і 5. На рис. 4 показано співвідношення між необхідною по технологічному процесу тривалістю обробки деталі $T_{\text{тр}}$ і прогнозованим індивідуальним ресурсом $T_{\text{інд}}$ інструмента, що відповідає навантаженню інструмента на вихідно прийнятних режимах (V_0 і S_0) різання.

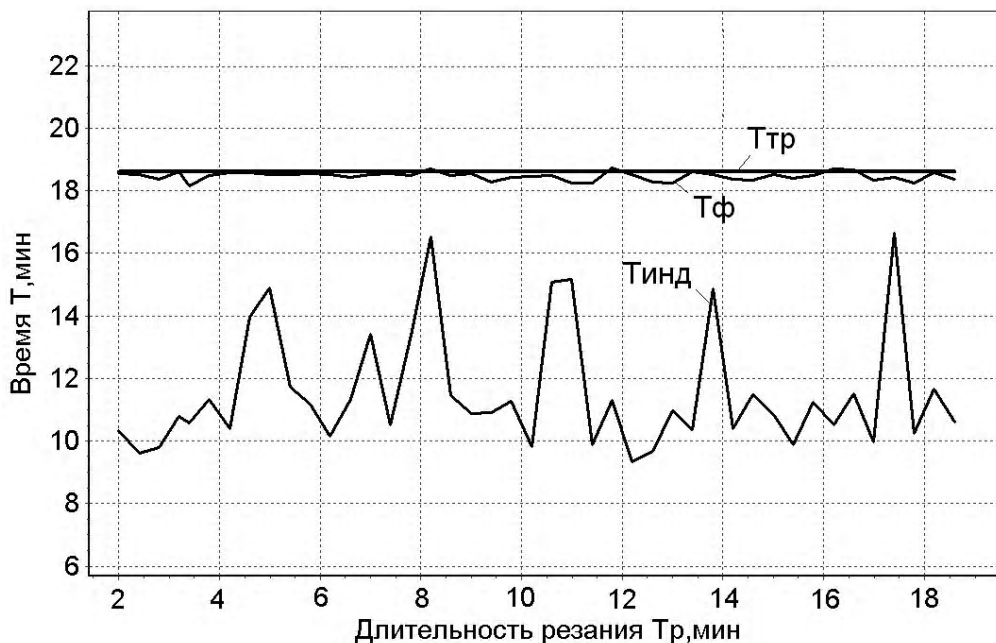


Рисунок 4 – Сопоставление требуемой длительности резания $T_{\text{тр}}$ с прогнозом индивидуального ресурса инструмента $T_{\text{інд}}$ и его скорректированным значением $T_{\text{ф}}$

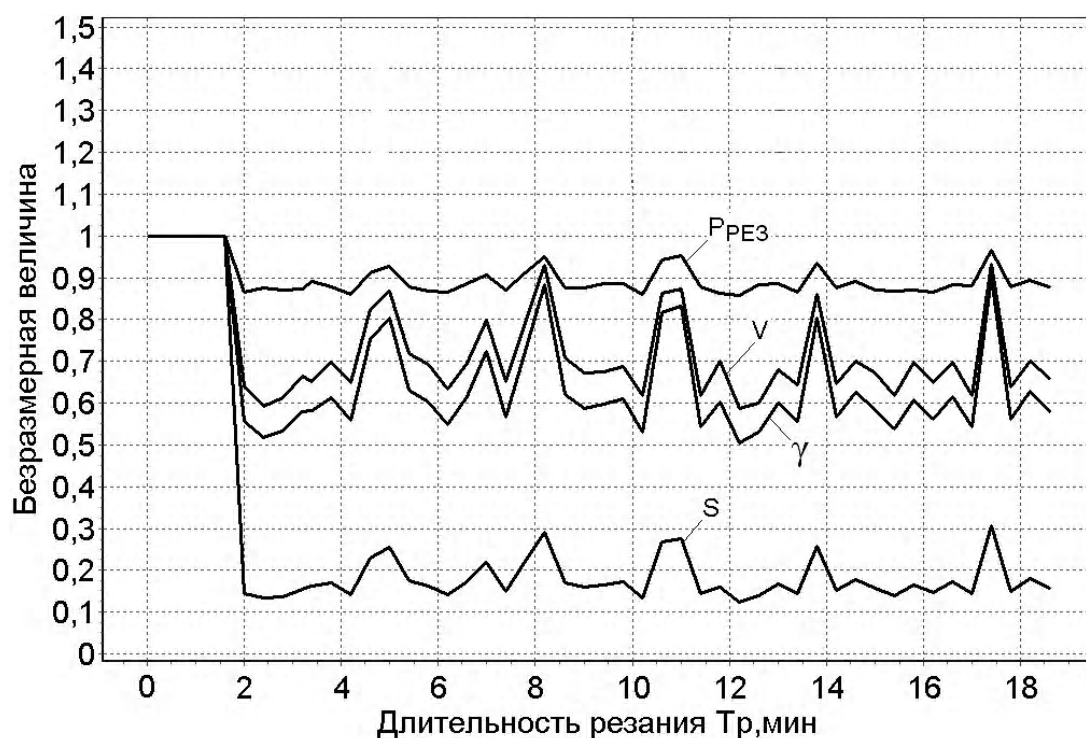


Рисунок 5– Изменение в процессе адаптивного управления регулируемых параметров $V(\tau)$, $S(\tau)$, а так же силы резания $P_{РЕЗ}$ и интенсивности износа γ

На рис. 5 приведены фактически реализованные режимы резания ($V(\tau)$ и $S(\tau)$), позволившие завершить обработку детали без замены инструмента и обеспечить тем самым выполнение в процессе резания условия (2). Фактически реализованная при этом длительность бездефектной обработки (скорректированное значение ресурса инструмента) T_{ϕ} приведена на рис. 4.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперимент показал, что в процессе обработки детали прогноз индивидуального ресурса $T_{инд}$ не превышает требуемой по техпроцессу длительности обработки $T_{тр}$ (рис. 4), т.е. условие (2) не выполнялось. При этом индивидуальный ресурс в среднем равнялся 12 мин, что составляло, порядка, 67% от требуемой длительности обработки. Для компенсации этого несоответствия потребовалось уменьшить соответственно на 33% интенсивность износа инструмента (рис. 5). Уменьшение интенсивности износа было обеспечено за счет уменьшения, порядка, на 30% скорости резания V и, в среднем, на 80% подачи. Изменение режимов резания привело к уменьшению, в среднем, на 10% силы резания $P_{РЕЗ}$ (рис. 5), в результате чего уменьшилась нагрузка на инструмент, способствующая, наряду с уменьшением скорости резания и подачи, продлению его ресурса и, соответственно, периода бездефектной обработки детали. Эксперимент показал, что наибольшему изменению подверглась подача S , оказывающая наиболее существенное влияние при неизменной глубине резания t на интенсивность износа инструмента (интенсивность его нагружения).

ВЫВОДЫ

В работе решена актуальная задача по разработке автоматизированной системы адаптивного управления

резанием, программное обеспечение которой впервые в практике управления станками с ЧПУ реализует новую методологию прогнозирования индивидуального ресурса режущего инструмента. Данная методология не предусматривает использование средне статистических по природе нормативных величин износа и ресурса (стойкости) инструмента. Методология предусматривает прогноз индивидуального ресурса инструмента, что обеспечивает эксплуатацию инструмента, исходя из его фактического состояния. Это позволяет избежать в практике резания в равной степени не желательные, как внезапный отказ инструмента, так и его преждевременную замену и соответственно предупреждать появление непредвиденного брака при изготовлении изделия.

Научная новизна изложенных в статье результатов исследований состоит в том, что впервые в практике управления объектами, математическая модель которых известна не полностью, а характеристики объекта не постоянны и непрерывно изменяются в зависимости от внутренних условий, удалось разработать и предложить для широкого применения в реальном производстве совершенно новую методологию прогнозирования ресурса режущего инструмента, послужившую основой для разработки автоматизированной системы адаптивного управления резанием. Алгоритм управления предусматривает сочетание в рамках единого процесса решение задач идентификации и управления. По результатам идентификации модели объекта, в качестве которой рассматривается модель тренда звука, сопровождающего процесс резания, определяется индивидуальный ресурс режущего инструмента, знание которого позволяет гибко варьировать режим резания с целью продления в заданных пределах срок бездефектной эксплуатации инструмента.

Практическая значимость полученных результатов заключается в разработке программного продукта и создании на основе этого программно-аппаратного комплекса, позволившего внедрить в практику резания в виде автоматизированной системы адаптивного управления резанием новую методологию прогнозирования ресурса рабочего органа технологических металлообрабатывающих систем.

Перспективы дальнейших исследований состоят в создании универсальной системы контроля любого технологического оборудования, работа которого сопровождается генерированием различных по физической природе информационных сигналов, объективно отражающих степень критичности технического состояния поднадзорного оборудования и служащих основой для прогнозирования согласно рассмотренной в статье новой методологии их индивидуального ресурса, отвечающего фактически складывающимся условиям их эксплуатации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы Сумского государственного университета «Моделі та інформаційні технології проектування і управління в складних системах» (номер государственной регистрации 0115U001569).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Адаптивное управление станками : монография / [Б. С. Балакшин, Б. М. Бозров, И. М. Баранчукова, В. П. Вороненко и др.], под ред. Б. С. Балакшина. – М. : Машиностроение, 1973. – 688 с.
- Никитина Л. Г. Адаптивное управление станками / Л. Г. Никитина // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 3. – С. 61–64.
- Koren Y. Adaptive Control Systems for Machining / Y. Koren // Manufacturing Review. – 1989. – Vol 2, № 1. – P. 6–15.
- Бибик В. Л. Методы прогнозирования долговечности режущих инструментов [Электрон. ресурс] / В. Л. Бибик. – Режим доступа: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=28853>.
- Залогова В. А. Контроль динамического состояния металлообрабатывающей технологической системы и прогнозирование ее ресурса : монография / В. А. Залогова, В. М. Нагорный, В. В. Нагорный. – Сумы : Изд-во Сумского гос. ун-та, 2016. – 241 с.
- Проников А. С. Надежность машин : монография / А. С. Проников. – М. : Машиностроение, 1978. – 592 с.
- Справочник технолога-машиностроителя / [В. Б. Борисов, Е. И. Борисов, В. Н. Васильев и др.]; под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 4-е изд. – М. : Машиностроение, 1986. – 656 с.
- Красножон Г. И. Определение ресурса и оценка технического состояния промышленного оборудования / Г. И. Красножон, В. В. Нагорный // Вибрация машин. Измерение, снижение, защита. – 2007. – № 4(11). – С. 38–42.
- Основы теории резания материалов: учебник / [Н. П. Мазур, Ю. Н. Внуков, А. И. Грабченко и др.]; под ред. Н. П. Мазура, А. И. Грабченко. – 2-е изд. – Х. : НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с.
- Мустафаев Г. А. Использование датчиков адаптивного управления для повышения качества обработки деталей на станке с ЧПУ / Г. А. Мустафаев, Е. В. Сидорчик // Молодой ученый. – 2013. – № 9. – С. 60–62.
- Шарабура С. Н. Система адаптивного управления процессом обработки деталей на станках с ЧПУ [Электрон. ресурс] / С. Н. Шарабура, В. В. Шевченко. – Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2014/>.
- Васильев С. В. ЭДС и температура резания / С. В. Васильев // Станки и инструмент. – 1980. – № 10. – С. 20–22.
- Остафьев В. А. Адаптивная система управления / В. А. Остафьев, Г. С. Тымчик, В. В. Шевченко // Механизация и автоматизация управления. – 1983. – № 1. – С. 18–20.
- Постников С. Н. Электрические явления при трении и резании : монография / С. Н. Постников. – Горький : Волго-Вят.кн.изд-во, 1975. – 280 с.
- Ярута С. П. Принципы создания систем адаптивного контроля технологических процессов для станков с ЧПУ [Электрон. ресурс] / С. П. Ярута, П. А. Усачев. – Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2012/04/11652>.
- Inamura T. Computer control of chattering in turning operation / T. Inamura, T. Senda, T. Sata // Annals of the CIRP. – 1977. – (1). – P. 181–186.
- Donahue E. J. Applications of adaptive control in the aerospace industry / E. J. Donahue // SME Paper. – 1976. – No. MS 76. – P. 274.
- Yen D. W. Adaptive control in machining – A new approach based on the physical constraints of tool wear mechanisms / D. W. Yen, P. K. Wright // ASME Journal of Engineering for Industry. – 1983. – № 105 (1). – P. 31–38.
- Чистяков А. В. Оптимизация эксплуатационно-технологических процессов в машиностроении / А. В. Чистяков, В. И. Бутенко, А. Я. Гоголев. – Новочеркасск : изд-во НГТУ, 1997. – 228 с.

Стаття надійшла до редакції 21.02.2017.

Після доробки 13.03.2017.

Нагорный В. В.

Канд. техн. наук, старший викладач кафедри комп'ютерних наук секції інформаційних технологій проектування, Сумський державний університет, Суми, Україна

АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ РЕЖИМАМИ РІЗАННЯ НА ОСНОВІ ПРОГНОЗУ ІНДИВІДУАЛЬНОГО РЕСУРСУ РІЖУЧОГО ІНСТРУМЕНТУ

Актуальність. У статті викладені результати досліджень по розробці нової методології прогнозування індивідуального ресурсу ріжучого інструменту, яка стала підґрунтям автоматизованої системи управління роботою металообробного обладнання. Прогнозування індивідуального ресурсу ріжучого інструменту є злободенною, але так і не вирішеною до сих пір проблемою, що і визначає актуальність викладеного в статті матеріалу.

Метою роботи є розробка методології прогнозування індивідуального ресурсу ріжучого інструменту і реалізація її в практиці управління різанням у вигляді алгоритму і програмного продукту, що склали основу автоматизованої системи адаптивного управління роботою металообробних технологічних систем.

Метод. Управління цих систем передбачає поєднання в рамках єдиного процесу вирішення завдань ідентифікації та управління. Ідентифікації піддається модель тренда інформаційного сигналу, що генерується в процесі роботи обробної системи, яка використовується в якості моделі, яка описує динаміку піднаглядного обладнання. За результатами прогнозування індивідуального ресурсу інструменту і зіставлення його з необхідною тривалістю механічної обробки, приймається рішення про варіюванні величин параметрів, що управляють (подачі і обертів шпинделя), та забезпечують реалізацію на новопризначених режимах необхідного періоду бездефектної експлуатації інструменту.

Результати. Розроблено програмний продукт, що склав основу автоматизованої системи адаптивного управління роботою металообробних технологічних систем, алгоритм роботи яких відображає запропоновану методологію прогнозування індивідуального ресурсу ріжучого інструменту.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили ефективність запропонованої методології прогнозування ресурсу ріжучого інструменту і працездатність апаратно-програмного комплексу, що реалізує дану методологію в практиці різання. Наукова новизна викладе-

них в статті результатів досліджень полягає в тому, що вперше в практиці машинобудування удалося розробити абсолютно нову методологію прогнозування індивідуального ресурсу робочого інструмента, що дозволяє цілеспрямовано керувати тривалістю перебігу технологічного процесу, орієнтуючись на фактичний технічний стан основного елемента технологічної системи. Практична значимість отриманих результатів полягає в створенні програмно-апаратного комплексу, що автоматизує процес адаптивного управління режимами різання і містить програмне забезпечення, яке відображає алгоритм нової методології прогнозування індивідуального ресурсу інструменту. Перспективи подальших досліджень полягають у створенні універсальної системи контролю будь-якого технологічного обладнання, робота якого супроводжується генеруванням різних за фізичною природою інформаційних сигналів, що об'єктивно відображають ступінь критичності технічного стану піднаглядного обладнання.

Впровадження подібної методології контролю не тільки в процес виготовлення, а й в умови експлуатації різних за конструкцією та призначенням машин і механізмів, вирішує проблему визначення індивідуального ресурсу технічних систем, яка давно стоїть на порядку денному, що і визначає цінність проведених досліджень і їх помітний внесок в науку управління.

Ключові слова: автоматизація, адаптивне управління, індивідуальний ресурс, програмний продукт, обробка різанням, обробні системи, прогноз ресурсу, ідентифікація, тренд інформаційного сигналу, математична модель, період бездефектної обробки.

Nahorny V. V.

PhD., Senior Lecturer of the Computer Science Department, Section of the Information Technologies, Sumy State University, Sumy, Ukraine

AUTOMATED CONTROL CUTTING BASED PREDICTION OF INDIVIDUAL LIFE OF THE CUTTING TOOL

Context. The article presents the results of research to develop a new methodology for the prediction of individual life of the cutting tool, which served as the basis for the automated operation of the control system of the metal cutting equipment. Predictions of individual life of the cutting tool is topical, but have not solved the problem so far, and this determines the relevance of the material contained in the article.

Objective. The goal of the work was to develop a methodology for forecasting the individual life of the cutting tool and implementing it in practice by cutting the control algorithm and software, which formed the basis of the automated system of adaptive control operation of metal-processing systems.

Method. The method provides for control of these systems in a single combination of process control solutions and identification tasks. Identification information signal subjected to the trend model generated during operation of the processing system, which is used as a model, describing the dynamics of the supervised equipment. As a result of the prediction of individual life of the cutting tool and compare it with the desired duration of mechanical treatment, a decision on the variation of the values of the control parameters (feed and spindle speed) to ensure the implementation of the newly appointed regimes required period of faultless operation of the tool.

Results. Developed software product that formed the basis of the automated system of adaptive control operation of metal-processing systems. The algorithm of the control systems reflects the proposed methodology for the prediction of individual life of the cutting tool.

Conclusions. The experiments confirmed the effectiveness of the proposed methodology for the prediction of the cutting tool life and performance of hardware and software that implements this methodology in practice cutting. Scientific novelty research is that for the first time in the practice of engineering develops a completely new control methodology for forecasting the individual life of the cutting tool, that allows you to specifically control the duration of the technological process, focusing on the actual technical condition of the main elements of the technological system.

The practical significance of the results is to create a hardware and software system that automates the process of adaptive management of cutting conditions and containing the software algorithm that reflects the new methodology for predicting an individual resource tool. Prospects for further research consists in the creation of a universal system of control of any process equipment, the operation of which is accompanied by the generation of different physical nature of the information signals, objectively reflecting the degree of criticality of the technical condition of the equipment under supervision. The introduction of such a monitoring methodology not only in the manufacturing process, but also in terms of exploitation of different machines determines the value of the research and their significant contribution to the science of control.

Keywords: automation, adaptive control, an individual resource, software, machining, processing system, prediction of individual life, identification, trend information signal, a mathematical model, the period of defect-free processing, the state of supervised equipment.

REFERENCES

1. Balakshin B. S., Bozrov B. M., Baranchukova I. M., Voronenko V. P. i dr. pod red. B. S. Balakshina. *Adaptivnoe upravlenie stankami : monografiya*, Moscow, Mashinostroenie, 1973, 688 p.
2. Nikitina L. G. *Adaptivnoe upravlenie stankami, Mashinostroenie i bezopasnost' zhiznedeyatelnosti*, 2011, No. 3, pp. 61–64.
3. Koren Y. *Adaptive Control Systems for Machining, Manufacturing Review*, 1989, Vol 2, No. 1, pp. 6–15.
4. Bibik V. L. *Metodyi prognozirovaniya dolgovrechnosti rezhuschih instrumentov* [Elektron. resurs]. *Rezhim dostupa: http://www.fundamental-research.ru/article/view?id=28853*.
5. Zaloga V. A., Nagornyy V. M., Nagornyy V. V. *Kontrol dinamicheskogo sostoyaniya metalloobrabatyvayushey tehnologicheskoy sistemy i prognozirovanie ee resursa : monografiya*. Sumy, Izd-vo Sumskogo gos. un-ta, 2016, 241 p.
6. Pronikov A. S. *Nadezhnost mashin : monografiya*. Moscow, Mashinostroenie, 1978, 592 s.
7. Borisov V. B., Borisov E. I., Vasilev V. N. i dr.; pod red. Kosilovoy A. G., Mescheryakova R. K. *Spravochnik tehnologa-mashinostroitel'ya*. 4-e izd. Moscow, Mashinostroenie, 1986, 656 p.
8. Krasnozhan G. I., Nagornyy V. V. *Opreделение resursa i otsenka tehnicheskogo sostoyaniya promyshlennogo oborudovaniya, Vibratsiya mashin. Izmerenie, snizhenie, zaschita*, 2007, No. 4(11), pp. 38–42.
9. Mazur N. P., Vnukov Yu. N., Grabchenko A. I. i dr.; pod red. Mazura N. P., Grabchenko A. I. *Osnovyi teorii rezaniya materialov: uchebnik*, 2-e izd. Har'kov, NTU «HPI», 2013, 534 p.
10. Mustafaev G. A., Sidorchik E. V. *Ispolzovanie datchikov adaptivnogo upravleniya dlya povysheniya kachestva obrabotki detaley na stanke s ChPU, Molodoy uchenyy*, 2013, No. 9, pp. 60–62.
11. Sharabura S. N., Shevchenko V. V. *Sistema adaptivnogo upravleniya protsessom obrabotki detaley na stankah s ChPU* [Elektron. resurs], *Rezhim dostup: http://web.snauka.ru/issues/2014*.
12. Vasilev S. V. *EDS i temperatura rezaniya, Stanki i instrument*, 1980, No. 10, pp. 20–22.
13. Ostafev V. A., Tyimchik G. S., Shevchenko V. V. *Adaptivnaya sistema upravleniya, Mehanizatsiya i avtomatizatsiya upravleniya*, 1983, No. 1, pp. 18–20.
14. Postnikov S. N. *Elektricheskie yavleniya pri trenii i rezanii : monografiya*. Gorkiy, Volgo-Vyat.kn.izd-vo, 1975, 280 p.
15. Yaruta S. P., Usachev P. A. *Printsipyi sozdaniya sistem adaptivnogo kontrolya tehnologicheskikh protsessov dlya stankov s ChPU* [Elektron. resurs]. *Rezhim dostupa: http://web.snauka.ru/issues/2012*.
16. Inamura T., Senda T., Sata T. *Computer control of chattering in turning operation, Annals of the CIRP*, 1977, (I), R. 181–186.
17. Donahue E. J. *Applications of adaptive control in the aerospace industry, SME Paper*, 1976, No. MS 76, P. 274.
18. Yen D. W., Wright P. K. *Adaptive control in machining – A new approach based on the physical constraints of tool wear mechanisms, ASME Journal of Engineering for Industry*, 1983, No. 105 (I), pp. 31–38.
19. Chistyakov A. V., Butenko V. I., Gogolev A. Ya. *Optimizatsiya ekspluatatsionno-tehnologicheskikh protsessov v mashinostroenii. Novocheerkassk, izd-vo NGTU*, 1997, 228 p.

¹Д-р техн. наук, доцент кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету водного господарства та природокористування, Рівне, Україна

²Канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету водного господарства та природокористування, Рівне, Україна

³Аспірант кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету водного господарства та природокористування, Рівне, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ РЕАКТОРІВ БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ СТОКІВ ПРИ КОНТРОЛІ КОНЦЕНТРАЦІЇ КИСНЮ

Актуальність. Вирішено актуальну задачу розроблення математичних моделей процесів очищення стічних вод, з урахуванням автоматизованого керування.

Мета роботи – розробка математичної моделі процесу очищення стічних вод від біологічних речовин іммобілізованими мікроорганізмами при багатоступеневому анаеробно-аеробному способі очищення, яка б враховувала процеси окислення органічних речовин, розмноження і відмирання бактерій як сукупність взаємодії різних факторів в залежності від концентрацій розчиненого у воді кисню та забруднюючих органічних речовин.

Метод. У роботі використано методи математичної фізики та гідродинаміки для побудови математичних моделей процесів очищення рідин, загальні підходи до побудови модельних задач, у яких одні складові домінують над іншими. Побудовано математичну модель процесу біологічного очищення стічних вод, що враховує зміну концентрацій забруднення, активного мулу і кисню при розмноженні та відмиранні бактерій в біологічних реакторах різного типу.

Результати. Знайдено розв'язок відповідної модельної задачі з використанням функції p середовища MatLab. Наведені результати розрахунків розподілу концентрації забруднення, активного мулу та кисню протягом часу очистки рідини, які враховують здатність бактерій до розмноження та відмирання.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили адекватність побудованої моделі. На основі отриманих результатів розроблено автоматизовану систему управління допустимою концентрацією забруднення у стічних водах, яка забезпечує енергозберігаючі принципи роботи установок.

Ключові слова: математична модель, біологічне очищення, зворотний вплив, контроль кисню, автоматизоване управління.

НОМЕНКЛАТУРА

$C(x, t)$ – концентрація забруднення;

$B(x, t)$ – концентрація активного мулу;

$K(x, t)$ – концентрація кисню, необхідна для підтримання життєдіяльності бактерій;

β – коефіцієнт, який враховує конструктивні особливості фільтра та швидкість потоку рідини;

V – об'єм реактора;

k_i – коефіцієнт рециркуляції активного мулу;

v_C – швидкість руху субстрату;

D_C – коефіцієнт дифузії (забруднення);

$K_B(B)$ – функція, яка характеризує поглинання кисню бактеріями;

v_B – швидкість руху активного мулу;

D_B – коефіцієнт дифузії (активний мул);

$K_K(B)$ – функція, яка характеризує обмін кисню;

K_0 – концентрація насичення води киснем при заданих температурі та тиску;

v_K – швидкість подачі кисню;

D_K – коефіцієнт дифузії (кисень);

$\varepsilon, K_B, K_B^0, K_K, K_K^0, d_C, d_B, d_K$ – тверді параметри (характеризують відповідні м'які параметри $K_B(B)$,

$K_K(B)$ тощо), що знаходяться експериментальним способом;

ε – малий параметр (він враховує переваги одних складників процесу над іншими, а саме: явища міжкомпонентної взаємодії процесу і є малим порівняно з іншими його складниками).

ВСТУП

Інтенсивний розвиток промисловості призводить до збільшення виробничих потужностей підприємств, що супроводжується погіршенням стану природних екосистем, зокрема, через недостатнє очищення промислових стоків, які є невід'ємною частиною харчового, мікробіологічного, фармацевтичного та багатьох інших виробництв. Кількість і різноманітність відходів залежать від профілю і асортименту продукції підприємства. Незалежно від типу всі стічні води потребують обов'язкового очищення, оскільки в них містяться забруднюючі речовини, які значно перевищують допустимі концентрації [1].

В залежності від концентрації забруднювачів у стічних водах для забезпечення відповідних допустимих показників і зменшення згубного впливу на довкілля використовують магнітні, механічні, біологічні та інші очисні системи. Одним з найчастіше застосовуваних методів є біологічне очищення [2, 3], де використовуються процеси аеробної очистки (додається повітря), анаеробної очистки (без доступу повітря).

В основі процесу біологічної очистки лежить деградація і окислення органічних речовин мікроорганізмами, а також здатність мікроорганізмів до розмноження та відмирання. При цьому активність бактерій і мікроорганізмів значно залежить від різних факторів, зокрема, від концентрації розчиненого в субстраті кисню. Сутте-

вим фактором, що впливає на ефективність очищення, є також концентрація активного мулу, яка регулюється рециркуляцією та відведенням надлишкового активного мулу для підтримання життєдіяльності мікроорганізмів.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для дослідження використаємо модельну задачу процесу очищення стічних вод від біологічних речовин іммобілізованими мікроорганізмами при багатоступеневому анаеробно-аеробному способі очищення запропонованому в [2]. Особливостями такої постановки задачі є те, що в системі рівнянь (1) введено ряд коефіцієнтів, які дозволяють описувати процеси окислення органічних речовин, розмноження і відмирання бактерій як сукупність взаємодії різних факторів в залежності від концентрацій розчиненого у воді кисню та забруднюючих органічних речовин з врахуванням конструктивних параметрів та граничних і початкових умов (2).

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} = D_C \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + v_C \frac{\partial C}{\partial x} - \beta C B, \\ \frac{\partial B}{\partial t} = D_B \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + v_B \frac{\partial B}{\partial x} + K_B(B) K, \\ \frac{\partial K}{\partial t} = D_K \frac{\partial^2 K}{\partial x^2} + v_K \frac{\partial K}{\partial x} + K_K(B) \cdot (K_H - K), \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} C|_{x=0} = C^*(t), \quad B|_{x=0} = B^*(t), \quad K|_{x=0} = K^*(t), \quad \frac{\partial C}{\partial x}|_{x=l} = 0, \\ \frac{\partial B}{\partial x}|_{x=l} = 0, \quad \frac{\partial K}{\partial x}|_{x=l} = 0, \end{aligned}$$

$$C|_{t=0} = C^*(x), \quad B|_{t=0} = B^*(x), \quad K|_{t=0} = K^*(x), \quad (2)$$

де $\beta = (Q \cdot (1 + k_i) / V)$, $D_C = d_C \varepsilon$, $K_B(B) = \beta (K_B - \varepsilon K_B^0 B)$, $D_B = d_B \varepsilon$, $D_K = d_K \varepsilon$.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Основною задачею керування процесом біологічної очистки є вилучення та стабілізація концентрації забруднень на допустимому рівні у відпрацьованих рідинах. Проте немає засобів прямого неперервного вимірювання даного показника, а результати отримують лише дослідним шляхом. Тому для аналізу ефективності очищення рідин використовують вимірювання ряду технологічних параметрів, на основі яких можна приймати рішення про величину концентрації органічних домішок у стічних водах та виробляти відповідні керуючі впливи.

Для покращення якості очищення стічних вод та зменшення затрат на очищення застосовують системи автоматизованого керування установками. Сучасні програмні засоби автоматизації дозволяють реалізувати енергозберігаючі технології, які за рахунок програмного керування реалізують економічні режими роботи очисних установок в періоди різної інтенсивності та концент-

рації надходження стоків на очищення. Для автоматизації очисних систем розробляють алгоритми, які підтримують оптимальні співвідношення між продуктивністю всієї установки та кількістю підведеного повітря виробленого компресорними установками, стабілізацією та відведенням надлишкового активного мулу і твердого осаду в який випадають бактерії після завершення своєї активної фази. Для автоматизації біологічних реакторів запропоновано ряд технологічних і проектних [4–6] рішень на основі загальних математичних моделей [5–15], недоліками яких є те, що вони описують лише процеси активної фази очищення. При цьому нехтуючи вагомим чинником, який впливає на якість очищення стічних вод – впливом споживання кисню на процеси життєдіяльності аеробних бактерій. Відповідно мета даної роботи є побудова математичної моделі процесу біологічного очищення стічних вод, що враховує зміну концентрацій забруднення, активного мулу і кисню при розмноженні та відмиранні бактерій в біологічних реакторах різного типу і на основі отриманих результатів розробити автоматизовану систему управління допустимою концентрацією забруднення у стічних водах.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

У роботі використано методи математичної фізики та гідродинаміки для побудови математичних моделей процесів очищення рідин, загальні підходи до побудови модельних задач, у яких одні складові домінують над іншими. Моделювання проведемо в програмному середовищі Matlab, використавши М-функцію *pdepe*, призначену для розв'язання одновимірних крайових задач для систем параболічних і еліптичних диференціальних рівнянь в частинних похідних (PDE) першого порядку по одній просторовій змінній і часу.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Оскільки для процесів розмноження та відмирання коефіцієнти набувають різних значень для моделювання використаємо 4 етапи: розмноження / відмирання / розмноження / відмирання. Кожен із них характеризується такими особливостями: на початковому етапі по всьому реактору встановлено рівномірну концентрацію активного мулу за заданим законом розподілено забруднення, відповідно до граничних та початкових умов. Вихідні дані першого етапу є вхідними для другого і отримуються шляхом апроксимації стандартними засобами Matlab. Для отримання розв'язку системи (1) за умов (2) перетворимо вхідні дані у відповідні машинні змінні:

```
Q=7.2;
ki=1;
V=0.7;
KK=0.001;
KB=100;
K0=6;
b=Q*(1+ki)/V;
V1=1.26; V2=1.92; V3=1.53;
D1=0.721; D2=10^-5; D3=10^-5;
c1=1;
c2=1;
```

```

c3=1;
f1=D1*DuDx(1)-u(1)*u(2)*b;
f2=D2*DuDx(2);
f3=D3*DuDx(3);
s1=V1*DuDx(1)-u(1)*u(2)*b;
s2=V2*DuDx(2)+u(3)*u(2)*b*KB;
s3=V3*DuDx(3)+u(3)*b+KK*u(1)*(K0-u(3));
c = [c1; c2; c3];
f = [f1; f2; f3];
s = [s1; s2; s3].
    
```

Для виклику функції *pdepe* виконаємо наступний код, в результаті якого отримуємо розрахунки першого етапу:

```

m = 0;
x = linspace(0,1,100);
t = linspace(0,0.1,100);
sol = pdepe(m,@pdex2pde,@pdex2ic,@pdex2bc,x,t);
u1 = sol(:,:,1);
u2 = sol(:,:,2);
u3 = sol(:,:,3).
    
```

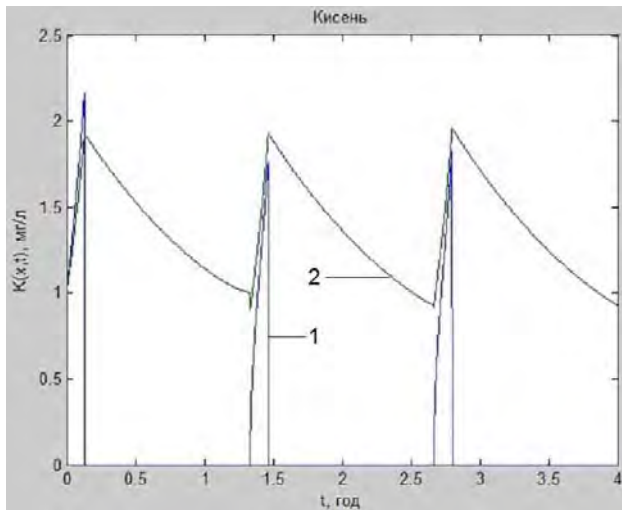
Після обчислень усіх етапів для наочності отриманих результатів їх представлено у вигляді графіків із застосуванням стандартних засобів побудови середовища Matlab.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

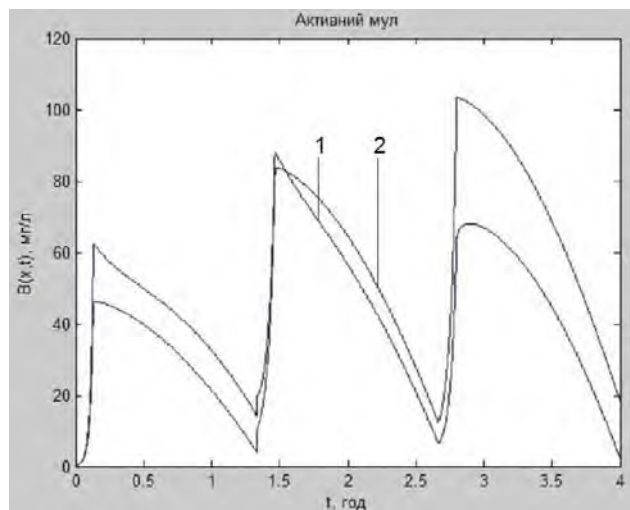
Шляхом комп'ютерного моделювання за наведеними вхідними даними: $L|_{t=0} = 50 - 15 \cdot e^{-x}$ г/л, $X|_{t=0} = 0,1$ г/л, $C|_{t=0} = 0,001$ г/л, $Q = 7,2$ м³/год, $V = 0,7$ м³, $C_0 = 6$ мг/л, $v_C = 1,26$ м/год, $v_B = 1,92$ м/год, $v_K = 1,26$ м/год, $D_C = 0,721$, $D_B = 10^{-5}$, $D_K = 10^{-5}$, отримали наступні результати (рис. 1–2).

6 ОБГОВОРЕННЯ

На рис. 1а показано, що на очищення поступають стоки з певною концентрацією забруднень і розчиненого у воді кисню. В реакторі за рахунок споживання кисню активним мулом його концентрація падає. Для забез-



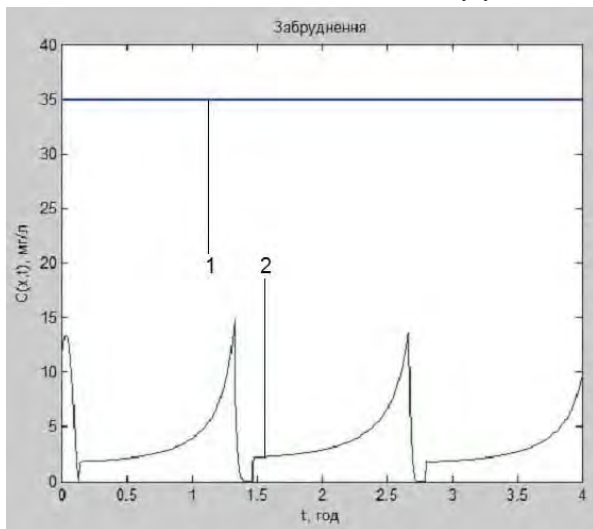
а



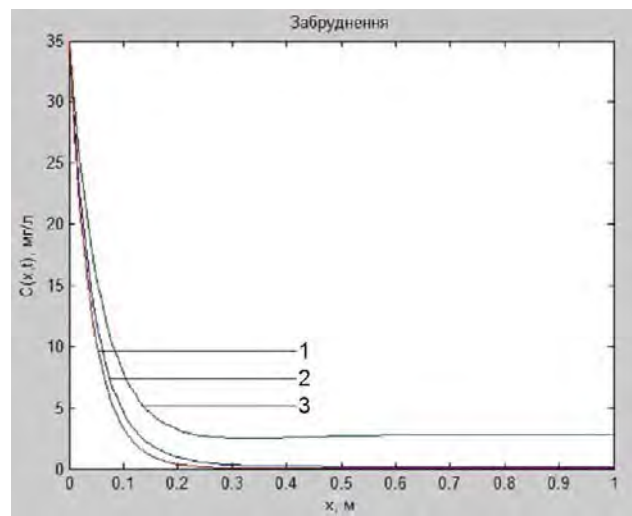
б

Рисунок 1 – Зміна концентрації кисню:

а – та активного мулу; б – із часом на вході – 1 та виході 2 – реактора



а



б

Рисунок 2 – Зміни концентрації забруднення:

а – з часом; б – та вздовж фільтра

печення життєдіяльності мікроорганізмів здійснюється періодична подача кисню зі стиснутим повітрям. Відповідно із змінами концентрації кисню відбуваються зміни концентрації активного мулу як показано на рис. 16. При постійному навантаженні забруднення на реактор отримано залежність зміни концентрації забруднюючих речовин на виході реактора рис. 2а (крива 2). По суті, отримані залежності є імпульсними перехідними характеристиками реактора за різними каналами зв'язків і характеризують динамічні властивості реактора як об'єкта управління. Вони є важливими результатами для розроблення алгоритму автоматизованого управління процесами в біологічних реакторах.

В очисних спорудах можуть використовуватися біологічні реактори різних типів (рис. 3). У залежності від кисневого режиму і виду мікрофауни активного мулу біологічні реактори виконують функції метатенків 2.1, окситенків 2.2 і аеротенків 2.3, яких може бути декілька. До складу технологічної схеми входять також приймальна камера 1, стабілізатор мулу 4, вторинний відстійник 2.4, вузол знезараження 8. Для ефективного контролю та оптимізації процесів біологічного очищення розроблена автоматизована система управління (АСУ). Дана система запроєктована на базі сучасних універсальних засобів автоматизації фірми Siemens, до складу якої входить контролер серії S7-300 і панель оператора, які

здійснюють функції вимірювання, контролю, регулювання, дискретного управління, візуалізації, архівування подій і параметрів процесу очищення стоків та формування аварійних повідомлень. Управління здійснюється за часовою програмою з корекцією за вимірюваними параметрами. Передбачено віддалений доступ з персонального комп'ютера.

До основних функцій АСУ відносяться підтримка заданих концентрацій розчиненого кисню та активного мулу у всіх резервуарах. Для забезпечення стабільної роботи очисної системи та управління використовуються сигнали не тільки вимірюваного кисню, але і витрати стічної води та швидкості споживання кисню в активній зоні аеротенків.

Автоматичне утримування необхідних параметрів біологічної очистки в умовах різких змін органічних і гідравлічних навантажень забезпечує високу якість очищення. В залежності від кількості стічних вод автоматично регулюється потужність установки, при цьому передбачено два рівні економних режимів, залежно від часу відсутності надходження стічних вод.

За допомогою керованих ерліфтів здійснюється багатоконтурна рециркуляція зворотного активного мулу, причому ступінь рециркуляції змінюється автоматично пропорційно кількості стічних вод, що надходять на установку для підтримки постійного навантаження на мул по

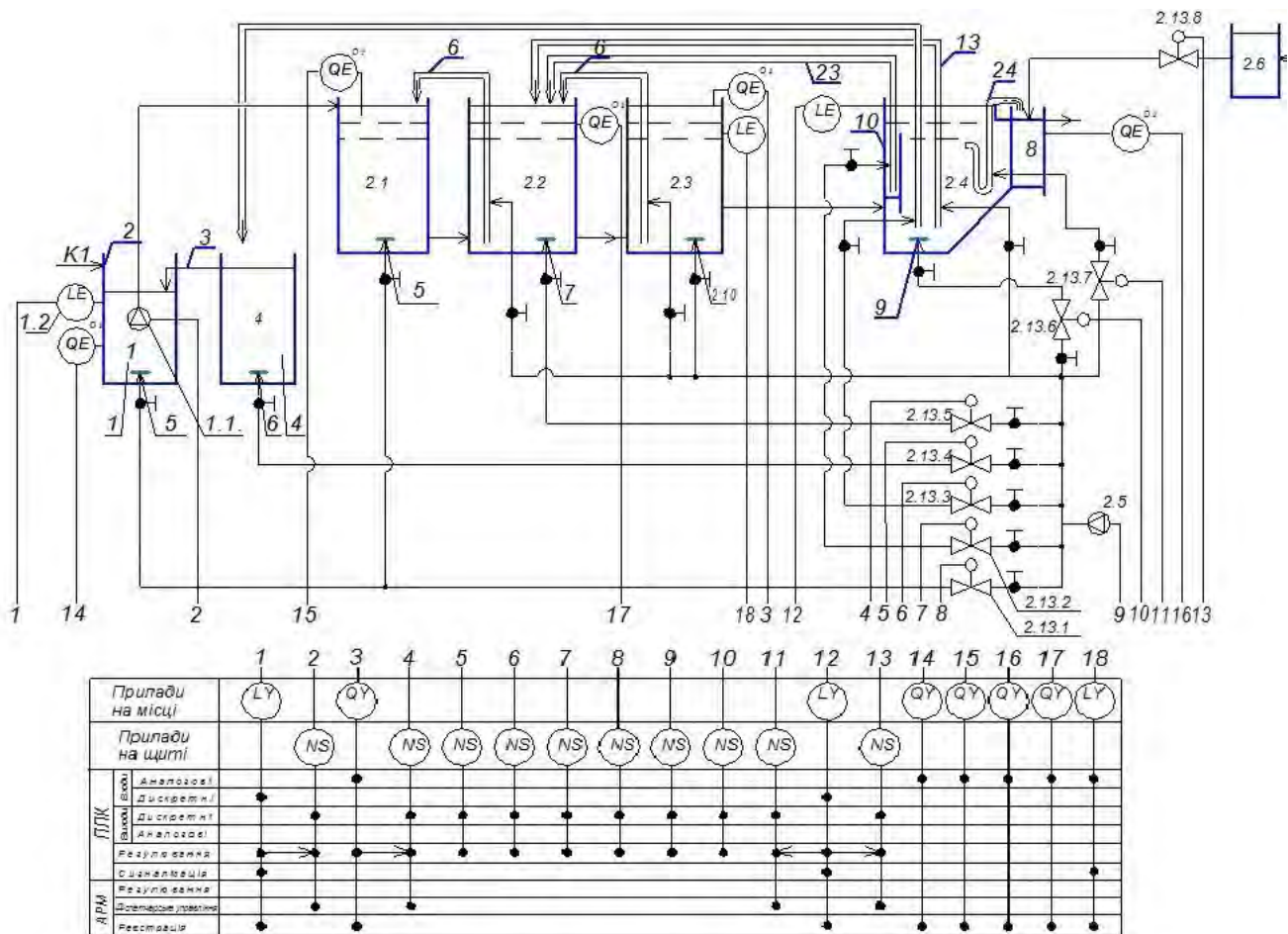


Рисунок 3 – Схема автоматизації установки біологічного очищення стічних вод

органічних речовинах. Видалення надлишкового активного мулу з вторинного відстійника забезпечує підтримку його оптимального віку.

ВИСНОВКИ

Побудовано математичну модель, що описує закономірності процесів зміни концентрацій забруднення, активного мулу і кисню при розмноженні та відмиранні бактерій в біологічних реакторах різного типу. Знайдено розв'язок відповідної модельної задачі з використанням функції `ode` середовища `MatLab`. Наведені результати розрахунків розподілу концентрації забруднення, активного мулу та кисню протягом часу очистки рідини, які враховують здатність бактерій до розмноження та відмирання. На основі отриманих результатів розроблено автоматизовану систему управління допустимою концентрацією забруднення у стічних водах. В алгоритмі управління реалізовано енергозберігаючі принципи, передбачено два рівні економних режимів установки.

ПОДЯКИ

Робота виконана у відповідності з планом науково-дослідних робіт Національного університету водного господарства та природокористування та Рівненського державного гуманітарного університету за темами: «Розвиток методів комплексного аналізу і теорії збурень моделювання нелінійних процесів з керуванням, ідентифікацією та оптимізацією» (№ держ. реєстр. 0116U00711), «Дослідження та удосконалення раціональної ресурсозберігаючої технології очищення підземних вод від сполук заліза для питного водопостачання» (№ держ. реєстр. 0116U003758).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Саблій Л. А. Багатоступенева анаеробно-аеробне очищення висококонцентрованих стічних вод / Л. А. Саблій // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. – 2009. – Вип. 4. – С. 185–192.
2. Сафоник А. П. Комп'ютерне моделювання процесу аеробно-очищення стічних вод / А. П. Сафоник, І. М. Таргоній // Проблеми машиностроєння. – 2016. – Т. 19, № 2. – С. 31–36.
3. Козачек А. В. Исследование математической модели процесса аэробной очистки сточных вод как стадия оценки качества окружающей водной среды / А. В. Козачек, И. М. Авдашин, В. А. Лузгачев // Вестн. Тамбовского государственного технического университета. – 2014. – Т. 19, Вып. 5. – С. 1683–1685.
4. Математическое моделирование и управление качеством очистки сточных вод / [С. А. Понкратова, В. М. Емельянов, А. С. Сироткин, М. В. Шулаев] // Вестн. Казанского технологического университета. – 2010. – № 5–6. – С. 76–85.
5. Нелінійні задачі типу фільтрація-конвекція-дифузія-масообмін за умов неповних даних / [А. Я. Бомба, В. І. Гаврилук, А. П. Сафоник, О. А. Фурсачик]. – Рівне : Національний університет водного господарства та природокористування, 2011. – 276 с.
6. Bomba A. Mathematical modeling of aerobic wastewater treatment in porous medium / Andrij Bomba, Andrij Safonyk // Zeszyty Naukowe WSInf. – 2013. – Vol. 12, Nr 1. – P. 21–29.
7. Adetola V. Adaptive estimation in nonlinearly parameterized nonlinear dynamical systems / V. Adetola, D. Lehrer, M. Guay // American Control Conf. on O'Farrell Street. – San Francisco, USA. – 2011. – P. 31–36.
8. Andrii Safonyk Mathematical design of process of water treatment by filter-clarifier with layer of hanging up sediment / Communications in Applied Analysis. – 2016. – 20. – P. 467–478.
9. Practical identifiability of ASM2d parameters-systematic selection and tuning of parameter subsets / [R. Brun, M. Kiihni, W. Gujer et al.] // Water Research. – 2002. – № 36. – P. 4113–4127.
10. Brune D. Optimal control of the complete-mix activated sludge process / D. Brune // Environmental Technology. – 1985. – № 6:11. – P. 467–476.
11. Dochain D. Dynamical modelling and estimation in wastewater treatment processes / D. Dochain, P. Vanrolleghem. – London : IWA Publishing, 2001. – 342 p.
12. Safonyk A. P. Modelling the filtration processes of liquids from multicomponent contamination in the conditions of authentication of mass transfer coefficient / A. P. Safonyk // International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences. – 2015. – Vol. 9. – P. 189–192.
13. Task group on mathematical modelling for design and operation of biological wastewater treatment. / M. Ilenze, W. Gujer, T. Mino et al. // Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. Scientific and Technical Report 9, IWA, London : IWA Publishing, 2000. – 122 p.
14. Knightes G. D. Statistical analysis of nonlinear parameter estimation for monod biodegradation kinetics using bivariate data / G. D. Knightes, G. A. Peters // Biotechnol. Bioeng. 69. – 2000. – № 2. – P. 160–170.
15. Ghai Q. Modeling, estimation and control of biological wastewater treatment plants / Q. Ghai // Doctoral Theses at NTNU 2008:108 at IIT, Porsgrunn. Telemark University College, – 2008. – 187 p.
Стаття надійшла до редакції 17.01.2017.
Після доробки 06.03.2017.

Сафоник А. П.¹, Клепач Н. И.², Таргоний И. Н.³

¹Д-р техн. наук, доцент кафедри автоматизації, електротехнічних і комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету водного господарства та природопольовання, Рівне, Україна

²Канд. физ.-мат. наук, доцент кафедри автоматизації, електротехнічних і комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету водного господарства та природопольовання, Рівне, Україна

³Аспирант кафедри автоматизації, електротехнічних і комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету водного господарства та природопольовання, Рівне, Україна

ИССЛЕДОВАНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ РЕАКТОРОВ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОКОВ ПРИ КОНТРОЛЕ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА

Актуальность. Решена актуальная задача разработки математических моделей процессов очищения сточных вод, с учетом автоматизированного управления.

Цель работы – разработка математической модели процесса очистки сточных вод от биологических веществ иммобилизованными микроорганизмами при многоступенчатом анаэробно-аэробном способе очистки, которая бы учитывала процессы окисления органических веществ, размножение и отмирание бактерий как совокупность взаимодействий разных факторов в зависимости от концентраций растворимого в воде кислорода и загрязняющих органических веществ.

Метод. В работе использованы методы математической физики и гидродинамики для построения математических моделей процессов очистки жидкостей, общие подходы к построения модельных задач, в которых одни составные доминируют над другими. Построена

математическая модель процесса биологической очистки сточных вод, которая учитывает изменение концентрации загрязнения, активного ила и кислорода при размножении и отмирании бактерий в биологических реакторах разного типа.

Результаты. Найдено решение соответствующей модельной задачи с использованием функции рдере среды Matlab. Приведенные результаты расчетов распределения концентрации загрязнения, активного ила и кислорода на протяжении времени очистки жидкости, которые учитывают способность бактерий к размножению и отмиранию.

Выводы. Проведенные эксперименты подтвердили адекватность построенной модели. На основе полученных результатов разработана автоматизированная система управления допустимой концентрацией загрязнения в сточных водах, которая обеспечивает энергосберегающие принципы работы установки.

Ключевые слова: математическая модель, биологическая очистка, обратное влияние, контроль кислорода, автоматизированное управление.

Safonyk A. P.¹, Klepach M. I.², Targoniy I. M.³

¹Dr. Sc., Associate Professor, Professor of Department of Automation, Electrical and Computer-Integrated Technologies, National University of Water and Environment Management, Rivne, Ukraine

²PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Automation, Electrical and Computer-Integrated Technologies, National University of Water and Environment Management, Rivne, Ukraine

³Postgraduate Student, Department of Automation, Electrical and Computer-Integrated Technologies, National University of Water and Environment Management, Rivne, Ukraine

RESEARCH AND AUTOMATION OF BIOLOGICAL REACTORS OF EFFLUENT WITH THE OXYGEN CONCENTRATION CONTROL

Context. The actual problem of development of mathematical models of processes of wastewater treatment, subject to automatic control was resolved.

Objective to develop a mathematical model of the process of wastewater treatment from biological substances immobilized microorganisms in multistage anaerobic-aerobic method of purification which takes into account the oxidation of organic matter, reproduction and death of bacteria as a set of interaction of various factors, depending on the concentration of dissolved oxygen and pollutants organic matter.

Method. We used the methods of mathematical physics and hydrodynamics to build mathematical models of processes of cleaning fluids, common approaches to building model problems in which some components dominate over others. The mathematical model of biological wastewater treatment was built. It takes into account the changes in the concentrations of pollution, sludge and oxygen in reproduction and the withering away of the bacteria in biological reactors of various types.

Results. The solution of corresponding model problem was found by using functions pdepe environment MatLab. The results of calculations of concentration distribution of contamination, sludge and oxygen cleaning fluid over time were shown. It takes into account the ability of bacteria to multiply and dying.

Conclusions. The experiments confirmed the adequacy of the constructed model. Based on the results, the automated control system was developed. It controls permissible concentration of pollution in wastewater, which provides energy-saving principles of installation.

Keywords: mathematical model, biological treatment, the opposite effect, control of oxygen, automated control.

REFERENCES

1. Sablii L. A. Bahatostupeneva anaerobno-aerobne ochyshchennia vysokontsentrovanykh stichnykh vod, *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia*, 2009, Vyp. 4, pp. 185–192.
2. Safonyk A. P., Tarhoni I. M. Kompiuterne modeliuвання protsesu aerobnoho ochyshchennia stichnykh vod, *Problemy mashinostroeniya*, 2016, Vol. 19, No. 2, pp. 31–36.
3. Kozachek A. V., Avdashin I. M., Luzgachev V. A. Isledovanie matematicheskoy modeli protsessa aerobnoy ochistki stochnykh vod kak stadiya otsenki kachestva okruzhayushey vodnoy sredy, *Vestn. Tambovskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*, 2014, Tom 19, Vyp. 5, pp. 1683–1685.
4. Ponkratova S. A., Emelyanov V. M., Sirotkin A. S., Shulaev M. V. Matematicheskoe modelirovanie i upravlenie kachestvom ochistki stochnykh vod, *Vestn. Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*, 2010, No. 5–6, pp. 76–85.
5. Bomba A. Ya., Havryliuk V. I., Safonyk A. P., Fursachy O. A. Neliniini zadachi typu filtratsiia-konveksiia-dyfuziia-masoobmin za umov nepovnykh danykh. Rivne, Natsionalnyi universytet vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia, 2011, 276 p.
6. Bomba A., Safonyk A. Mathematical modeling of aerobic wastewater treatment in porous medium, *Zeszyty Naukowe WSInf*, 2013, Vol. 12, Nr 1, pp. 21–29.
7. Adetola V., Lehrer D., Guay M. Adaptive estimation in nonlinearly parameterized nonlinear dynamical systems, *American Control Conf. on O'Farrell Street*. San Francisco, USA, 2011, pp. 31–36.
8. Andrii Safonyk Mathematical design of process of water treatment by filter-clarifier with layer of hanging up sediment, *Communications in Applied Analysis*, 2016, 20, pp. 467–478.
9. Brun R., Kiihni M., Gujer W. et al. Practical identifiability of ASM2d parameters-systematic selection and tuning of parameter subsets, *Water Research*, 2002, No. 36, pp. 4113-4127.
10. Brune D. Optimal control of the complete-mix activated sludge process, *Environmental Technology*, 1985, No. 6:11, pp. 467–476.
11. Dochain D., Vanrolleghem P. Dynamical modelling and estimation in wastewater treatment processes. London, IWA Publishing, 2001, 342 p.
12. Safonyk A. P. Modelling the filtration processes of liquids from multicomponent contamination in the conditions of authentication of mass transfer coefficient, *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 2015, Vol. 9, pp. 189–192.
13. Ilenze M., Gujer W., Mino T. et al. Task group on mathematical modelling for design and operation of biological wastewater treatment, Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. Scientific and Technical Report 9, IWA, London, IWA Publishing, 2000, 122 p.
14. Knights G. D., Peters G. A. Statistical analysis of nonlinear parameter estimation for monod biodegradation kinetics using bivariate data, *Biotechnol. Bioeng.* 69, 2000, No. 2, pp. 160–170.
15. Ghai Q. Modeling, estimation and control of biological wastewater treatment plants, *Doctoral Theses at NTNU 2008:108 at IliT, Porsgrunn. Telemark University College*, 2008, 187 p.

Наукове видання

**Радіоелектроніка,
інформатика,
управління**

№ 3/2017

Науковий журнал

Головний редактор – д-р техн. наук С. О. Субботін

Заст. головного редактора – д-р техн. наук Д. М. Піза

Комп'ютерне моделювання та верстання
Редактор англійських текстів

С. В. Зуб
С. О. Субботін

Оригінал-макет підготовлено у редакційно-видавничому відділі ЗНТУ

Свідоцтво про державну реєстрацію
КВ № 6904 від 29.01.2003.

*Підписано до друку 12.10.2017. Формат 60×84/8.
Папір офс. Різогр. друк. Ум. друк. арк. 23,02.
Тираж 300 прим. Зам. № 850.*

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

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