

Евразийский Союз Ученых. Серия: технические и физико-математические науки

Ежемесячный научный журнал
№ 9 (112)/2023 Том 1

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Макаровский Денис Анатольевич

AuthorID: 559173

Заведующий кафедрой организационного управления Института прикладного анализа поведения и психолого-социальных технологий, практикующий психолог, специалист в сфере управления образованием.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

• **Штерензон Вера Анатольевна**

AuthorID: 660374

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт новых материалов и технологий (Екатеринбург), кандидат технических наук

• **Синьковский Антон Владимирович**

AuthorID: 806157

Московский государственный технологический университет "Станкин", кафедра информационной безопасности (Москва), кандидат технических наук

• **Штерензон Владимир Александрович**

AuthorID: 762704

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт фундаментального образования, Кафедра теоретической механики (Екатеринбург), кандидат технических наук

• **Зыков Сергей Арленович**

AuthorID: 9574

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Отдел теоретической и математической физики, Лаборатория теории нелинейных явлений (Екатеринбург), кандидат физ-мат. наук

• **Дронсейко Виталий Витальевич**

AuthorID: 1051220

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Кафедра "Организация и безопасность движения" (Москва), кандидат технических наук

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке ссылка на журнал обязательна. Материалы публикуются в авторской редакции.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Художник: Валегин Арсений Петрович
Верстка: Курпатова Ирина Александровна

Адрес редакции:
198320, Санкт-Петербург, Город Красное Село, ул. Геологическая, д. 44, к. 1, литера А
E-mail: info@euroasia-science.ru ;
www.euroasia-science.ru

Учредитель и издатель ООО «Логика+»
Тираж 1000 экз.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Vo Xung Ha, Nguyen Trung Kien, Nguyen Phung Bao</i> CALCULATING THE OPTIMAL NUMBER OF LAYERS FOR SEPARATING RADAR IMAGES OF MARINE OBJECTS BY LEVEL.....3	<i>Мельников В.С.</i> СТАТИСТИКА ПОЖАРОВ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК.....27
<i>Бондарчук В.В., Кравченко Н.М.</i> ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ10	<i>Сафиулин И.А.</i> РУЛЕВОЕ УПРАВЛЕНИЕ, РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА В ЭЛЕКТРОМОБИЛЕ 4X4 С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПРИВОДА НА КАЖДОЕ КОЛЕСО.38
<i>Vasilyev P.S., Reva L S.</i> CRITICAL HEAT FLOW AT LIQUID DROPLET BOILING. 13	<i>Серикулы Ж., Кумисбеков С.А., Муталов Н., Сериков А.С.</i> ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОЦЕСС ВИХРЕОБРАЗОВАНИЯ43
<i>Зейналов Дж.И., Алийев М.Э., Касумов Г.А., Аждарова Н. Дж.</i> НЕЧЕТКИЕ МНОЖЕСТВА И СКОРОСТЬ ЕЕ ИЗМЕНЕНИЯ 18	<i>Малютин Н.Д., Суторихин В.А.</i> ОСОБЕННОСТИ ДЕФЕКТОВ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ СВЧ СЕНСОРОМ НА ЭФФЕКТЕ ГОРБУНОВА.47
<i>Иванников А.Д.</i> ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОЕКТОВ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ..... 21	

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Мусаев А.М.</i> ПРИБЛИЖЕНИЯ МНОГОКРАТНО ДИФФЕРЕНЦИРУЕМЫХ ФУНКЦИЙ ДВОЙНЫМИ СИНГУЛЯРНЫМИ ИНТЕГРАЛАМИ МЕЛЛИНА 50	<i>Паршутина Е.Г.</i> О РЕЗУЛЬТАНТЕ МНОГОЧЛЕНОВ С ЦЕЛЫМИ РАЦИОНАЛЬНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ.54
---	---

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.396.67.012.12; 621.396.67.091

CALCULATING THE OPTIMAL NUMBER OF LAYERS FOR SEPARATING RADAR IMAGES OF MARINE OBJECTS BY LEVEL

Vo Xung Ha

M.Sc., Radar Institute, Cau Giay, Hanoi, Vietnam

Nguyen Trung Kien

Ph.D., Academy of Military Science and Technology, Cau Giay, Hanoi, Vietnam

Nguyen Phung Bao

Ph.D., Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam

Во Сунг Ха

м.т.н, Институт радиолокации, Кау Зай, Ханой,

Социалистическая Республика Вьетнам

Нгуен Чунг Киен

к.т.н, Академия военных наук и технологий,

Кау Зай, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам

Нгуен Фунг Бао

к.т.н, Технический университет им. Ле Куи Дона,

Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам

ABSTRACT

This paper investigates the optimal number of layers for separating radar images of marine targets by level, serving for real-time estimating targets' center of gravity coordinates based on radar image processing. This solution enhances the performance of tracking surface targets without changing the hardware architecture of radar.

АННОТАЦИЯ

В статье приведен расчет оптимального количества слоев разделения радиолокационных изображений морских объектов по уровням для оценки координат центра морской цели в реальном времени на основе обработки радиолокационного изображения с целью повышения производительности сопровождения надводных целей без изменения аппаратной архитектуры радиолокационной станции.

Keywords: center coordinates, marine targets tracking, radar image processing.

Ключевые слова: координаты центра, сопровождение морских целей, обработка радиолокационных изображений.

1. Introduction

To ensure timely command and control of troops, the system processing radar information for tracking marine targets must solve the following tasks:

- Calculating target parameters, such as coordinates, direction, speed, and size estimates;
- Real-time tracking: the change in target parameters should be estimated as close as possible to the measured parameters;
- Timely warning of a sudden change in the direction or speed of the vessel;
- Tracking a large number of objects: all ships must be marked in the radar coverage area;
- Ensuring correct operation in intense sea conditions;
- Distinguish objects with intersecting trajectories.

The above parameters need to be calculated in the tracking algorithm, but this task is difficult due to the extensive computation. The algorithm for tracking a target using radar images can be divided into the following four stages:

- Preprocessing of radar images;
- Clustering of target plots and assessment of their parameters;
- Predicting the position of the target plots based

on the values of previous parameters;

- Managing cases where targets have intersecting orbits or are close to each other.

Pre-processing of radar images. In this phase, collecting data from the radar station produces a radar image, and each plot has an intensity value ranging from 0 to 255. This image is then processed to filter out background noise. The image, filtered by background noise, is layered, and then the 8-bit plot matrix is converted into a smaller matrix, typically 2 (or 3 bits). This means that each plot only receives values from 0 to 3 (or 0 to 7), 0 corresponding to an area without a target, and 3 (or) corresponding to a high probability target.

There are many filtering methods used in tracking problems. Filter choices depend on the weather and the parameters of the tracked targets, and the binary threshold is commonly used. However, using a fixed threshold binary imaging method and a spot detection algorithm [1] for a distant target, the weak intensity of the reflected signal may be ignored when the threshold is high. Conversely, if the selected threshold value is too low, it will result in background noise that cannot be removed during processing. Processing and separating radar images into levels allows the creation

of a detection threshold that adapts to intensity, reducing the likelihood of missing the targets. The method of setting multiple thresholds can be considered a modified form of the CFAR algorithm.

In this paper, we explore the optimal number of layers that images need to be divided into different intensity levels to achieve high performance in detecting and clustering targets, as well as determining the center coordinates and size of the image. The authors will analyze representative target layers to select the optimal number of radar image segmentation layers.

Clustering plots and calculating their parameters. After pre-processing the radar image, the plots will be analyzed and clustered. This group of plots will then be considered as the target location, and parameters such as image center and size will be estimated. The commonly used clustering algorithm is K-means. The problem is to define a method for calculating the center coordinates of a target under the assumption that the plots have been successfully clustered. The authors propose using a combination of intensity values and center coordinates of plots to increase the stability of estimating the center coordinates of the target.

Predicting the location of the target plot. The calculating target parameters significantly affect the construction of a tracking trajectory. Many different trajectory-tracking filtering algorithms can be used for trajectory estimation, such as the Wiener filter [2] and types of Kalman filters [2-4]. Among them, Kalman filters are widely used due to their high superiority. Note that it is necessary to pay attention to cases where

targets have intersecting orbits or are close to each other. The problem in this case is that at a certain point in time, the tracking gates of two targets with similar characteristics intersect, which makes it challenging to select a plot. This work will not consider the problem of predicting the position of target plots in which targets have intersecting orbits.

The article is structured as follows: Part 1 – “Introduction”; Part 2 – “Description of the radar database”; Part 3 - “Determination of the optimal number of layers for dividing a radar image by levels”; Part 4 – “Conclusions.”

2. Description of the radar database

The radar image (Fig. 1) has a large size of 18500x1650 pixels, which corresponds to 18500 range cells with a resolution of 10 m and 1650 azimuth cells with a resolution of 0.22°, which increases the size of the entire radar screen to 30525000 pixels. In the observation area of a radar station, the number of sea vessels is enormous, including most fishing vessels, cargo ships, and container ships. Etc. Due to the different sizes of vessels, the size of the radar image on the screen is also different. However, most output target images are distributed across multiple ranges and azimuth pixels with different colors depending on the level of energy reflected from the radar. Thus, in the case of radar images, the large number of pixels and targets on the radar screen requires a lot of processing. Therefore, there is a need for an efficient algorithm for detecting and estimating target coordinates that can meet the fast and accurate requirements of control and monitoring applications.

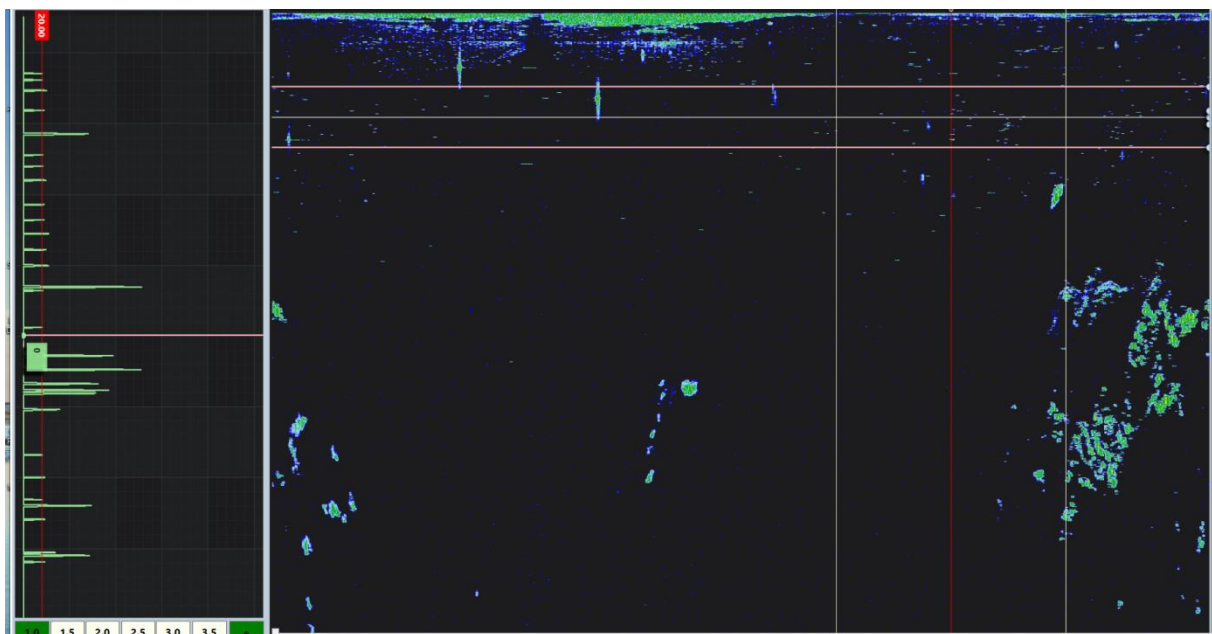


Figure 1. X-band radar screen

Figure 2 shows an image area with multiple targets (right) and a 3D image of a manually selected target for analysis (left). A study of this image over several cycles shows that the large naval target has many local edge regions (protruding, sharp areas in the image) that are relatively stable and correspond to antenna and

command tower locations, as well as metal structures on ships. Thus, these local edge regions can be used to determine the center coordinates of the target to improve the stability of the center coordinates in the tracking task.

To comprehensively analyze the characteristics of

target types in the surveillance area, this paper uses three target classes to represent the target types in the surveillance area. Data on these targets is collected continuously over 15 radar scan cycles. Based on the analysis results of these three classes of targets, the paper will propose a plan for the real-time processing of all targets in the radar observation space.

The article uses data from six targets, designated TG1, TG2, TG3, TG4, TG5, and TG6, in which targets TG1, TG2 represent the fishing vessel class, TG3, TG4 represent the cargo ship class, TG5, and TG6 represent the container ship class. The target parameters are described in Table 1. The image data of a radar target at sea is a matrix of markers A of size N rows, M columns (Fig. 4). There:

- Plot matrix elements A_{nm} $[n, m, \rho_{nm}]$,

$n = \overline{1 \dots N}, m = \overline{1 \dots M}$ – a pixel located in the distance pixel x_n and azimuth pixel y_m , has an intensity value ρ_{nm} from 0 up to 255.

- A high-resolution target has many plots (a set of A_{ij} values with extreme intensity compared to the surrounding area - Figure 2). After each scanning cycle, the target image size and pixel intensity values change due to fluctuations in the reflected signal from the radar target.

- Each target type will have a different image size depending on the physical size of the target. Small fishing vessels occupy the smallest number of pixels (from 30 to 60 pixels), and cargo ships have the average number of pixels (from 100 to 150 pixels); large container ships have, on average, the largest number of pixels (from 300 to 400 pixels - Table 1).

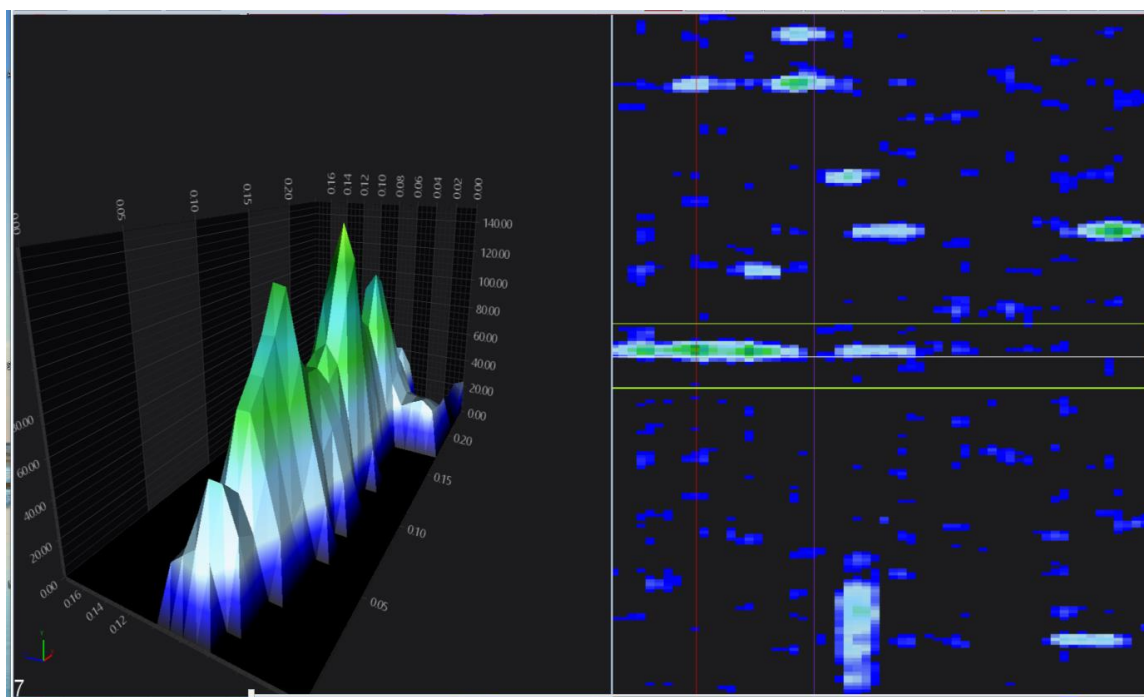


Figure 3. Target image on the radar screen

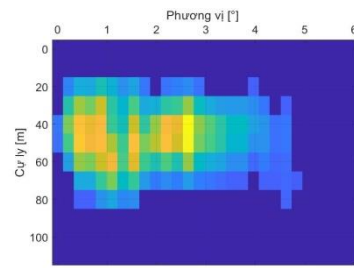
Table 1.

Marine target parameters.						
Target	TG1	TG2	TG3	TG4	TG5	TG6
Range (km)	40,1	15,7	45,3	104,4	47,7	103,6
Speed	2,78	0,94	2,5	0,94	19,2	14,9
Type	Fishing vessel	Fishing vessel	Cargo ship	Cargo ship	Container	Container
Average number of pixels	40	40	117	120	400	320

In Figure 3, the radar image of the target is located in the area with the range coordinate from 4539 to 4545, and azimuth coordinate from 1181 to 1203. The radar

has a resolution of 10m in range, 0.22° in azimuth, and the size of the radar image of the target at a range of about 60 m and in azimuth about 4.84°.

STT	1181	1182	1183	1184	1185	1186	1187	1188	1189	1190	1191	1192	1193	1194	1195	1196	1197	1198	1199	1200	1201	1202
4537	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4538	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4539	0	31	45	44	56	48	35	42	26	0	26	30	33	25	0	0	0	0	20	0	0	0
4540	0	58	76	72	82	60	49	66	44	46	60	63	75	54	45	39	38	38	33	26	0	21
4541	26	73	94	87	90	62	55	82	61	76	90	87	109	75	68	59	52	52	41	36	25	26
4542	25	65	95	90	91	79	64	93	73	80	93	84	108	72	65	59	48	48	35	34	25	26
4543	0	40	75	73	83	89	65	86	63	57	67	57	75	51	46	42	34	34	22	27	22	24
4544	0	0	45	44	61	73	52	61	38	28	33	29	39	29	26	24	21	21	0	21	20	23
4545	0	0	21	21	35	42	32	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21
4546	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4547	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



(a) (b)
 Figure 3. TGI target image: (a) Marker matrix; (b) Radar target image

3. Determination of the optimal number of layers for dividing a radar image by levels

To properly segment a target image by pixel intensity level, it is necessary to estimate the overall signal strength distribution of the entire image. To evaluate the distribution of intensity levels in an image, one often plots a histogram. A histogram is a type of distribution chart in which the horizontal axis represents the measured values, the vertical axis represents the number of parts or several occurrences, the width of each column is equal to the class interval, the height of each column is similar to know the number of elements (frequency) corresponding to each subclass. This article uses several terms related to histograms.

+ A layer is the data values within a specific range used to build a chart. Each chart column represents one layer.

+ The layer's width equals the width of the chart column. The range of the data is the difference between the largest and smallest values.

A radar image histogram provides information about the radar image intensity distribution trend. Based on the histogram, you can determine the optimal number of layers to divide the image according to the intensity level of the reflected signal. The optimal number of layers means the number of separated layers, the value of which is not too large but at the same time ensures the accuracy of calculating the coordinates of the target center.

To construct a histogram chart, one must determine the number and size of histogram columns. There are many rules for determining the number of histogram bars, such as Sturges' rule, Rice's rule, Doane's rule, Scott's standard rule, Friedman–Diaconi, etc. Below are some rules for determining the number and size of histogram bars. In this section, use the following conventions:

+ The total number of samples to analyze in the data set is *n*.

+ The number of histogram columns is *k*.

+ The width of each column is *h*.

3.1. Rules and Choices for Layer Division

To provide reliable image division performance, an image histogram is typically required. An image histogram is a graph that shows the distribution of image pixels. It is a type of bar chart that show the frequency or number of pixels within different

numerical range, called bins. The problem is, what is the best number of bins and different bin sizes for various features of images? Some theoreticians have attempted to determine an optimal number of bins, but these methods generally make strong assumptions about the shape of the distribution. Depending on the actual data distribution and the goal of the analysis, different bin widths may be appropriate, so experimentation is usually needed to determine a proper width. So, the number of bins can be assigned directly or can be calculated from a suggested bin width as (1):

$$k = \left\lceil \frac{X_{\max} - X_{\min}}{h} \right\rceil \quad (1)$$

where X_{\max} and X_{\min} are the maximum and minimum values of actual data X , $[\cdot]$ is the pixel function, k is the number of bins, and h is the bin width. Equations to calculate the number of bins are written below [16].

•Square root choice [5]:

Square root choice (2) takes the square root of the number of data points in the sample and rounds to the next integer.

$$k = \sqrt{n} \quad (2)$$

•Sturge's formula [5, 6]:

Sturge's formula is derived from binomial distribution and implicitly assumes an approximately normal distribution (3). However, Sturge's formula implicates bin sizes on the range of the data and can perform poorly if $n < 30$ because the number of bins is smaller than seven and unlikely to show trends in the data well. Conversely, Sturge's formula may overestimate bin width for every large dataset, resulting in over-smoothed histograms. It may also perform poorly if the data are not normally distributed.

$$k = \lceil \log_2(n) + 1 \rceil \quad (3)$$

•Doane's rule [7];

Doane's rule is a modification of Sturge's formula, which attempts to improve its performance with non-normal data (4).

$$k = 1 + \log_2(n) + \log_2\left(1 + \frac{|g_1|}{\sigma_{g_1}}\right) \quad (4)$$

where g_1 is the estimated 3rd-moment-skewness of the distribution and

$$\sigma_{g_1} = \sqrt{\frac{6(n-2)}{(n+1)(n+3)}} \quad (5)$$

•**Scott’s normal reference rule [8];**
Bin width is given by (6)

$$h = \frac{3.49\hat{\sigma}}{\sqrt[3]{n}} \quad (6)$$

where $\hat{\sigma}$ is the sample standard deviation. Scott’s usual reference rule is optimal for random samples of normally distributed data because it minimizes the integrated squared error of the density estimate.

•**Freedman-Diaconi’s choice [9].**

The Freedman-Diaconi’s choice gives bin width such as (7)

$$h = 2 \frac{IRQ(x)}{\sqrt[3]{n}} \quad (7)$$

which is based on the interquartile range $IRQ(x)$. It replaces Scott’s rule with $2IRQ(x)$, which is less sensitive than the standard deviation to outliers in data.

Table 1.

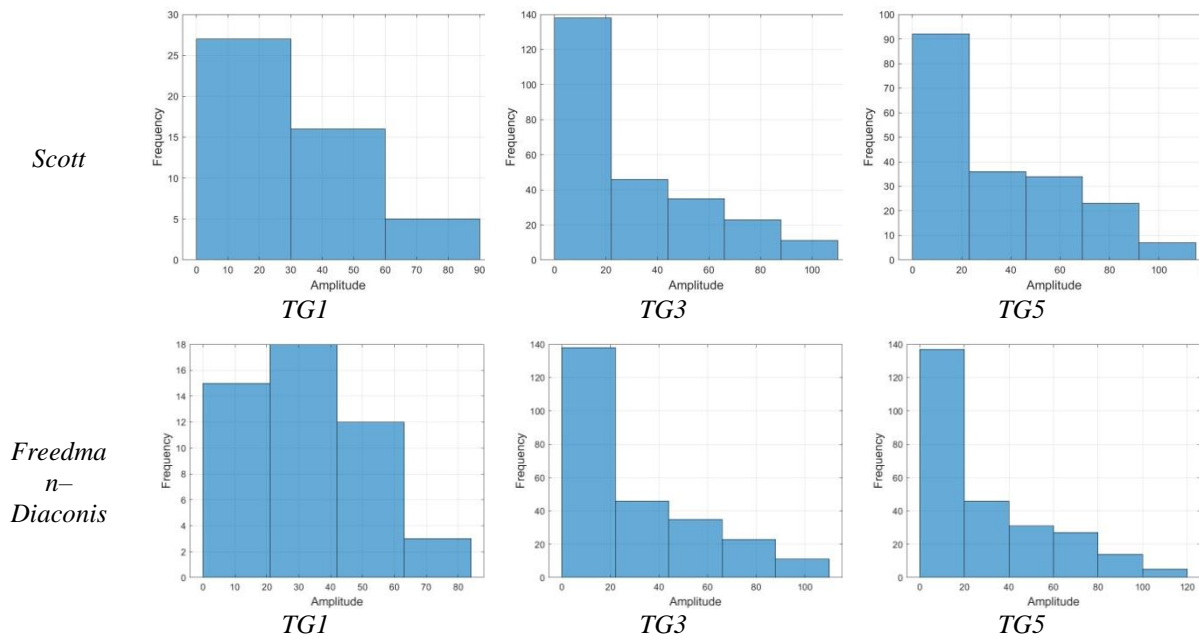
Number of classes for different targets.					
	Square -root	Sturge	Doane	Scott	Freedman-Diaconi
Fishing Vessel (TG1, TG2)	6	3	8	3	4
Cargo Ship (TG3, TG4)	9-11	3	9-10	5	5-6
Container Ship (TG5, TG6)	9-11	3	9-10	5-6	6-8

3.2. Choosing the Number of Layers

The analyzed histograms of the dataset resp Table 1 and Figure . They showed that the number of bins for each target differed, ranging from 3 to 8. It can be seen that most of the low-intensity values are less than 20, which are shown as the reflection from the background, small target, or noise. The purpose of the research is to find typical characteristics serving the command control mission (tracking problem), so the

number of bins are shown in

parts reflecting much energy from the target need to pay attention and track those parts of the target. Thus, it is necessary to build an algorithm to minimize unwanted reflections. The histogram is the basis for choosing the number of layers for radar image division, so weak reflecting parts can be ignored. Here, authors only take care of parts with an intensity value higher than 20.



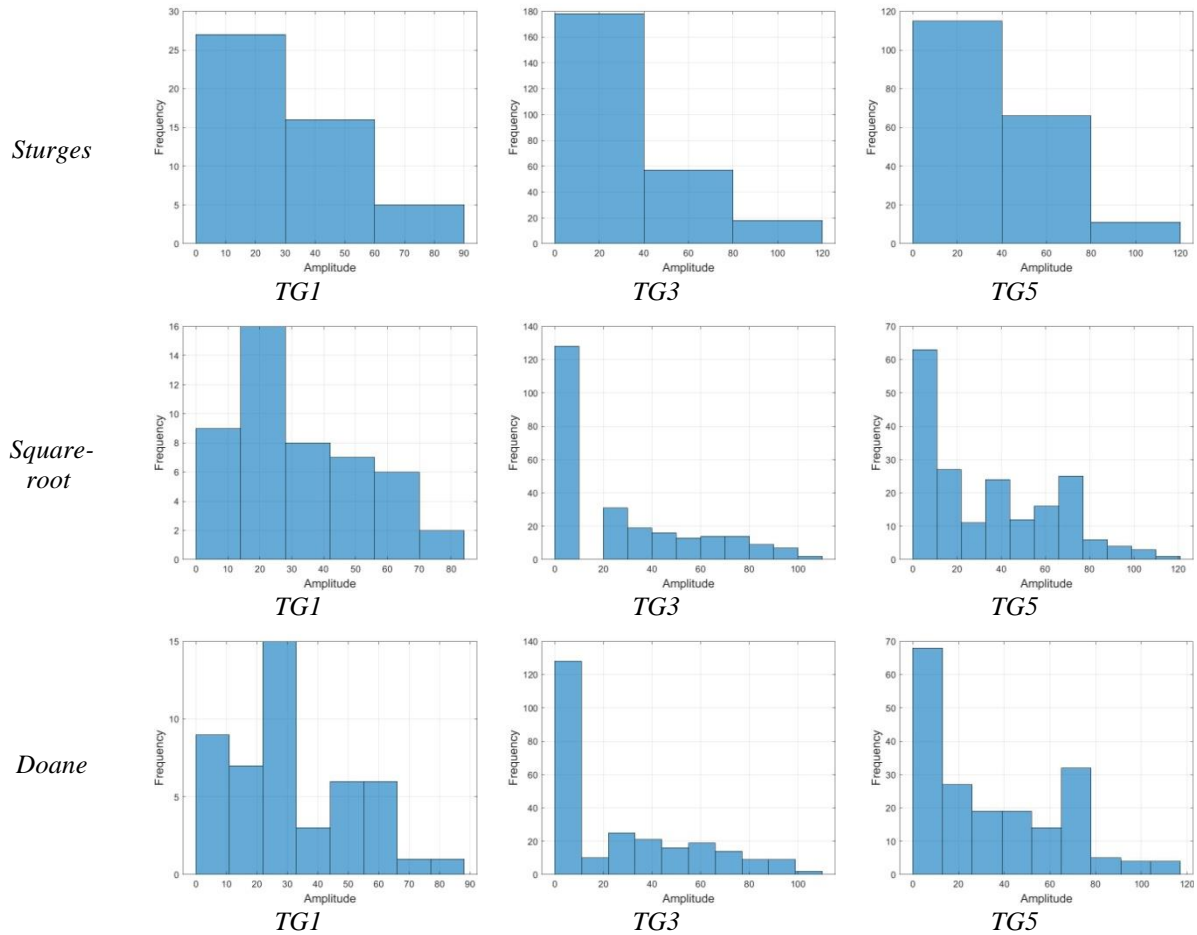


Figure 4. Histograms of targets width different rules

It can be seen in Figure that the number of layers (corresponding to the number of histogram columns) also affects the number of extreme regions of the resulting target, which influences the result of calculating the center coordinates of the target. The number of local edge regions for each target, corresponding to the method of dividing the target layer, is presented in Table 2. It can be seen that the number of edge regions increases, also the number of edge region centers, when the number of layers increases. However, the accuracy of calculating the

center coordinates of the target does not improve much when the number of regions increases. On the contrary, if the number of layers is small, it will cause the feature information of the radar image of each type of target to be lost (large targets have many edge regions), and the target coordinates will be inaccurate. The goal of layer separation is to select the optimal number of layers to separate the radar image while preserving the target image characteristics and minimizing the amount of computation.

Table 3.

Statistical parameters of the target’s coordinates over 15 scan cycles with different rules.							
Target	Dimension	Statistical parameters	Square-root	Sturges	Doane	Scott	Freedman
TG1	Range	Mean	4.00	3.867	3.933	3.866	3.867
		Variance	0.400	0.249	0.252	0.249	0.248
		St. deviation	0.633	0.499	0.553	0.499	0.499
	Azimuth	Mean	4.273	4.133	4.267	4.133	4.133
		Variance	0.339	0.382	0.296	0.382	0.249
		St. deviation	0.583	0.618	0.543	0.618	0.498
TG3	Range	Mean	4.888	4.800	4.900	4.800	4.885
		Variance	0.404	0.460	0.423	0.373	0.355
		St. deviation	0.636	0.678	0.651	0.611	0.595
	Azimuth	Mean	7.829	7.567	7.842	7.560	7.577
		Variance	0.901	2.929	1.075	1.779	0.704
		St. deviation	0.949	1.711	1.037	1.333	0.839
TG5	Range	Mean	11.837	11.578	11.935	11.548	11.805
		Variance	3.978	6.663	5.737	5.184	5.184
		St. deviation	1.994	2.581	2.395	2.277	2.277

	Mean	4.270	4.167	4.335	4.109	4.131
Azimuth	Variance	0.255	0.322	0.318	0.206	0.304
	St. deviation	0.505	0.568	0.564	0.454	0.552

The authors analyzed the results of calculating representative center coordinates with different divisions according to the rules/choices stated in section 3 for typical target groups such as fishing vessels, cargo ships, and container ships. The calculation results are presented in Table 3. Analyzing the results, it is found that the target classifier gives high accuracy according to Scott or Freedman-Diaconis rules with a small number of classes from six to eight, and the standard deviation is relatively small. For the Square-root and Doane rules with the number of classes greater than 10 to 11, the standard deviation does not improve much compared to the above two methods. In the case of dividing the image according to Sturges' rule with only three classes, the standard deviation is large. Thus, to speed up image processing while reducing image size, it is recommended to choose the number of layers moderately from six to eight.

To get high accuracy in calculating the center coordinates of different target types while also speeding up the calculation and reducing the input image size, the proposed algorithm divides the radar image into six layers. Each layer is separated by 30 intensity value units, with the smallest intensity value being 20 units and the highest intensity value being 200 units.

The results show that by dividing the entire radar scan screen image with six layers, the minimum signal intensity value of 20 units, and the maximum of 200 units, the target's center coordinates estimation meets the relatively good accuracy.

4. Conclusions

Based on analyzing histogram data of radar marine targets, the authors have proposed that the optimal number of layers to divide radar images of marine targets is six. With this threshold number, it is possible to meet good background noise compression while still retaining high-resolution geometric information of the target to estimate center coordinates. Once detected, it can be used to find local extreme

regions and calculate the centers of the local extreme regions. The center coordinates of the extreme regions can use clustering algorithms to determine the target region, such as K-means, from which to calculate the representative center coordinates to provide for the tracking problem.

References

- [1] Jaya Shradha Fowdur, Marcus Baum and Frank Heymann. Real-World Marine Radar Datasets for Evaluating Target Tracking Methods.
- [2] Julier S J, Uhlmann J K. 2002. "Reduced Sigma Point Filters for the Propagation of Means and Covariances through Nonlinear Transformations". Proceedings of American Control Conf, Jefferson City, pp.887-892.
- [3] Arasaratnam I and Haykin S. 2009. "Cubature kalman filters". IEEE Transactions on Automatic Control, volume 6, pp. 1254-1269.
- [4] Arasaratnam I, Haykin S, and Hurd T R. 2010. "Cubature Kalman filtering for continuous discrete systems: theory and simulations". IEEE Transactions on Signal Processing, volume 10, pp. 4977-4993.
- [5] Sturges, H. A. The choice of a class interval. Journal of the American Statistical Association. 21 (153): 65–66. doi:10.1080/01621459.1926.10502161. JSTOR 2965501.
- [6] Scott; David W. Sturges' rule. WIREs Computational Statistics. 1 (3): 303–306. doi:10.1002/wics.35. S2CID 197483064.
- [7] Doane DP. Aesthetic frequency classification. American Statistician, 30: 181–183.
- [8] Scott, David W. On optimal and data-based histograms. Biometrika. 66 (3): 605–610. doi:10.1093/biomet/66.3.605.
- [9] Freedman, David; Diaconis, P. (1981). On the histogram as a density estimator: L2 theory. Zeitschrift für Wahrscheinlichkeitstheorie und Verwandte Gebiete. 57 (4): 453–476. CiteSeerX 10.1.1.650.2473.

**ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ЭМОЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ**

Бондарчук Виктория Валерьевна

ORCID:0009-0007-1794-5309

кандидат технических наук,

заведующий отделом распознавания зрительных образов

Кравченко Наталья Михайловна

кандидат технических наук,

старший научный сотрудник, с.н.с. отдела РЗО

Институт проблем искусственного интеллекта,

г. Донецк

SOFTWARE DESIGN TECHNOLOGIES FOR INTELLIGENT EMOTIONAL STATE SYSTEMS

V. Bondarchuk

ORCID:0009-0007-1794-5309

Candidate of Technical Sciences,

Head of the Visual Image Recognition Department

N. Kravchenko

Candidate of Technical Sciences,

Senior Researcher, sns. RZA Department

Institute of Artificial Intelligence Problems, Donetsk

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2023.1.112.1872

АННОТАЦИЯ

В работе представлены теоретические концепции технологий проектирования программного обеспечения интеллектуальных систем эмоционального состояния для решения проблем в задачах взаимодействия когнитивных дисфункций с аппаратно-программным комплексом во время психоэмоциональной диагностики, а также в исследованиях безмедикоментозных методов и средств интеллектуально-духовной терапии для целей саморегуляции психоэмоциональных состояний личности. Представлено описание структуры полей классов распознавания эмоций, функциональная схема видеопотока: список распознанных эмоций, захват видеопотока с камеры, обработка кадров видеопотока, поиск и отслеживание объектов, интерфейс вывода данных.

ABSTRACT

The paper presents theoretical concepts of software design technologies for intelligent emotional state systems for solving problems in the problems of interaction of cognitive dysfunctions with hardware and software complex during psychoemotional diagnostics, as well as in the research of non-medical methods and means of intellectual and spiritual therapy for the purposes of self-regulation of psychoemotional states of personality. A description of the structure of emotion recognition class fields, a functional diagram of the video stream is presented: a list of recognized emotions, video stream capture from the camera, video stream frame processing, object search and tracking, data output interface.

Ключевые слова: структура полей классов, распознавание эмоциональных состояний, функциональная схема видеопотока

Keywords: structure of class fields, recognition of emotional states, functional diagram of the video stream

Актуальность проблемы

Интенсификация всех сфер человеческой деятельности сопряжена с ростом рисков психоэмоциональных дисфункций на фоне стрессов, декомпенсаций. Социальные взаимодействия основаны на способности точно определять аффективные состояния других людей. Особую актуальность представляют исследования нерешенных задач когнитивных дисфункций паттернов мозга, возможность осуществления эмоциональной диагностики и реабилитации. Недостаточность разработок этих проблем способствовало проведению научных исследований для их решения.

Объектом исследования являются процессы взаимодействия когнитивных дисфункций с

аппаратно-программным комплексом, инструментальные средства, методы адаптации и специализированная обработка, поступающая от средств сбора информации о состоянии объекта во время психоэмоциональной диагностики. Целью исследований являются разработка научных основ средств и методов определения функциональных показателей объекта в процессе психоэмоциональной диагностики на основе инструментальных средств, практического использования системы принятия решений искусственного эмоционального интеллекта как эффективного средства для оценки положительного интеллектуального функционального воздействия на объект, определение выбора оптимальных решений

саморегуляции психоэмоциональных состояний личности.

Результаты исследования

Выполнен аналитический обзор фундаментальных концепций эмергентных процессов эмоций [1, с. 134, 2]. Представлена базовая архитектура модели, включая динамические, рекурсивные эмоциональные процессы, инструментальные средства процесса сбора, обработки информации и управления данными в системе искусственного эмоционального интеллекта. Разработаны инструментальные средства распознавания и моделирования искусственного эмоционального интеллекта. Практические решения создания системы искусственного эмоционального интеллекта на базе нейросетей. Разработаны инструментальные средства системы искусственного эмоционального интеллекта, мониторинговой информационно-аналитической системы психоэмоциональных дисфункций: автоматизированное рабочее место пользователя - интеллектуального ассистента психоэмоциональной диагностики и саморегуляции психоэмоциональных состояний личности [3, с. 178]. Выполнено математическое моделирование системы искусственного эмоционального интеллекта для решения проблем в задачах взаимодействия когнитивных дисфункций с аппаратно-программным комплексом во время психоэмоциональной диагностики; классификация методов распознавания эмоций.

Структуру полей классов распознавания объекта описывают: маркеры положение левого края области, положение верхнего края области, положение правого края области, положение нижнего края области, координаты области кандидата, вес кандидата; параметры распознавания: флаг кластеризации найденных областей, порог кластеризации, реальная ширина объекта, реальная высота объекта, список найденных объектов, параметры детектирования объектов, список классификаторов каскада, количество классификаторов в каскаде; данные интегрального изображения: данные квадратного интегрального изображения, ширина (высота) интегрального изображения, координаты темной (светлой) области, порог, направление; узел дерева; количество признаков, массив признаков, тип классификатора; массивы признаков классификаторов; дерево признаков; базовое положение областей; базовая ширина объекта, текущее положение областей, коэффициент нормирования областей, флаг, пересечение областей, смещение областей; смещение правого верхнего угла темной области, смещение левого (правого) нижнего угла темной области, смещение левого (правого) верхнего (нижнего) угла светлой области, смещение левого (правого) верхнего угла области пересечения, смещение правого верхнего (нижнего) угла области пересечения; шаблон символа, значение символа, количество моделей

расположения символов, массив моделей расположения символов, номер наилучшей модели детекции символов, результат распознавания; ограничивающий прямоугольник отслеживаемого объекта, 8-битная маска, 24-битное цветное изображение; минимальная ширина эмоции, максимальная ширина эмоции, порог достоверности распознавания эмоции, флаг, вычисления размеров окна поиска на основе размера кадра, флаг использования отслеживания эмоций, флаг ограничения размера кадра, максимальная ширина (высота) кадра; метки эмоции, результат распознавания, отслеживаемая область, флаг корректности отслеживания, флаг потери объекта; подсистема распознавания, подсистема обнаружения, параметры системы, список отслеживаемых эмоций, предыдущий кадр, кадр в градациях серого, подсистема отслеживания, изображение эмоций, таблица символов эмоций и их изображений; способ отображения видеопотока и результатов распознавания, продолжительность задержки между кадрами, способ отрисовки, режим видеозахвата, признак наличия нескольких файлов для анализа, признак наличия ошибок при поиске файлов, признак отсутствия файлов в папке, список имен файлов для анализа, имя папки с файлами для анализа, идентификатор устройства видеозахвата, частота кадров, ширина кадра, высота кадра; поток распознавания, флаг старта системы, флаг паузы системы, флаг просмотра видеопотока пок кадрово, флаг остановки системы, подсистема видеозахвата, захватываемый кадр, пустой кадр для очистки экрана, параметры системы, источник видеосигнала, параметры отрисовки. Функциональная схема видеопотока отображает список распознанных эмоций, захват видеопотока с камеры, обработка кадров видеопотока OpenCV,

PostgreSQL, поиск объектов (признаки, метки), распознавание эмоций, отслеживание объектов, интерфейс вывода данных. Фундаментальная задача детекции эмоций базируется на их классификации, поиску похожих изображений в большой базе данных. Инструментальным средством являются **экстракторы функций изображений** — это функции или модули, которые можно использовать для изучения представлений из изображений. Наиболее распространенным типом экстрактора функций является свертка, при которой ядро скользит по изображению, обеспечивая совместное использование параметров и инвариантность перевода. **Свертки** — это тип операции, которую можно использовать для изучения представлений из изображений; обучаемое ядро, скользящее по изображению, выполняет поэлементное умножение входных данных. Разработан классификатор, который позволяет классифицировать различные входные сигналы и выводить соответствующую категорию эмоций. Качество классификатора влияет на точность распознавания эмоций. Исследованы на практике классические методы машинного обучения и методы глубокого обучения.

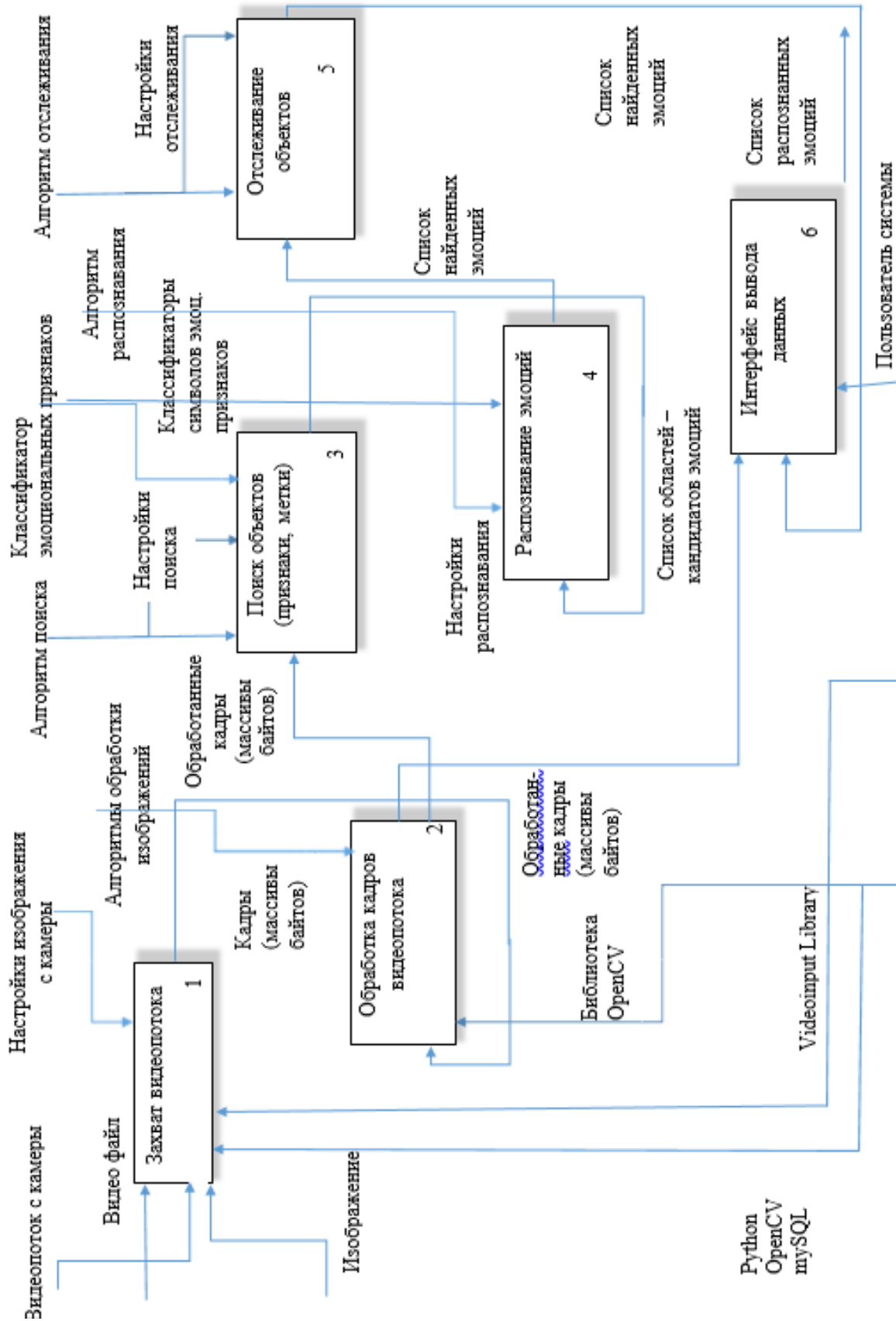


Рис. 1 Функциональная схема видеопотока: список распознанных эмоций, захват видеопотока с камеры, обработка кадров видеопотока (OpenCV), поиск объектов (признаки, метки), распознавание эмоций, отслеживание объектов, интерфейс вывода данных.

Список использованных источников

- Бондарчук В.В. Аналитический обзор систем искусственного эмоционального интеллекта: практические решения: глава 9 / В. В. Бондарчук, Н. М. Кравченко // Актуальные вопросы современного общества, науки и образования: монография / Под общ. ред. Г.Ю. Гуляева. – Пенза: МЦНС «Наука и просвещение», 2023 г. – 336 с. – С. 134–145. – ISBN 978-5-00236-010-9.
2. Bondarchuk V., Kravchenko N. Fundamentals of Dynamic Systems Software Desing// Proceedings of the Internacional Conference «Scientific Research of the SCO Countries Synergy and Integration. – Beijing, China. – Date: 09.08.2023. – S. 156–161. – DOI 10.34660/INF.2023.44.51.203. – UDC 002.6:004.415.048.65.
3. Bondarchuk V. Artificial Emotional Intelligence management system: diagnostics and rehabilitation // Proceedings of the International University Forum «Practice Oriented Science: UAE – Russia – India». – Dubai, UAE. – 19 September 2023. – 200 p. – P. 178–180. – DOI 10/34660/TNF.2023.30.67.236. – UDC 002.6:004.415.048.65. – ISBN 978-5-905695-87-95.
4. Бондарчук В.В., Кравченко Н.М. Инструментальные средства распознавания и моделирования искусственного эмоционального интеллекта // Искусственный интеллект: теоретические аспекты, практическое применение: материалы Донецкого международного научного круглого стола. – Донецк: ФГБНУ «ИПИИ», 2023. – с. 29.

УДК 536.423.1

ГРНТИ 44.31.03; 61.13.17

CRITICAL HEAT FLOW AT LIQUID DROPLET BOILING*Vasilyev P.S., Reva L.S.**Volgograd State Technical University,
Lenin Avenue 28, Volgograd, Russian Federation 400005***КРИТИЧЕСКИЙ ТЕПЛОВЫЙ ПОТОК ПРИ КАПЕЛЬНОМ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ***П. С. Васильев, Л. С. Рева**Волгоградский государственный технический университет,
400005, Российская Федерация, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, 28
DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2023.1.112.1873***ABSTRACT**

The article substantiates the relevance of defining the value of the critical heat flow during the liquid boiling in process devices. The authors show that droplet boiling makes it possible to increase the efficiency of the equipment several times as compared to the developed nucleate boiling of liquid in a volume, which makes it possible to consider it as an effective production technology. Based on the experimental data previously obtained by the authors, a detailed derivation of the equation for quantifying the critical heat flow in the course of liquid droplet boiling is provided with the account of the key factors affecting the heat exchange process. The authors conduct a detailed graphical analysis of the impact of each of the key factors on the magnitude of the critical heat flow during liquid droplet boiling. On the basis of such analysis practice-oriented recommendations for the engineering design of process devices are proposed.

АННОТАЦИЯ

Обоснована актуальность определения величины критического теплового потока при кипении жидкости в технологических аппаратах. Показано, что капельное кипение позволяет в несколько раз повысить эффективность работы оборудования в сравнении с развитым пузырьковым кипением жидкости в объёме, что позволяет рассматривать его как эффективную производственную технологию. На основе экспериментальных данных, полученных авторами ранее, представлен подробный вывод уравнения для количественной оценки критического теплового потока при капельном кипении жидкости, учитывающего основные влияющие на теплообменный процесс факторы. Выполнен детальный графический анализ влияния каждого из основных факторов на величину критического теплового потока при капельном кипении жидкости, на основе которого предложены практические рекомендации для инженерного проектирования технологических аппаратов.

Keywords: droplet boiling, specific heat flow, critical temperature drop, design.**Ключевые слова:** капельное кипение, удельный тепловой поток, критический температурный напор, проектирование.**Introduction**

The critical heat flow during liquid boiling in process devices defines the maximum (theoretical) efficiency of their operation, which, in turn, is crucial for the dimensions and metal consumption of the equipment and, accordingly, its cost. In practice, to

avoid perverse technological consequences, such as a sharp drop in the heat transfer coefficient and overheating of the heat-exchange surface, heat flow occurs in process devices, the heat flow value is less than its critical value [1].

At the developed nucleate boiling of the liquid in a volume, a specific heat flow is diverted from the heat-exchange surface, and the value of such flow is mainly defined by the thermal and physical properties of the liquid and the temperature drop [2-6]:

$$q = A \cdot \Delta t^b, (1)$$

where A is a coefficient that considers the liquid thermal and physical properties; $\Delta t = t_s - t_b$ is the temperature drop, K; t_s is the temperature of the heat-exchange surface, °C; t_b is the boiling point of the liquid, °C; $b = 3.0 \div 3.5$.

The value q is also affected by the state of the heat-exchange surface, determined by its roughness and adhesive properties [2; 5; 7]. However, due to a small temperature drop for liquid boiling in the volume $\Delta t = 20 \div 30$ K, at which the value of the specific heat flow does not exceed $q = 0.7 \div 0.8$ MW/m², this factor is conventionally not taken into account in equation (1).

Droplet boiling is the evaporation in the boiling mode of a liquid, supplied from time to time to the heat-exchange surface in the form of droplets. It is conducted at a temperature drop $\Delta t = 20 \div 160$ K, at which the value of the specific heat flow reaches $q = 10 \div 12$ MW/m² [8-12]. Thus, when defining the q

$$Nu = 2.924 \cdot 10^9 \cdot Ra^{0.906} \cdot Oh^{3.688} \cdot Re^{-0.073} \cdot \left(\frac{t_b - t_{in}}{\Delta t}\right)^{-0.106} \cdot \left(\frac{S_m}{R_a}\right)^{-0.138} \cdot \left(\frac{W_a}{W_c}\right)^{0.700}, (3)$$

where $Nu = \alpha \cdot d_k / \lambda$ is the Nusselt similarity number; d_k is the droplet diameter, m; $Ra = g \cdot \rho^2 \cdot c_p \cdot \beta \cdot d_k^3 \cdot \Delta t / (\mu \cdot \lambda)$ is the Rayleigh similarity number; $Oh = \mu / \sqrt{\rho \cdot \sigma \cdot d_k}$ is the Ohnesorge similarity number; $Re = w \cdot d_k \cdot \rho / \mu$ is the Reynolds similarity number; $(t_b - t_{in}) / \Delta t$ is the similarity simplex considering the impact of temperature factors; S_m / R_a is the similarity simplex that takes into account the impact of the roughness of the heat-exchange surface; W_a / W_c is the similarity simplex, taking into account the impact of the wetting extent of the heat-exchange surface; w is the velocity of the droplets at the time of their collision with the heat-exchange surface, m/s; t_{in} is the initial temperature of

value for liquid droplet boiling, it is necessary to take into account the impact of the state of the heat-exchange surface.

The purpose of the research is to obtain an equation for quantifying the critical heat flow during liquid droplet boiling, taking into account the key factors affecting the heat exchange process.

Main results

In terms of conventional thermal physics concepts, a specific heat flow is defined as follows [3; 4]:

$$q = \alpha \cdot \Delta t, (2)$$

where α is the heat transfer coefficient, W/(m²·K).

The experimental paper [10] obtained an equation for determining the heat transfer coefficient during droplet boiling of a liquid depending on the key factors affecting the heat exchange process: the liquid thermal and physical properties, the size of the droplets, the velocity of the droplets at the time of their collision with the heat-exchange surface, the initial temperature of the liquid in the droplets, the temperature of the heat-exchange surface, the state of the heat-exchange surface determined by its roughness and adhesive properties:

the liquid in droplets, °C; R_a is the arithmetic mean deviation of the profile of the heat-exchange surface, um; S_m is the mean pitch of the irregularities of the heat-exchange surface profile along the middle line, um; $W_a = \sigma \cdot (1 + \cos \theta)$ is the adhesion work J/m²; $W_c = 2 \cdot \sigma$ is the cohesion work, J/m²; θ is the marginal wetting angle of the heat-exchange surface at liquid flow, deg.; liquid thermal and physical properties taken at its boiling point t_b : ρ is the density, kg/m³; μ is the dynamic viscosity coefficient, Pa·s; β is the volume expansion coefficient, K⁻¹; c_p is the specific mass heat capacity, J/(kg·K); λ is the coefficient of thermal conductivity, W/(m·K); σ is the surface tension coefficient, J/m².

Express equation (3) in the following form:

$$\alpha = 2.924 \cdot 10^9 \cdot Ra_*^{0.906} \cdot Oh^{3.688} \cdot Re^{-0.073} \cdot (t_b - t_{in})^{-1.012} \cdot \left(\frac{S_m}{R_a}\right)^{-0.138} \cdot \left(\frac{W_a}{W_c}\right)^{0.700} \cdot \frac{\lambda}{d_k} \cdot \Delta t^{1.012}, (4)$$

where

$Ra_* = g \cdot \rho^2 \cdot c_p \cdot \beta \cdot d_k^3 \cdot (t_b - t_{in}) / (\mu \cdot \lambda)$ is the modified Rayleigh similarity number.

$$\Delta t_L = t_L - t_b = 1.017 \cdot 10^{-7} \cdot Ra_*^{-0.500} \cdot Oh^{-3.050} \cdot Re^{-0.159} \cdot (t_b - t_{in}) \cdot \left(\frac{S_m}{R_a}\right)^{0.583} \cdot \left(\frac{W_a}{W_c}\right)^{1.099}, (5)$$

where t_L is the temperature of the heat-exchange surface at which the liquid impacted by a critical heat flow passes into a spheroidal state, also called the Leidenfrost temperature, °C.

$$q = 2.924 \cdot 10^9 \cdot Ra_*^{0.906} \cdot Oh^{3.688} \cdot Re^{-0.073} \cdot (t_b - t_{in})^{-1.012} \cdot \left(\frac{S_m}{R_a}\right)^{-0.138} \cdot \left(\frac{W_a}{W_c}\right)^{0.700} \cdot \frac{\lambda}{d_k} \cdot \Delta t^{2.012}. (6)$$

Similarly, express the equation, experimentally obtained in [10], for defining the critical temperature drop at the liquid droplet boiling:

Considering the expression (4), equation (2) will take the form:

Equation (6) can be presented in a more compact form:

$$q = C \cdot \Delta t^{2.012}, (7)$$

where $C = 2.924 \cdot 10^9 \cdot Ra_*^{0.906} \cdot Oh^{3.688} \cdot Re^{-0.073} \cdot (t_b - t_{in})^{-1.012} \cdot (S_m/Ra)^{-0.138} \cdot (W_a/W_c)^{0.700} \cdot \lambda/d_k$.

Equating in equation (6) $\Delta t = \Delta t_L$, taking into account expression (5), we obtain an equation for quantifying the critical heat flow during liquid droplet

$$q_L = 2.493 \cdot 10^{-5} \cdot Ra_*^{-0.100} \cdot Oh^{-2.449} \cdot Re^{-0.393} \cdot (t_b - t_{in}) \cdot \left(\frac{S_m}{Ra}\right)^{1.035} \cdot \left(\frac{W_a}{W_c}\right)^{2.911} \cdot \frac{\lambda}{d_k}. (8)$$

Equation (8) can be written in a more compact form:

$$q_L = C \cdot \Delta t_L^{2.012}. (9)$$

Discussion

For a developed nucleate boiling of a liquid in a volume, the specific heat flow is proportionate to the temperature drop to the degree of ≈ 1.5 , i. e. $q \sim \Delta t^{1.5}$ [2-6]. Equation (7) shows that for the liquid droplet boiling, the specific heat flow is proportionate to the temperature drop to the degree of ≈ 2.0 , i. e. $q \sim \Delta t^{2.0}$. This is explained by the fact that liquid droplets with its developed nucleate boiling mode on the heat-exchange surface are not limited by the vessel walls and can spread freely over it [9]. As a result, liquid droplet boiling can be conducted at a temperature drop being several times greater than that at the developed nucleate

boiling, taking into account the main factors affecting the heat exchange process:

boiling of the liquid in the volume. At the same time, the value of the critical temperature drop for liquid droplet boiling falls within the range $\Delta t_L = 140 \div 160$ K and largely depends on the state of the heat-exchange surface, defined by its roughness and adhesive properties according to equation (5) [10; 12].

Equation (8) allows, first of all, quantifying the critical specific heat flow during the liquid droplet boiling and, secondly, analyzing the impact of each of the key factors on its magnitude.

Figure 1-3 shows the graphs built using equation (8) of the dependence of the critical specific heat flow on, respectively, the size of the water droplets, the initial temperature of water in the droplets and the velocity of the droplets at the time of their collision with heat-exchange surfaces made of carbon steel, aluminum alloy and brass.

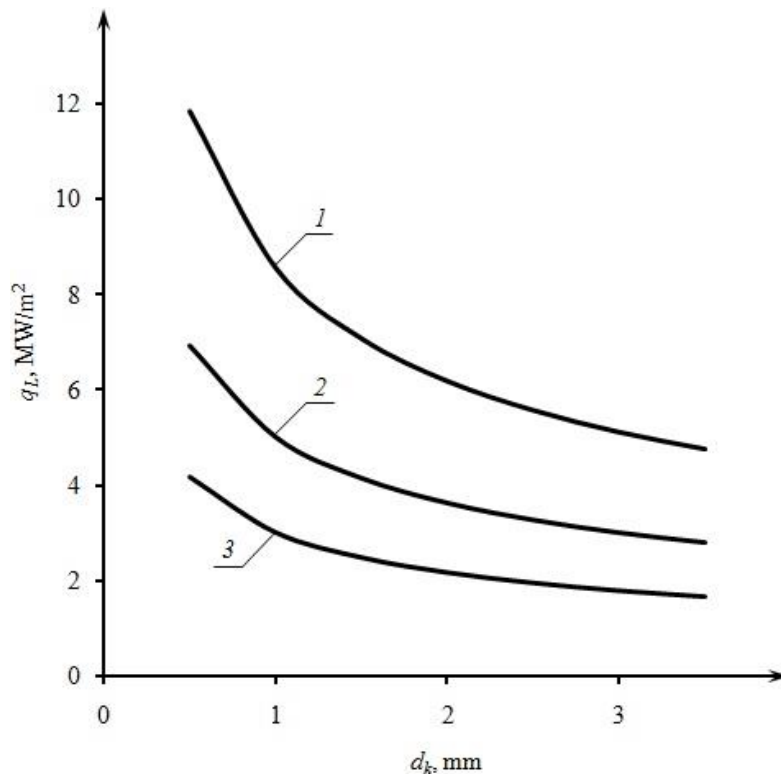


Figure 1. Dependence graphs $q_L = f(d_k)$ for water droplet boiling at $t_b = 100$ °C, $t_{in} = 50$ °C, $w = 2$ m/s on heat-exchange surfaces made of:

- 1 – carbon steel ($S_m = 170.4$ μ m, $R_a = 2.269$ μ m, $\cos \theta = 0.698$);
- 2 – aluminum alloy ($S_m = 359.3$ μ m, $R_a = 6.603$ μ m, $\cos \theta = 0.583$);
- 3 – brass ($S_m = 409.5$ μ m, $R_a = 6.312$ μ m, $\cos \theta = 0.249$).

Figure 1 shows that with a decrease in the size of liquid droplets d_k , the value q_L increases in accordance with the power law. This provides the grounds for the

practical recommendation to use the most finely dispersed liquid spray ($d_k < 1$ mm) when implementing droplet boiling technology.

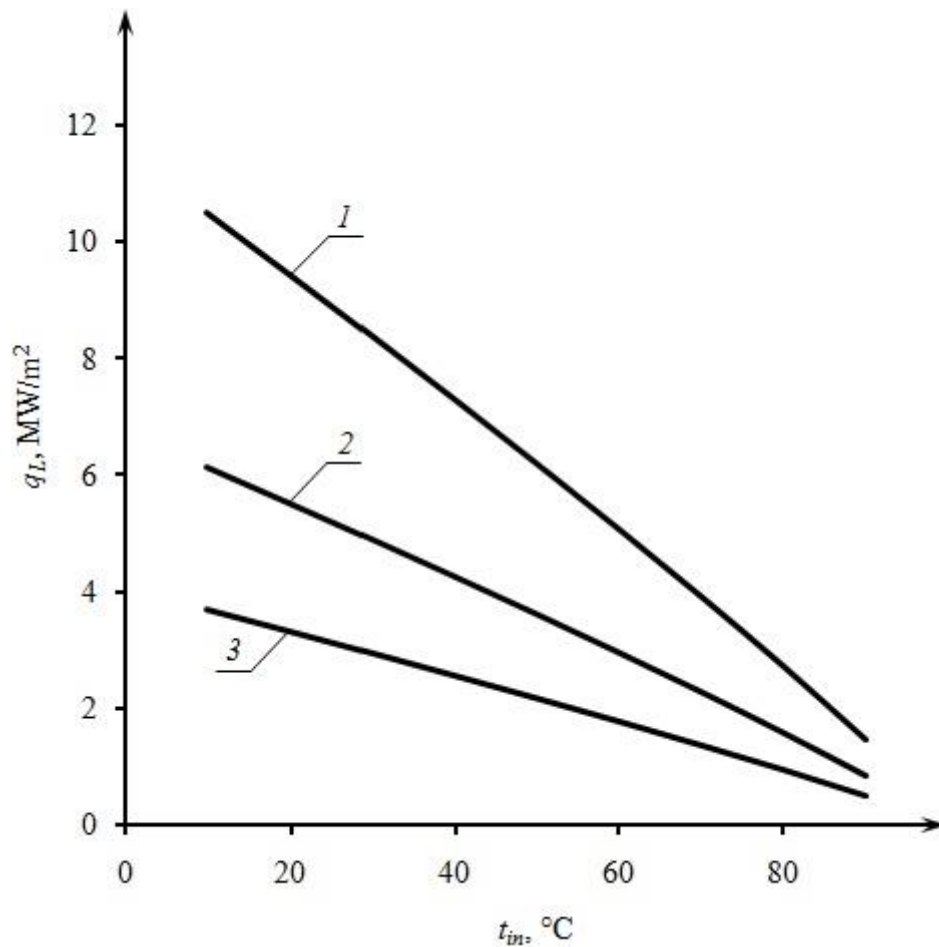


Figure 2. Dependence graphs $q_L = f(t_{in})$ for water droplet boiling at $t_b = 100$ °C, $d_k = 2$ mm, $w = 2$ m/s on heat-exchange surfaces made of:

- 1 – carbon steel ($Sm = 170.4$ μm , $Ra = 2.269$ μm , $\cos \theta = 0.698$);
- 2 – aluminum alloy ($Sm = 359.3$ μm , $Ra = 6.603$ μm , $\cos \theta = 0.583$);
- 3 – brass ($Sm = 409.5$ μm , $Ra = 6.312$ μm , $\cos \theta = 0.249$).

Figure 2 shows that with an increase in the initial temperature of the liquid in the droplets t_{in} , the value of q_L decreases almost linearly. In terms of the practical implementation of droplet boiling technology, this

makes it possible to recommend not to use liquid preheating before feeding into the process device providing its initial temperature at more than $t_{in} < 20 \div 30$ °C.

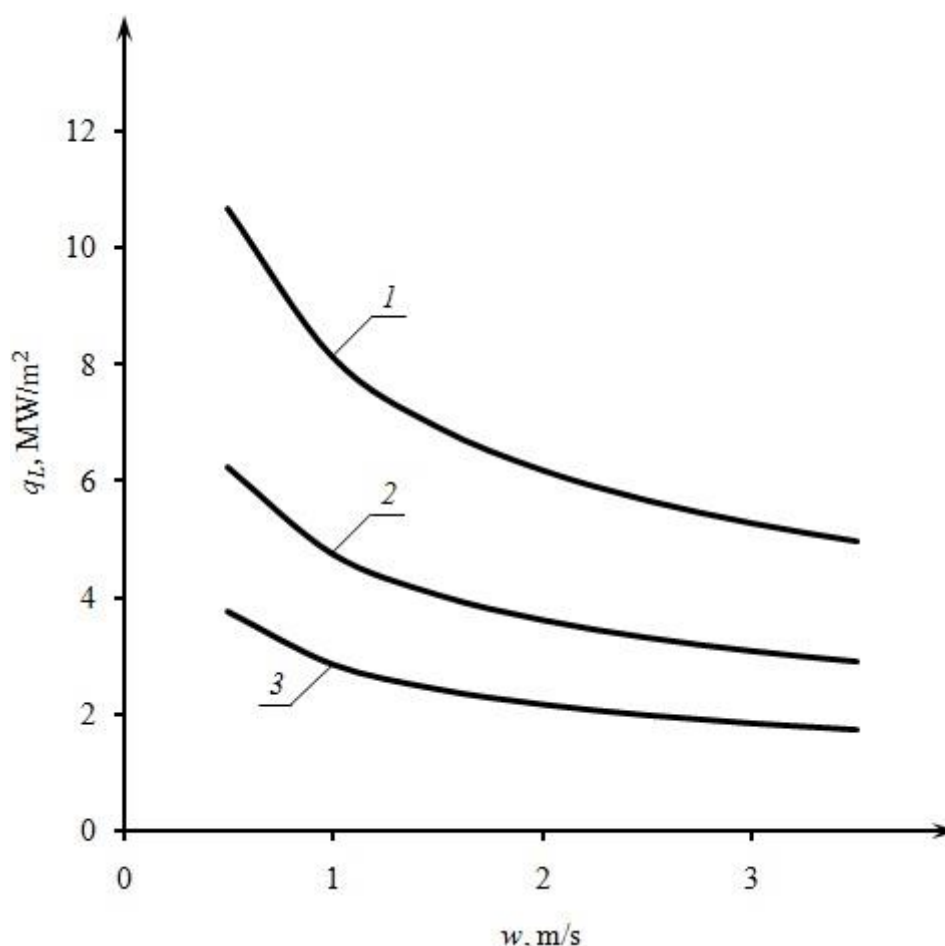


Figure 3. Dependence graphs $q_L = f(w)$ for water droplet boiling at $t_b = 100\text{ }^\circ\text{C}$, $d_k = 2\text{ mm}$, $t_{in} = 50\text{ }^\circ\text{C}$ on heat-exchange surfaces made of:

- 1 – carbon steel ($S_m = 170.4\text{ }\mu\text{m}$, $R_a = 2.269\text{ }\mu\text{m}$, $\cos\theta = 0.698$);
- 2 – aluminum alloy ($S_m = 359.3\text{ }\mu\text{m}$, $R_a = 6.603\text{ }\mu\text{m}$, $\cos\theta = 0.583$);
- 3 – brass ($S_m = 409.5\text{ }\mu\text{m}$, $R_a = 6.312\text{ }\mu\text{m}$, $\cos\theta = 0.249$).

Figure 3 shows that the decrease in the velocity of the droplets at the moment of their collision with the heat-exchange surface w , the value of q_L increases in accordance with the power law. From a practical point of view, it defines the choice of the type and design of the spraying device with the lowest kinetic parameters ($w < 1.0\div 1.5\text{ m/s}$).

The graphs in Figure 1-3 show that the highest values of q_L correspond to heat-exchange surfaces with minimal roughness parameters S_m and R_a , which are well wetted with the evaporated liquid (with the highest $\cos\theta$ value). From a practical point of view, this makes it possible to choose the structural material for the manufacture of the heat-exchange surface, the type and mode of its mechanical processing.

Conclusion

As a result of the research conducted, equation (8) is proposed for quantifying the critical specific heat flow q_L during liquid droplet boiling, which takes into account the impact of the key factors on the heat exchange process: the liquid thermal and physical properties, the droplets size, the velocity of the droplets at the time of their collision with the heat-exchange surface, the initial temperature of the liquid in the droplets, the temperature of the heat-exchange surface,

the state of the heat-exchange surface defined by its roughness and adhesive properties.

As a result of the analysis of each key factor impact on the q_L value, conducted using equation (8), practical recommendations are set forth that may be required by the engineering design of highly efficient devices operating by the droplet boiling technology.

Acknowledgments

This research was supported by the grant of the President of the Russian Federation MK-1603.2022.4 “Development of energy and resource-efficient equipment for the implementation of heat and mass transfer processes using multiple drop boiling and highly porous materials based on experimental and theoretical studies”.

References

1. Baranov PA Preventing steam boiler accidents. Moscow: Energoatomizdat; 1991. (in Russ).
2. Balajka B, Sikora K Heat exchange processes in chemical industry apparatuses. Moscow: Mashgiz; 1962. (in Russ).
3. Perry RH Perry’s chemical engineers’ handbook. New York: McGraw-Hill; 1999.
4. Miheev MA, Miheev IM Fundamentals of heat transfer. Moscow: Energija; 1977. (in Russ).

5. Grigor'ev VA, Pavlov JuM, Ametistov EV Boiling of cryogenic liquids. Moscow: Energija; 1977. (in Russ).
6. Ovsyannik AV Modeling heat-exchange processes during the boiling of liquids. Gomel: Sukhoi State Technical University of Gomel; 2012. (in Russ).
7. Gogonin II Critical heat flow at boiling and its dependence on the characteristics of heat-emitting wall. High Temperature. 2010; 48 (1): 84-95. (in Russ).
8. Vasilyev PS, Reva LS, Reva SL, Novikov AE, Golovanchikov AB The calculation of the evaporation time for a droplet boiling on a heated surface. Bulletin of the Technological University. 2016; 19 (5): 121-126. (in Russ).
9. Vasilyev PS, Reva LS, Reva SL, Novikov AE, Golovanchikov AB The calculation of the area of the contact patch of the liquid droplet boiling on a heated surface. Bulletin of the Technological University. 2016; 19 (13): 116-123. (in Russ).
10. Vasilyev PS, Reva LS, Reva SL, Golovanchikov AB The experimental research of the heat transfer during the boiling of a liquid droplet on the heated surface. Bulletin of the Technological University. 2017; 20 (22): 28-33. (in Russ).
11. Sharifulin TM, Feoktistov DV Experimental study of evaporation rate of distilled water drop when it's free-falling on heated polished and structured aluminum surface. Proceedings of international symposium "Non-equilibrium processes in continuous media" (Perm'). 2017; 2: 245-248. (in Russ).
12. Vasilyev PS, Reva LS, Shurak AA Assessing the impact of the state of the heat-exchange surface on the heat transfer intensity during droplet boiling. International Research Journal. 2022; 120 (6): 18-25.

УДК 004.02

НЕЧЕТКИЕ МНОЖЕСТВА И СКОРОСТЬ ЕЕ ИЗМЕНЕНИЯ

Зейналов Дж. И.

*доктор компьютерных наук, профессор кафедры информационные технологии
Нахчыванский Государственный Университет*

Алийев М.Э.

*доцент кафедры транспортная инженерия и технические дисциплины
Нахчыванский Государственный Университет*

Касумов Г.А.

*Кандидат технических наук, кафедры информационные технологии
Нахчыванский Государственный Университет*

Аждарова Н. Дж.

"Нахчыванский" Университет

FUZZY SETS AND THE RATE OF ITS CHANGE

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2023.1.112.1874

РЕЗЮМЕ

Широкий класс практических задач приводит к изучению изменения формы рассматриваемого предмета или тела относительно некоторого параметра. Примерами таких задач являются процессы диффузии, задачи расширения или выпрямления тела от тепла, задачи теории упругости, экологические проблемы, задача о распространении нефтяного пятна на поверхности моря, биологические процессы и т. д. Изучение Задача в такой постановке связана с некоторыми математическими трудностями. Это связано, прежде всего, с определением скорости изменения набора, характеризующего форму тела.

SUMMARY

A wide class of practical problems leads to the study of changes in the shape of the object or body under consideration relative to some parameter. Examples of such problems are diffusion processes, problems of expansion or straightening of a body from heat, problems of the theory of elasticity, environmental problems, the problem of spreading an oil slick on the surface of the sea, biological processes, etc. Studying the problem in this formulation is associated with some mathematical difficulties. This is primarily associated with determining the rate of change of the set characterizing the shape of the body.

Ключевые слова: дифференциальные уравнения, нейронные сети, оптимальный синтез, оптимальное управление, скорость изменения множества.

Key words: differential equations, neural networks, optimal synthesis, optimal control, rate of change of the set.

Широкий класс задач практики приводит к изучению изменения формы рассматриваемого объекта или тела относительно некоторого параметра [1]. Примерами таким задачам являются диффузионные процессы, задачи расширения или распрямления тела от тепла, задачи теории упругости, экологические задачи, задача

распространения нефтяного пятна на поверхности моря, биологические процессы и т.д.

Изучение задачи в такой постановке связано с некоторыми математическими трудностями. Это в первую очередь связано с определением скорости изменения множества, характеризующей форму тела.

В математическом языке множество $D \subset R^n$ можно определить с помощью ее характеристической функции $\mu_D(x)$. Если $\mu_D(x) = 1$, это означает, что $x \in D$ и $\mu_D(x) = 0$, то $x \notin D$. Значит характеристическая функция $\mu_D(x)$ получает значения 1 и 0, т.е. любая точка либо входит в множество D , либо нет. Однако бывает, что функция $\mu_D(x)$ не определяется двумя значениями, ее значение меняется на отрезке $[0,1]$.

Пусть $X \subset R^n$ некоторое множество, $\mu_A(x)$ определенное на X полунепрерывная сверху функция с областью ее значений $[0,1]$. Под нечетким множеством A понимается совокупность [2,3].

$$A = \{(x, \mu_A(x)): x \in X\}.$$

Часто $\mu_A(x)$ называют функциями принадлежности, характеризующими степень принадлежности элемента x нечеткому множеству A . Предполагается, что множество

$$S_A = \{x \in X: \mu_A(x) > 0\}$$

ограничено. Множество S_A называется носителем нечеткого множества A . Для любого $\alpha \in [0,1]$ обозначим через

$$A^\alpha = \{x \in X: \mu_A(x) \geq \alpha\},$$

A^α называется α -уровнем нечеткого множества A . Остюда ясно, что если $\alpha_2 \geq \alpha_1$, то $A^{\alpha_2} \subseteq A^{\alpha_1}$.

Нечёткое множество A является выпуклым тогда и только тогда, когда выполняется условие

$$\mu_A(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \min\{\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)\}$$

для любых $x_1, x_2 \in R$ и $\lambda \in [0,1]$. Если для любого $\alpha \in [0,1]$ множество A^α выпукло, то нечеткое множество A однозначно определяется α -уровнем A^α . В случае нечеткого числа, α -уровень нечеткого числа a определяется как отрезок

$$a^\alpha = [L_\alpha(a), R_\alpha(a)], \alpha \in [0,1].$$

Используя это аналогично к нечеткому числу, можно определить сумму нечетких множеств. Сумма выпуклых нечетких множеств A, B , также является нечетким множеством и его α -уровень определяется следующим образом:

$$(A + B)^\alpha = A^\alpha + B^\alpha, \alpha \in [0,1].$$

Умножение нечеткого множества на положительное число определяется как

$$(k \cdot A)^\alpha = kA^\alpha, k \geq 0.$$

Однако умножение нечеткого множества на отрицательное число, определенное по этим правилам вообще говоря не является нечетким множеством. Поэтому надо рассматривать пару нечетких множеств.

Приведем некоторые вспомогательные факты, относящие к теории множеств [1,4,5,6]. Пусть M совокупность выпуклых замкнутых ограниченных множеств в R^n .

В M определены следующие алгебраические операции сложения и умножения на неотрицательное число:

$$A + B = \{c: c = a + b, a \in A, b \in B\},$$

$$\lambda A = \{\lambda a: a \in A\},$$

где $\lambda \geq 0$ и $A, B \subset M$. Ясно, что эти операции обладают свойствами:

$$(A+B)+C=A+(B+C),$$

$$A+B=B+A,$$

$$\lambda(A+B) = \lambda A + \lambda B, \lambda \geq 0,$$

$$(\lambda_1 + \lambda_2)A = \lambda_1 A + \lambda_2 B, \lambda_i \geq 0, i=1,2$$

$$(\lambda_1 \lambda_2)A = \lambda_1(\lambda_2 A),$$

$$1 \cdot A = A,$$

$$0 \cdot A = \{0\},$$

где $\{0\}$ нулевой элемент R^n . Если $\lambda < 0$, то операция $\lambda A = \{\lambda a: a \in A\}$ вообще говоря не удовлетворяет некоторым из вышеуказанных свойств.

Действительно, пусть B – единичный шар из R^n . Тогда должно выполняться условие

$$(-1) \cdot B + B = (-1 + 1) \cdot B = \{0\}.$$

Однако,

$$-B + B = B + B = 2B.$$

Это показывает, что M не является линейным пространством.

Рассмотрим прямое произведение $M \times M$, т.е. совокупность пар (A, B) , где $A, B \in M$. Определим в $M \times M$ операции сложения и умножения на вещественное число:

$$(A, B) + (C, D) = (A + C, B + D)$$

$$\lambda(A, B) = (\lambda A, \lambda B), \text{ если } \lambda \geq 0$$

$$\lambda(A, B) = (|\lambda|B, |\lambda|A), \text{ если } \lambda < 0.$$

Введем в $M \times M$ отношение эквивалентности: пары (A, B) и (C, D) эквивалентны, если $A + D = B + C$. Это обозначим как $(A, B) \approx (C, D)$ или $(A, B) = (C, D)$. Множество $M \times M$ вместо с определенными выше алгебраическими операциями является линейным пространством ([1]). Роль нуля в этом пространстве играет класс $(0,0)$, т.е. совокупность пар $(A, A), A \in M$. Если $x = (A, B)$, тогда $-x = (B, A)$.

Пусть выпуклая функция $f(x)$ определена на R^n . $c \in R^n$ называется субградиентом функции $f(x)$ в точке $x_0 \in R^n$, если

$$f(x) - f(x_0) \geq (c, x - x_0),$$

при всех $x \in R^n$. Множество всех субградиентов функции $f(x)$ в точке x_0 называют субдифференциалом этой функции в точке x_0 и обозначаются через $\partial f(x_0)$. Известно, что $\partial f(x_0) \in M$.

Функция

$$P_D(x) = \sup_{l \in D} (l, x), x \in D, (1)$$

называется опорной функцией множества $D \in M$, где $P_D(x)$ является непрерывно-выпуклой и положительно однородной [1,4]. Положительно однородность означает, что

$$P_D(\lambda x) = \lambda P_D(x), \lambda \geq 0.$$

Каждому выпуклому замкнутому ограниченному множеству $D \in M$ сопоставляет выпуклую, непрерывную, положительно однородную функцию $P_D(x)$. Верно и обратное: для каждой непрерывно-выпуклой, положительно-однородной функции $P(x)$ существует единственное замкнутое выпуклое ограниченное множество $D \in M$ такое, что $P(x) = P_D(x)$. Множество D , совпадает с субдифференциалом функции $P(x)$ в точке $0 \in R^n$ ([1,4,5].

$$\partial P(0) = \{l \in R^n: P(x) \geq (l, x)\}.$$

Пусть

$$a = (A_1, A_2), b = (B_1, B_2), A_i, B_i \in M, i = 1, 2,$$

B – единичный шар, $S_B = \partial B$ -единичная сфера. В [...] показано, что пространство $M \times M$ линейное. Скалярное произведение $a \bullet b$ в $M \times M$ определим следующим образом

$$a \bullet b = \int_{S_B} p(x)q(x)ds, (2)$$

здесь

$$p(x) = P_{A_1}(x) - P_{A_2}(x), q(x) = P_{B_1}(x) - P_{B_2}(x),$$

$P_{A_i}(x), P_{B_i}(x)$ - опорные функции множеств A_i и $B_i i=1,2$, соответственно. В одномерном случае

$$a \bullet b = p(-1)q(-1) + p(1)q(1).$$

Показано ([1]), что $a \bullet b$ удовлетворяет всем аксиомам скалярного произведения.

Пространство $M \times M$ со скалярным произведением (1.2) обозначено через ML_2 . Расстояние в этом пространстве между множествами $A \in M$ и $B \in M$ определяется как норма элемента $a = (A, 0) - (B, 0) = (A, B)$

$$\|a\|_{ML_2} = \sqrt{a \bullet a} = \left(\int_{S_B} [P_A(x) - P_B(x)]^2 ds \right)^{1/2} (3)$$

Определенная таким образом эта конструкция определяет пространство пар выпуклых нечетких множеств. Пусть $A_i, B_i, i = 1, 2$ нечеткие множества с α -уровнями $A_i^\alpha, B_i^\alpha, i = 1, 2$ и

$$a = (A_1, A_2), b = (B_1, B_2).$$

Тогда скалярное произведение $a \bullet b$ можно определить следующим образом

$$a \bullet b = \int_0^1 \int_{S_B} p(\alpha, x)q(\alpha, x)ds d\alpha, (4)$$

здесь

$$p(\alpha, x) = P_{A_1^\alpha}(x) - P_{A_2^\alpha}(x), q(\alpha, x) = P_{B_1^\alpha}(x) - P_{B_2^\alpha}(x).$$

A расстояние между нечеткими множествами A, B определяется как норма элемента $a = (A, 0) - (B, 0) = (A, B)$

$$\|a\| = \sqrt{a \bullet a} = \left(\int_0^1 \int_{S_B} [P_{A^\alpha}(x) - P_{B^\alpha}(x)]^2 ds d\alpha \right)^{1/2}. (5)$$

Пример 4.1. Пусть D_1, D_2 нечеткое множества с α -уровнями

$$D_1^\alpha = A_1 + (1 - \alpha)B_1, \alpha \in [0, 1],$$

$$D_2^\alpha = A_2 + (1 - \alpha)B_2, \alpha \in [0, 1].$$

Здесь $A_1, A, B_1, B_2 \subset R^n$ выпуклые множества. Тогда множества $D_1 = \tilde{A}_1, D_2 = \tilde{A}_2$. Сумма $D_1 + D_2$, также является нечетким множеством с α -уровнем

$$(D_1 + D_2)^\alpha = A_1 + A_2 + (1 - \alpha)(B_1 + B_2), \alpha \in [0, 1].$$

Пусть $A_1 = A_2$. Определяем норму элемента $d = (D_1, D_2)$

$$\|d\| = \left(\int_0^1 \int_{S_B} (1 - \alpha)^2 [(P_{B_1}(x) - P_{B_2}(x))]^2 ds d\alpha \right)^{1/2} = \left(-\frac{(1 - \alpha)^3}{3} / 0^1 \right)^{1/2} \cdot \left(\int_{S_B} [(P_{B_1}(x) - P_{B_2}(x))]^2 ds \right)^{1/2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \|b\|_{ML_2},$$

где $b = (B_1, B_2)$.

Теперь определяем скорость изменения множества или области. Пусть в момент времени $t \in [0, T]$ изучаемая множество имеет форму $D(t)$. При изменении t область $D(t)$ также меняется. Скорость изменения множества $D(t)$ характеризуется величиной

$$\frac{\partial P_{D(t)}(x)}{\partial t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_{D(t+\Delta t)}(x) - P_{D(t)}(x)}{\Delta t}, x \in S_B. (6)$$

Если существуют множества $V_1(t), V_2(t) \in M, t \in [0, T]$, такие, что

$$\frac{\partial P_{D(t)}(x)}{\partial t} = P_{V_1(t)}(x) - P_{V_2(t)}(x),$$

то величину

$$\dot{D}(t) = (V_1(t), V_2(t)) \in M \times M$$

мы будем называть скоростью изменения области $D(t)$.

Пример 1. Пусть $D(t) = B_t$ является шаром с радиусом t , с центром в начале координат. Тогда известно ([2,4,6]), что $P_{D(t)} = t \cdot \|x\|$. В этом случае $\dot{D}(t) = (B_1, 0)$.

Пример 2. Если $D(t)$ есть прямоугольник

$$D(t) = \{(x_1, x_2): 0 \leq x_1 \leq 2t, 0 \leq x_2 \leq t\},$$

то $\dot{D}(t) = (D(1), 0)$.

Для любого t рассмотрим пару

$$d(t) = (D_1(t), D_2(t)) \in M \times M.$$

Записывая

УДК 681.3.02

$$d(t) = (D_1(t), 0) - (D_2(t), 0)$$

и предполагая, что

$$\dot{D}_1(t), \dot{D}_2(t) \in M \times M,$$

мы аналогично определяем

$$d'(t) = \dot{D}_1(t) - \dot{D}_2(t) \in M \times M.$$

Так как для любого $\alpha \in [0, 1]$ α -уровень нечеткого множества является выпуклым, это понятие дает возможность определять скорость изменения нечеткого множества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нифтиев А.А., Гасымов Ю.С. Управление границами и задачи на собственные значения с переменной областью. Баку, 2004, Монография, изд. БГУ, с. 185 с.
2. Насибов Э. Методы обработки нечеткой информации в задачах принятия решений. Баку, Элм, 2000.
3. Пospelов Д.А. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. М.: Наука, 1986.
4. Демьянов В.Ф. Негладкие задачи теории оптимизации и управления. Изд. ЛГУ, 1982, 322 с.
5. Демьянов В.Ф., Рубинов А.М. Основы негладкого анализа и квазидифференциального исчисления. – М.: Наука, 1990.
6. Aliev F.A., Niftiyev A.A., Zeynalov C.I. Optimal synthesis problem for the fuzzy systems in semiinfinite interval. Appl. Comput. Math., 10(1), Special Issue, 2011, pp.97-105.

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОЕКТОВ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ

Иванников А.Д.

*Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук
Россия, 124365, г. Москва, ул. Советская, 3*

FUNCTIONAL TESTING FOR DIGITAL SYSTEM DESIGNS

A.D. Ivannikov

*Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences
3, Sovetskaya street, Moscow, 124365, Russia
DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2023.1.112.1875*

АННОТАЦИЯ

Чтобы убедиться в правильности разработанного проекта цифровой системы необходимо сформировать перечень некоторых входных воздействий, которые подаются на вход компьютерной модели спроектированной системы. При этом осуществляется анализ выходных сигналов системы и процессов изменения ее внутренних состояний. С использованием теории множеств, теории стационарных динамических систем и теории отношений формулируются алгоритмы выделения множества функций, выполняемых цифровой системой. Предлагаются алгоритмы формирования входных воздействий, обеспечивающих проверку правильности выполнения требуемых функций.

ABSTRACT

For proving of a digital system design correctness it is necessary to form a set of some input signals which would be applied to the computer model of the digital system design. Output signals and internal state changes of the system are analyzed. In the paper the algorithm of digital system function definition is proposed. The algorithm

is based upon set theory, stational dynamic theory and relation theory. Input signal serious forming algorithm is proposed.

Ключевые слова: цифровые системы, отладка проектов, набор тестов, проверка функций, логическое моделирование.

Key words: digital systems, design debugging, test set, function verification, logical simulation.

Введение

Еще в 90-ые году во многих работах указывалось на перспективность использования информационных технологий в различных областях современной человеческой деятельности: коммуникациях, образовании, науке и технике [1-3]. И действительно, в настоящее время проектирование современных цифровых микросистем возможно только на основе систем автоматизированного проектирования. На компьютерную модель цифровой системы подаются некоторые входные воздействия, а реакция модели проектируемой системы проверяется на соответствие техническому заданию.

При этом важной задачей является выбор конечного числа конечных по времени тестовых входных взаимодействий (тестовых примеров). С ростом сложности проектируемых цифровых систем и, соответственно, ростом сложности и длительности тестирования их проектов все более актуальной становится задача выбора минимального полного в определенном смысле набора тестов, правильное выполнение которого позволяет убедиться в отсутствии ошибок проектирования [4, 5]. При решении этой задачи прежде всего необходимо выбрать уровень модели цифровой управляющей системы. Обычно осуществляется декомпозиция задачи отладки проекта [6], прежде всего по типу выявляемых ошибок. Так, для верификации временных диаграмм обмена информации между блоками используются модели цифровых элементов с многозначным представлением электрических сигналов [7, 8]. Для проверки правильности логического функционирования используются модели с булевым представлением сигналов [9, 10]. Используются также различные высокоуровневые модели.

Целью настоящей работы является формализация выбора тестовых примеров для отладки проектов цифровых систем исходя из перечня выполняемых ими функций, что не требует наличия детализированной формальной спецификации на функционирование проектируемой цифровой системы.

Используемая модель цифровых систем

Взаимодействие цифровой системы с объектом управления и внешним миром вообще осуществляется через внешние линии и шины – наборы линий, по которым передается однородная информация, например, адреса или данные. Причем в цифровых системах управления широко используются двунаправленные шины и линии, имеющие также состояние с высоким выходным сопротивлением (отключенное состояние). Будем

рассматривать логическую модель сигналов на шинах и линиях цифровых систем, то есть считать, что значения сигналов представляются как 0 или 1 на линиях и как число из диапазона $0-2^n$ на шинах системы. Цифровые сигналы внешних шин и линий назовем терминальными переменными – множество P . Переменная $p \in P$ всегда имеет одно из значений конечного множества Z_p , элементы которого определяют как целочисленное значение сигнала, так и направленность работы шины или линии.

Событием по переменной p называется изменение переменной p со значения $z_1 \in Z_p$ на значение $z_2 \in Z_p$ в момент времени t . Обозначим такое событие χ_{p,z_1,z_2}^t . Взаимодействие цифровой системы с внешней средой включая управляемый объект есть последовательность переключений сигналов на терминальных шинах и линиях, то есть последовательность событий. Для каждой проектируемой системы имеется множество Ψ допустимых взаимодействий с внешней средой, каждое из которых есть отображение $\psi : [0,t) \rightarrow Q$, $t \in T$, $Q = \prod_{p \in P} Z_p$.

В цифровых системах для каждого конечного временного интервала количество событий по терминальным переменным, то есть количество изменений их значений, конечно. В связи с этим любое взаимодействие ψ может быть представлено в виде вектора $(z_{p_1}^h, \dots, z_{p_k}^h)$ начальных значений переменных p_1, \dots, p_k (k – мощность множества P) в момент времени $t=0$ и последовательности событий по переменным множества P с конечным числом событий за любой конечный интервал времени.

Если в последовательности событий выделить только события, являющиеся изменениями входных сигналов, то такую последовательность можно назвать входным воздействием. Однако, часто моменты подачи входных сигналов на цифровую систему определяются готовностью системы принять эти сигналы, на что указывают определенные выходные сигналы системы. Выполнение какой-либо операции, например, считывания данных цифровой системой, может инициироваться не сигналами внешней среды, а самой системой. В связи с этим использование в качестве аргументов функционирования цифровой системы входных воздействий не всегда удобно.

Выделим из последовательности событий взаимодействия ψ последовательность входных событий и выходных событий управления обменом, которые по заданному протоколу обмена обуславливают моменты времени входных событий. Назовем эту последовательность входным взаимодействием:

$$\mu = (z_{p_1, \dots, p_n}^n, z_{p_{n+q}}^n), \chi_{p_{i_1}, z_{j_1}, z_{j_2}}^{t_1}, \chi_{p_{i_2}, z_{j_3}, z_{j_4}}^{t_2}, \chi_{p_{i_3}, z_{j_5}, z_{j_6}}^{t_3}, \dots,$$

где $p_{i_1}, p_{i_2}, p_{i_3}, \dots$ - переменные, принадлежащие множеству P ;

$z_{j_1}, z_{j_3}, z_{j_5}, \dots$ - значения переменных непосредственно перед событием;

$z_{j_2}, z_{j_4}, z_{j_6}, \dots$ - значения переменных непосредственно после события;

$\chi_{p_{i_1}, z_{j_1}, z_{j_2}}^{t_1}, \chi_{p_{i_2}, z_{j_3}, z_{j_4}}^{t_2}, \chi_{p_{i_3}, z_{j_5}, z_{j_6}}^{t_3}, \dots$ - входные события и выходные события управления обменом;

$t_1 \leq t_2 \leq t_3 \leq \dots$ - упорядоченная последовательность времен событий входного взаимодействия;

n - количество входных переменных;

q - количество переменных управления обменом.

В рассматриваемой модели в качестве аргументов функционирования цифровых систем используются входные взаимодействия, что дает возможность рассматривать режимы работы, инициируемые как внешними входными сигналами, так и самими цифровыми системами. Более подробно формальное представление допустимых взаимодействий цифровых систем рассмотрено в [11].

Структура множества допустимых входных взаимодействий

Пусть для некоторой проектируемой цифровой системы заданы входные взаимодействия

$$\mu_1: [0, t_1] \rightarrow U \times Y^0, \mu_2: [0, t_2] \rightarrow U \times Y^0,$$

$$t_1 \in T_1, t_2 \in T_2,$$

где U - множество состояния выходных переменных;

Y^0 - множество состояния выходных переменных управления обменом.

Определим произведение $\mu_{1,2} = \mu_1 \cdot \mu_2, \mu_{1,2}: [0, t_1 + t_2] \rightarrow U \times Y^0$ как

$$\mu_{1,2} = \mu_1 \cdot \mu_2 = \begin{cases} \mu_1(t) & \text{при } t \in [0, t_1) \\ \mu_2(t - t_1) & \text{при } t \in [t_1, t_1 + t_2) \end{cases}$$

также являющееся входным взаимодействием.

Тогда на множестве входных взаимодействий M определена в общем случае частичная мультипликативная полугруппа $\langle M, \cdot \rangle$.

Практика показывает, что каждая цифровая система выполняет некоторую последовательность функций из конечного алфавита K , причем выполнение каждой функции вызывается одним из входных взаимодействий определенного класса. Из этого утверждения следует, что полугруппа $\langle M, \cdot \rangle$ имеет бесконечное множество \bar{M} порождающих элементов, причем $\bar{M} = \bigcup_{k \in K} M^k$, где M^k - множество входных взаимодействий, обуславливающих выполнение цифровой системой функции k .

С точки зрения влияния на поведение цифровой системы различия двух входных взаимодействий μ_1 и $\mu_2, \mu_1 \in \bar{M}, \mu_2 \in \bar{M}$ могут быть в той или иной степени «не велики». Так, одно из входных взаимодействий может содержать, а другое не содержать одно или несколько безразличных событий, никак не влияющих на функционирование цифровой системы. Примером несущественного события может служить следующая ситуация. После того, как осуществлено считывание информации с какого-либо входа и до момента, когда цифровая система может опять обратиться к этому же источнику информации, сигнал на этом входе может переключиться в любое состояние или содержать любое количество произвольных переключений. При другом критерии «близости» «почти одинаковыми» являются входные взаимодействия, содержащие равное количество событий, отличающихся только значениями ряда t_j в пределах допустимых ограничений. Могут быть рассмотрены и более крупные группы входных взаимодействий.

Представим множество значений данных D входных взаимодействий, обуславливающих выполнение цифровой системой определенной функции k , как $D = \bigcup_{i=1}^n D_i, D_i \cap D_j = \emptyset$ при $i \neq j$. В одну группу входных взаимодействий могут быть отнесены взаимодействия, данные которых принадлежат одному и тому же подмножеству D_i . Каждое подмножество D_i в свою очередь может быть разбито на непересекающиеся подмножества D_{ij} и т.д. Разбиение множества значений данных должно осуществляться исходя из физического смысла задачи таким образом, чтобы входные взаимодействия с данными различных подмножеств D_i обуславливали несколько различные алгоритмы их обработки. Самой большой группой являются множества $M^k, k \in K$ входных взаимодействий, обуславливающих выполнение цифровой системой функции k .

Математическим аналогом понятия «близости» входных взаимодействий является отношение эквивалентности. Пусть имеется конечное множество Λ отношений эквивалентности λ . В частности, множество Λ обязательно включает отношения эквивалентности λ', λ'' .

$(\mu_1, \mu_2) \in \lambda'$ тогда и только тогда, когда $\mu_1 \in M^k$ и $\mu_2 \in M^k$. Именно это отношение эквивалентности позволяет выделить входные взаимодействия, обуславливающие выполнение функции k , в множество M^k .

$(\mu_1, \mu_2) \in \lambda''$, где $\mu_1 \in M^k, \mu_2 \in M^k$, тогда и только тогда, когда набор данных d_1 и d_2 , присутствующие в μ_1, μ_2 , принадлежат одной и той же подобласти D_i данных, где $\bigcup_{i=1}^n D_i = D, D_i \cap D_j = \emptyset$ при $i \neq j, D$ - область данных для M^k . Так возможен случай, когда $(\mu_1, \mu_2) \in \lambda''$ тогда и только

тогда, когда μ_1 и μ_2 , заданные в виде (1), отличаются в ряде событий только значениями z_j^i или $z_j^{i'}$, соответствующими различным данным на информационных входах, обрабатываемых по одинаковому алгоритму, и изменяющимися выходные последовательности цифровой системы или ее блока только в части значений на информационных выходах. Может быть задано несколько отношений эквивалентности такого типа для различных разбиений области данных \mathcal{D} .

В случае, когда функция k предусматривает периодический фрагмент последовательности событий, который может повторяться в различных входных взаимодействиях множества \mathbf{M}^k различное число раз (например, ввод различного числа слов информации), может быть использовано отношение эквивалентности λ''' . $(\mu_1, \mu_2) \in \lambda'''$, если μ_1 и μ_2 содержат одинаковое количество периодически повторяющихся фрагментов. Могут быть заданы и другие отношения эквивалентности.

Выбор множества Λ отношений эквивалентности должен осуществляться разработчиком, исходя из требуемого поведения разрабатываемой цифровой системы и физического смысла задачи. При этом, как будет ясно далее, множество Λ задается косвенно.

Каждое отношение эквивалентности λ множества Λ задается на своем множестве. Так, отношение λ' задано на всем множестве $\bar{\mathbf{M}} = \bigcup_{k \in \mathbf{K}} \mathbf{M}^k$. На каждом множестве \mathbf{M}^k , являющемся классом эквивалентности $\bar{\mathbf{M}}$ по λ' , задаются свои отношения эквивалентности типа отношения λ'' . Так, возможен случай, когда области данных для \mathbf{M}^k есть $\mathcal{D} = \mathcal{D}^1 \times \mathcal{D}^2 \times \dots \times \mathcal{D}^n$, а на множестве значений $\mathcal{D}^i, i = 1, \dots, n$ каждого параметра входных взаимодействий из \mathbf{M}^k определены свои отношения эквивалентности $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, где $\lambda_1 \in \Lambda, \lambda_2 \in \Lambda, \dots, \lambda_n \in \Lambda$. Возможен и другой случай, когда отношение λ_1 определяет разбиение $\mathcal{D} = \bigcup_{i=1}^n \mathcal{D}_i, \mathcal{D}_i \cap \mathcal{D}_{i'} = \emptyset$ при $i \neq i'$, а отношение λ_2 определено только на одном подмножестве или на части подмножеств $\mathcal{D}_{i_1}, \dots, \mathcal{D}_{i_l}$, где $\{i_1, \dots, i_l\} \subset \{1, \dots, n\}$.

Если на некотором множестве \mathbf{M}^* (в качестве \mathbf{M}^* может выступать $\bar{\mathbf{M}}, \mathbf{M}^k$ или класс эквивалентности \mathbf{M}^k по отношению эквивалентности λ) задано отношение $\lambda_1, \lambda_1 \in \Lambda$, то существует разбиение \mathbf{M}^* на классы эквивалентности \mathbf{M}^{*i} по отношению λ_1 . Если на некотором \mathbf{M}^{*i} определено отношение $\lambda_2, \lambda_2 \in \Lambda$, то для μ , где $\mu \in \mathbf{M}^{*i}$ существует произведение эквивалентностей $\lambda_1 \cdot \lambda_2$, которое всегда является эквивалентностью [3]. Произведения эквивалентностей $\prod_{\lambda_i \in \Lambda'} \lambda_i$, где $\Lambda' \subseteq \Lambda$, которые всегда являются эквивалентностями, позволяют провести классификацию множества $\bar{\mathbf{M}}$ с той степенью подробности, которая необходима разработчику, определившему множество Λ . Входные взаимодействия каждого класса эквивалентности, определяемого максимально возможными произведениями $\prod_{\lambda_i \in \Lambda'} \lambda_i$, где $\Lambda' \subseteq \Lambda$,

различаются только значениями ряда t_j в пределах, не нарушающих ограничений на допустимые времена событий.

Как указывалось выше, самыми крупными классами эквивалентности на множестве $\bar{\mathbf{M}}$ являются множества \mathbf{M}^k , соответствующие выделению алфавита выполняемых функций \mathbf{K} .

Составление набора отладочных тестов

Набор отладочных тестов должен проверять как возможность выполнения одной функции после другой, если такая последовательность является допустимой, так и правильность выполнения самих функций. При этом правильность выполнения самих функций является основой. Совершенно ясно, что большее количество отладочных тестов позволяет говорить о правильной работе отлаживаемой системы с большей уверенностью. В связи с тем, что большее количество отлаживаемых тестов повышает трудоемкость и временные затраты на отладку, необходимо, чтобы при увеличении количества тестовых примеров все они были наиболее информативными.

Как указывалось выше для входных взаимодействий, вызывающих выполнение одной функции, определено множество Λ отношений эквивалентности. Каждому λ_i , где $\lambda_i \in \Lambda$, поставим в соответствие признак \mathcal{L}_i - переменную с конечным множеством значений Z_i^* . Каждое значение $z_i^*, z_i^{*j} \in Z_i^*$ признака \mathcal{L}_i указывает на принадлежность $\mu, \mu \in \mathbf{M}$, j -ому классу эквивалентности входных взаимодействий по λ_i . Разработчик задает не множество эквивалентностей Λ , а набор признаков $\mathcal{L}_1, \mathcal{L}_2, \dots, \mathcal{L}_n$ и алфавиты их значений. Множество значений признака \mathcal{L}_1 всегда есть \mathbf{K} . Признак \mathcal{L}_1 определяет разбиение $\bar{\mathbf{M}}$ на \mathbf{M}^k .

Сформулируем задачу составления набора отладочных тестов для проверки отдельных функций формально. Пусть имеется конечное множество признаков $\mathcal{L}_1, \mathcal{L}_2, \dots, \mathcal{L}_n$, каждый из которых может принимать конечное множество значений $Z_1^*, Z_2^*, \dots, Z_n^*$. Пусть признаки $\mathcal{L}_1, \mathcal{L}_2, \dots, \mathcal{L}_n$ упорядочены таким образом, что для каждого $\mathcal{L}_l, l=2, \dots, n$ существует один и только один признак $\mathcal{L}_i, i < l$ такой, что значение \mathcal{L}_l для входного взаимодействия μ определено в том и только в том случае, если признак \mathcal{L}_i для μ имеет значение $z_i^j, z_i^{*j} \in Z_i^*$. Тогда взаимосвязь признаков можно представить двудольным графом $\mathcal{G}(\mathcal{V}, \mathcal{E})$. Множество вершин этого графа есть $\mathcal{V} = \{\mathcal{L}_1, \dots, \mathcal{L}_n\} \cup \{\bigcup_{i=1}^n Z_i^*\}$. Одна группа вершин представляет множество признаков, а другая группа - возможные значения каждого признака. Множество ребер $\mathcal{E} = \mathcal{E}^1 \cup \mathcal{E}^2, \mathcal{E}^1 \cap \mathcal{E}^2 = \emptyset$. Ребра множества \mathcal{E}^1 соединяют вершину \mathcal{L}_i с вершиной z , если $z \in Z_i^*$. Ребра множества \mathcal{E}^2 соединяют вершину z_i^j , где $z_i^j \in Z_i^*$, с вершиной \mathcal{L}_l , если признак \mathcal{L}_l определен для входного взаимодействия μ в том случае, если для этого входного взаимодействия $\mathcal{L}_i = z_i^j$.

Пусть множество отладочных тестов считается полным, если для любого признака $\mathcal{L}_i, i = 1, \dots, n$ и $z \in \mathbf{Z}_i^*$ в множестве отладочных тестов найдется по крайней мере одно входное взаимодействие, для которого $\mathcal{L}_i = z$. Минимальным полным множеством отладочных тестов назовем такое полное множество тестов, число тестов в котором минимально. Задача составления минимального полного множества отладочных тестов состоит в выборе сочетаний значений признаков для каждого отладочного теста множества.

Алгоритм формирования минимального множества отладочных тестов

1. Присвоим ранги вершинам $\mathcal{L}_1, \mathcal{L}_2, \dots, \mathcal{L}_n$, равные количеству ребер из множества \mathcal{E}^2 , входящих в путь от \mathcal{L}_1 до \mathcal{L}_i . Вершина \mathcal{L}_1 имеет ранг 0. Поскольку в $\mathcal{G}(\mathcal{V}, \mathcal{E})$ каждая вершина достижима из вершины \mathcal{L}_1 , то все вершины $\mathcal{L}_1, \dots, \mathcal{L}_n$ имеют ранг, причем ранг 0 имеет только одна вершина \mathcal{L}_1 .

2. Среди вершин множества $\{\mathcal{L}_1, \dots, \mathcal{L}_n\}$, имеющих максимальный ранг, выделим вершину \mathcal{L}_{i_1} , такую, что $|\mathbf{Z}_{i_1}^*|$ максимально. Рассмотрим подграф \mathcal{G}_{i_1} графа $\mathcal{G}(\mathcal{V}, \mathcal{E})$, который включает вершину \mathcal{L}_{i_1} , вершины $z_{i_1}, z_{i_1} \in \mathbf{Z}_{i_1}^*$, вершину $z_l, z_l \in \mathbf{Z}_l^*$, связанную с вершиной \mathcal{L}_{i_1} ребром из множества \mathcal{E}^2 , вершины $\mathcal{L}_{i_2}, \dots, \mathcal{L}_{i_m}$, связанные с вершиной z_l ребрами из множества \mathcal{E}^2 (если такие вершины имеются), вершины z , где $z \in \mathbf{Z}_{i_2}^*$ или $z \in \mathbf{Z}_{i_3}^* \dots$ или $z \in \mathbf{Z}_{i_n}^*$, а также ребра, соединяющие перечисленные вершины. Все вошедшие в подграф \mathcal{G}_{i_1} вершины из множества $\{\mathcal{L}_1, \dots, \mathcal{L}_n\}$ имеют максимальный ранг.

Подграфу \mathcal{G}_{i_1} поставим в соответствие $|\mathbf{Z}_{i_1}^*|$ наборов значений признаков $(z_{i_1}, z_{i_2}, \dots, z_{i_m})$, $z_{i_1} \in \mathbf{Z}_{i_1}^*, z_{i_2} \in \mathbf{Z}_{i_2}^*, \dots, z_{i_m} \in \mathbf{Z}_{i_m}^*$. Признак \mathcal{L}_{i_1} в первом наборе имеет значение $z_{i_1}^1$, во втором наборе $z_{i_1}^2$, и так далее. В последнем наборе признак \mathcal{L}_{i_1} имеет значение $z_{i_1}^k$, где $k = |\mathbf{Z}_{i_1}^*|$. Признаки $\mathcal{L}_{i_s}, s = 2, \dots, m$ в первом наборе имеют значения $z_{i_s}^1$, и в каждом последующем $z_{i_s}^{(p+1) \bmod |\mathbf{Z}_{i_s}^*|}$, где p – номер значения признака \mathcal{L}_{i_1} в предыдущем наборе.

В случае, если подграф \mathcal{G}_{i_1} содержит только одну вершину из множества $\{\mathcal{L}_1, \dots, \mathcal{L}_n\}$, а именно \mathcal{L}_{i_s} , наборы значений признаков есть $(z_{i_s}^1), (z_{i_s}^2), \dots, (z_{i_s}^k)$.

Удалим из графа $\mathcal{G}(\mathcal{V}, \mathcal{E})$ подграф \mathcal{G}_{i_1} и ребро из множества \mathcal{E}^1 , связывающее вершины z_l и \mathcal{L}_l . Добавим в полученный граф $|\mathbf{Z}_{i_1}^*|$ вершин, помеченных наборами значений признаков $(z_l, z_{i_1}, z_{i_2}, \dots, z_{i_m})$, $z_l \in \mathbf{Z}_l^*$, причем для всех $|\mathbf{Z}_{i_1}^*|$ вершин значение z_l одинаково, а поднаборы $(z_{i_1}, z_{i_2}, \dots, z_{i_m})$ равны наборам значений признаков, соответствующих подграфу \mathcal{G}_{i_1} . Соединим добавленные вершины с вершиной \mathcal{L}_l , полученные ребра отнесем к множеству \mathcal{E}^1 . Полученный граф примем за $\mathcal{G}(\mathcal{V}, \mathcal{E})$.

3. Если \mathcal{L}_l не есть \mathcal{L}_1 , то повторим пункт 2. Если \mathcal{L}_l есть \mathcal{L}_1 , то полученное множество наборов значений признаков представляет отладочные тесты минимального полного множества.

Анализ предложенного алгоритма

Покажем, что приведенный выше алгоритм всегда сходится, а полученное множество наборов значений признаков есть минимальное полное множество отладочных тестов.

Каждое выполнение шага 2 алгоритма уменьшает количество вершин множества $\{\mathcal{L}_1, \dots, \mathcal{L}_n\}$ в графе $\mathcal{G}(\mathcal{V}, \mathcal{E})$. Следовательно, после конечного числа выполнения шага 2 граф $\mathcal{G}(\mathcal{V}, \mathcal{E})$ будет содержать только одну вершину из множества $\{\mathcal{L}_1, \dots, \mathcal{L}_n\}$, а именно вершину \mathcal{L}_1 , что является признаком окончания работы.

Для каждого подграфа \mathcal{G}_{i_1} , выделяемого на шаге 2, наборы значений признаков будут содержать все возможные значения признаков $\mathcal{L}_{i_1}, \dots, \mathcal{L}_{i_m}$, вошедших в подграф \mathcal{G}_i . Все наборы значений признаков подграфа \mathcal{G}_{i_1} сохраняются в новом графе $\mathcal{G}(\mathcal{V}, \mathcal{E})$. Следовательно, для всех признаков полученные наборы будут содержать все значения, то есть полученное множество наборов значений признаков будет полным множеством отладочных тестов.

Для каждого подграфа \mathcal{G}_i , выделяемого на шаге 2, полученное множество наборов признаков минимально и содержит $\max |\mathbf{Z}_{i_k}^*|, k = 1, \dots, m$ наборов. Эти наборы признаков могут войти в множество окончательных наборов только в сочетании со значением z_l признака \mathcal{L}_l , то есть значение z_l признака должно встречаться в полном множестве отладочных тестов не менее $\max |\mathbf{Z}_{i_k}^*|, k = 1, \dots, m$, раз. Следовательно, полученное в результате работы алгоритма множество отладочных тестов будет минимальным.

Минимальная мощность минимального полного множества отладочных тестов есть $\max |\mathbf{Z}_i^*|, i = 1, \dots, n$, где n – количество признаков $\mathcal{L}_1, \dots, \mathcal{L}_n$; максимальная мощность минимального полного множества отладочных тестов есть $\sum_{i=1}^n (|\mathbf{Z}_i^*| - 1) + 1$. Покажем это.

Минимальное полное множество отладочных тестов не может содержать менее, чем $\max |\mathbf{Z}_i^*|, i = 1, \dots, n$, тестов, так как в связи с нашим предположением для каждого признака множества $\{\mathcal{L}_1, \dots, \mathcal{L}_n\}$, в том числе для \mathcal{L}_i , для которого $|\mathbf{Z}_i^*|$ максимально, полное множество тестов должно содержать все возможные значения из \mathbf{Z}_i^* .

Минимальное полное множество будет содержать $\max |\mathbf{Z}_i^*|, i=1, \dots, n$, отладочных тестов в том случае, когда в графе $\mathcal{G}(\mathcal{V}, \mathcal{E})$ все вершины $\mathcal{L}_2, \dots, \mathcal{L}_n$ будут непосредственно связаны с \mathcal{L}_1 ребрами подмножества \mathcal{E}^2 .

При наличии только одного признака \mathcal{L}_1 минимальное полное множество отладочных тестов содержит $|\mathbf{Z}_1^*|$ тестов, при двух признаках $\mathcal{L}_1, \mathcal{L}_2$ - $|\mathbf{Z}_1^*| + |\mathbf{Z}_2^*| - 1$ тестов, при трех признаках $\mathcal{L}_1, \mathcal{L}_2, \mathcal{L}_3$ - не более $|\mathbf{Z}_1^*| + |\mathbf{Z}_2^*| - 1 + |\mathbf{Z}_3^*| - 1$

тестов и т.д. Таким образом, максимальная мощность минимального полного множества отладочных тестов равна $\sum_{i=1}^n (|Z_i^*| - 1) + 1$. Минимальное полное множество отладочных тестов содержит $\sum_{i=1}^n (|Z_i^*| - 1) + 1$ тестов в том случае, если в графе $\mathcal{G}(\mathcal{V}, \mathcal{E})$ каждой вершине z , где $z \in Z_i^*, i = 1, \dots, n$, инцидентно не более одного ребра из множества \mathcal{E}^2 .

Заключение

Предлагаемый алгоритм обеспечивает формирование минимального множества отладочных тестов на основе заданного разработчиком перечня отношений эквивалентности на множестве входных взаимодействий. Другими словами, разработчик выбирает разделение каждой функции, выполняемой цифровой системой, на подфункции исходя из физического смысла. Безусловно, при этом присутствует некоторый субъективный фактор. При иерархическом разделении функций на подфункции разработчик в какой-то мере ориентируется на свое понимание о том, как данная подфункция реализуется в цифровой системе. Тем не менее, выбор тестовых примеров для отладки проектов цифровых систем на основе проверки выполняемых функций является весьма эффективным.

Список литературы

1. Юсупов Р.М. Информатизация и наука // Проблемы информатизации. 1994. № 1-2. С. 22-28.
2. Тихонов А.Н., Иванников А. Д. Информатизация российского образования и общества в целом // Международное сотрудничество. 1997. № 4. С. 1.
3. Тихонов А.Н., Иванников А.Д., Цветков В.Я. Образовательные услуги как инструмент качества образования // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2009. № 3. С. 94-96.
4. Слинкин Д.И. Анализ современных методов тестирования и верификации проектов сверхбольших интегральных схем // Программные продукты и системы. 2017. Т. 30. № 3. С. 401-408.
5. Абрамов Е.М., Егоров А.В., Козлов А.О., Поперечный П.С., Путря Ф.М., Фролова С.Е. Выбор платформ прототипирования для СФ-блоков и подсистем СНК // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 8. С. 76-83.
6. Иванников А.Д. Анализ методов декомпозиции задачи отладки проектов цифровых систем // Информационные технологии. 2016. Т. 22. № 10. С. 758-763.
7. Гаврилов С.В., Гудкова О.Н., Щелоков А.Н. Логико-временной анализ нанометровых схем на основе интервального подхода // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 7(132). С. 85-91.
8. Гаврилов С.В., Иванова Г.А. Анализ быстродействия сложных цифровых схем с учетом неопределенности технологических и схемных параметров // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 53. С. 29-35.
9. Кащеев Н.И., Пономарев Д.М., Подъяблонский Ф.М. Построение тестов цифровых схем с использованием обобщенной модели неисправностей и непрерывного подхода к моделированию // Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского. 2011. №3 (2). С. 72-77.
10. Зотов В. Инструментальные средства разработки и отладки цифровых устройств и встраиваемых микропроцессорных систем, проектируемых на основе ПЛИС FPGA фирмы XILINX серии Kintex-7 // Компоненты и технологии. 2012. № 4 (129). С. 124-132
11. Иванников А.Д., Стемпковский А.Л. Формализация задачи отладки проектов цифровых систем // Информационные технологии. 2014. № 9. С. 3-10.

УДК 614.841.45:621.316.9

СТАТИСТИКА ПОЖАРОВ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК*Мельников Владимир Семенович*
кандидат технических наук**FIRE STATISTICS AND SAFETY OF ELECTRICAL INSTALLATIONS***V.S.Melnikov*

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2023.1.112.1876

АННОТАЦИЯ

Настоящая критическая статья подготовлена в связи с дополнением «Правил противопожарного режима в РФ» перечнем объектов (электроустановок), которые оборудуются устройствами защиты от дугового пробоя (выключателями дуги). С учётом выхода статистических данных о пожарах за 2021 и 2022 год в работе обновлены выборки и проверена оценка принятых инженерных решений.

Показано, что несоизмеримые затраты на внедрение выключателей дуги не имеют никакого экономического обоснования. Также установлено, что показатели социального пожарного риска для выделенных групп зданий (учебно-воспитательного назначения, здравоохранения, социального обслуживания и временного пребывания людей) не имеют никаких аномалий и, следовательно, не могут использоваться для выработки особых требований.

Выполненное сравнение макропоказателей статистики пожаров США и РФ привело к выводу, о том, что имеет место определённое нивелирование межгосударственных различий, и это позволяет использовать зарубежный опыт для прогнозирования.

Дополненная и переформатированная статистика пожаров в США за десять лет (с 2012 по 2021 год) показала рост числа пожаров в жилом секторе, несмотря на массовое применение выключателей дуги. Отмечено, что доказательства низкой эффективности американской технологии никак не учитывались при установлении обязательного применения выключателей дуги в РФ.

Универсальная защита электроустановок от аварий и пожаров представлена как реальная альтернатива узконаправленной технологии контроля дугового пробоя. Отмечена перспективность развития доступной идеи отключения электропитания по сигналу пожарного извещателя (пожарной сигнализации) с помощью штатного устройства дифференциального тока. Указано, что это решение полностью соответствует положениям «Технического регламента о требованиях пожарной безопасности», опирается на основные нормативные документы и не требует изменения типовых проектов электроснабжения. И, если защита от дуги, нацелена лишь на один маловероятный источник опасности, то универсальная защита будет действовать как при пожарах электрооборудования, так и при любых других инициаторах аварийного режима, иных источниках зажигания.

Впервые целесообразность применения универсальной защиты подтверждена с привлечением статистических данных о числе погибших из-за сопутствующих проявлений опасных факторов пожара. Для жилого сектора отмечено то, что в помещениях, где используется газ, при его утечке универсальная защита обеспечивает отключение потенциального источника зажигания, и так предотвращается взрыв. Кроме того, универсальная защита при любой аварии исключает поражение электрическим током в том числе спасателей и пожарных.

В заключении сделан вывод о нарушении принципов технического регулирования нормативными документами и нормативным правовым актом, обеспечивающими применение выключателей дуги.

ABSTRACT

This critical article has been prepared in connection with the addition of the "Rules of fire protection in the Russian Federation" with a list of objects (electrical installations) that are equipped with arc breakdown protection devices (arc switches). Taking into account the release of statistical data on fires for 2021 and 2022, the work updated the samples and verified the assessment of the engineering solutions adopted.

It is shown that the disproportionate costs of introducing arc switches have no economic justification. It is also established that the indicators of social fire risk for the selected groups of buildings (educational purposes, healthcare, social services and temporary stay of people) do not have any anomalies and, therefore, cannot be used to develop special requirements.

The comparison of macro-indicators of fire statistics of the USA and the Russian Federation led to the conclusion that there is a certain leveling of interstate differences, and this allows using foreign experience for forecasting.

The updated and reformatted statistics of fires in the USA for ten years (from 2012 to 2021) showed an increase in the number of fires in the residential sector, despite the massive use of arc switches. It is noted that the evidence of the low efficiency of the American technology was not taken into account in any way when establishing the mandatory use of arc switches in the Russian Federation.

Universal protection of electrical installations from accidents and fires is presented as a real alternative to narrowly focused arc breakdown control technology. The prospects for the development of an affordable idea of

disconnecting the power supply at the signal of a fire detector using a standard differential current device are noted. It is indicated that this decision fully complies with the provisions of the "Technical Regulations on fire safety requirements", is based on the main regulatory documents and does not require changes in standard power supply projects. And, if the arc protection is aimed at only one unlikely source of danger, then the universal protection will act both in case of electrical equipment fires, and in case of any other initiators of the emergency mode, other ignition sources.

For the first time, the expediency of using universal protection was confirmed with the involvement of statistical data on the number of deaths due to concomitant manifestations of fire hazards. For the residential sector, it is noted that in rooms where gas is used, when it leaks, universal protection provides disconnection of a potential ignition source, and so an explosion is prevented. In addition, universal protection in case of any accident excludes electric shock, including rescuers and firefighters.

In conclusion, it is concluded that the principles of technical regulation are violated by regulatory documents and regulatory legal acts that ensure the use of arc switches.

Ключевые слова: Пожарная безопасность, электроустановка, активная защита

Keywords: Fire safety, electrical installation, active protection

ВВЕДЕНИЕ

В ряде предыдущих публикаций рассмотрено применение выключателей дуги для защиты электроустановок и последствия этого ошибочного решения на государственном уровне [1, 2]. Цель настоящей работы связана с актуализацией предыдущих выводов в связи с выходом новых статистических данных за 2021 и 2022 год.

Напомним, что термин выключатели дуги введён как собирательный для устройств защиты от дугового пробоя (AFCI, AFDD, ВДП, УЗДП и т.д.). Требования к ним изложены в ГОСТ ИЕС 62606-2016, а правила применения - в СП 256.1325800.2016.

Перечень объектов (электроустановок), которые оборудуются устройствами защиты от дугового пробоя, установлен Пунктом 32 «Правил противопожарного режима в Российской

Федерации» по Постановлению Правительства РФ от 30.03.2023 № 510. В этот перечень включены здания общежитий, хостелов, общеобразовательных организаций, образовательных организаций с наличием интерната, дошкольных образовательных организаций, специализированных домов престарелых и инвалидов (неквартирных), спальных корпусов организаций отдыха детей и их оздоровления, медицинских организаций, предназначенных для осуществления медицинской деятельности.

По протоколу расчёта стандартных издержек на реализацию указанного нормативного правового акта запланированы затраты за счёт бюджетов бюджетной системы РФ в размере **74,5 миллиарда рублей**. Титул этого протокола скопирован и представлен в табл. 1.

Таблица 1

Протокол расчёта стандартных издержек по проекту нормативного правового акта

«О внесении изменений в правила противопожарного режима в Российской Федерации»

ID проекта: 02/07/02-22/00124726

Ссылка на проект: <http://regulation.pba.su/p/124726>

Отчет сгенерирован: 18.02.2022 13:14

Затраты на содержательные требования:	79 943 295 430,00	Рублей
Из них за счет бюджетов бюджетной системы РФ	74 546 538 530,00	Рублей
За счет предпринимателей	5 396 756 900,00	Рублей

Исходные данные для расчёта издержек учитывали широкий адресный перечень объектов, стоимость устройств защиты, а также то, что выключатели дуги имеют ограниченную зону функционирования. И, например, для комплектации одного небольшого школьного здания площадью 5000 м² потребуется около 100 выключателей дуги.

Кроме официального протокола столь большие затраты подтверждены письмом МЧС

России от 16.05.2023 № ИГ-19-974. Дополнительно следует отметить, что реальные издержки со временем существенно превысят расчётные значения из-за инфляции, использования импортных деталей и эксплуатационных расходов.

Оценка адекватности издержек может быть выполнена путём сравнения с ущербом от пожаров. Официальные сведения о них показаны в виписке из сборника ВНИИПО [3] (см. табл. 2).

Таблица 2

Ущерб от пожаров, выписка из табл. 6 [3]				
Объект пожара	Прямой материальный ущерб, тыс. руб.			
	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
Здания учебно-воспитательного назначения	39 233	29 076	108 181	93 091
Здание здравоохранения и социального обслуживания	21 193	29 843	36 961	39 002
Здания для временного пребывания (проживания)	154 284	68 040	61 708	109 889
сумма:	214 710	126 959	206 850	241 982
Прямой ущерб всего по РФ из табл.1 [3]	18 170 365	20 876 301	16 248 694	18 701 109
Прямой ущерб всего в РФ при пожарах от электрооборудования из табл.3 [3]	7 290 548	13 250 190	7 042 790	11 141 608
Прямой ущерб в жилых домах из табл.6 [3]	3 319 410	2 975 035	3 466 369	4 175 120

Все объекты, перечисленные Постановлением Правительства РФ от 30.03.2023 № 510, относятся к трём группам. Поэтому в табл. 2 просуммированы данные об ущербе по трём строчкам за каждый год.

Получается, что затраты в размере **74,5 миллиардов рублей** более чем в 370 раз превысят средний годовой ущерб от пожаров ($\approx 0,2$ миллиарда рублей) или более чем в 70 раз превысят ущерб за пять лет (≈ 1 миллиард рублей).

Причём ущерб по выделенным трём группам объектов относится ко всем пожарам, т.е. отдельно ущерб при пожарах от электрооборудования ещё меньше. Соответственно будет совсем ничтожна и выгода от намеченных затрат.

Кроме того, по табл. 2 видно, что ущерб от пожаров для перечисленных объектов существенно (во много раз) ниже, чем ущерб от всех пожаров в РФ, а также от пожаров электрооборудования и от пожаров в жилом секторе. Однако никакие другие объекты кроме отнесённых к трём группам так специально для применения мер защиты в «Правилах противопожарного режима» не выделены.

Впрочем, расчётные издержки превышают годовой ущерб по любому показателю в таблице. И очевидно, что несоразмерность затрат не имеет никакого экономического обоснования.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Замеченное ошибочное решение на государственном уровне является следствием серьёзной ошибки инженеров. В связи с этим представленные данные будут рассматриваться, как исходные для выбора технологий на основании более полного изучения статистики пожаров.

При выполнении настоящей работы использовалась официальная статистика пожаров США и РФ. Наибольший практический интерес представлял тот факт, что применение выключателей дуги в США началось более 20 лет

назад, а в РФ они никогда не использовались. Понятно, что для сравнения и прогнозирования на основании зарубежного опыта необходимо нормирование по численности населения. Кроме такого общепринятого приёма в отношении некоторых матриц с показателями выполнено переформатирование в таблично-графическую форму. Причём вместо громоздких круговых диаграмм хронологические таблицы были дополнены компактными графиками, максимально сохранено числовое содержание и без разрыва контента наглядно показано изменение целевых показателей.

Помимо экономических обоснований на выбор систем и технологий предотвращения пожаров влияет значимость социального пожарного риска. Травмирование, отравление и гибель людей всегда важнее материального ущерба, поэтому особое внимание при исследовании статистики уделено социальным аномалиям и крупным пожарам.

Как уже сказано, исследование статистики пожаров не было ограничено перечнем объектов, необоснованно выбранных в РФ для внедрения выключателей дуги. Раздел данных, касающийся пожаров, причиной которых было нарушение правил устройств и эксплуатации (НПУиЭ), изучался по отдельным категориям электрооборудования с целью выявления лидеров отрицательного рейтинга и выработки соответствующих предложений.

РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Для трёх выделенных групп сведения о количестве пожаров показаны в табл. 3. Она, как и предыдущая, является выпиской из сборника ВНИИПО. Распределение этих показателей показывает неизменную ситуацию на протяжении ряда лет и то, что в сравнении с общим числом пожаров доля для рассматриваемых объектов в сумме не превышает 0,3%.

Таблица 3

Распределение основных показателей обстановки с пожарами, выписка из табл. 6 [3]				
Объект пожара	Количество пожаров, ед.			
	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
Здания учебно-воспитательного назначения	340	294	345	325
Здание здравоохранения и социального обслуживания	266	265	285	294
Здания для временного пребывания (проживания)	366	273	320	340
сумма:	972	832	950	959
% от общего количества пожаров	0,21	0,19	0,24	0,27
Общее количество пожаров в РФ по табл. 1 [3]	471 537	439 394	390 859	352 602

Соответствующие сведения о числе крупных пожаров приведены в табл. 4. Для сравнения здесь сделана выписка по объектам производственного и

складского назначения, показатели которых многократно хуже единичных случаев по выделенным группам.

Таблица 4

Распределение основных показателей крупных пожаров, выписка из табл. 42 [3]				
Объект пожара	Количество крупных пожаров, ед.			
	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
Здания учебно-воспитательного назначения	0	0	1	1
Здание здравоохранения и социального обслуживания	0	0	0	0
Здания для временного пребывания (проживания)	1	1	0	0
сумма:	1	1	1	1
Количество крупных пожаров в производственных и складских зданиях по табл. 42 [3]	26	26	24	22

Показатели социального пожарного риска отражены в табл. 5. И это, пожалуй, наиболее страшные результаты войны с пожарами. В 2022 году погибло 7776 человек, среди них большинство при пожарах в жилых домах, 6103 человека (78,5%). На этом следовало фокусировать внимания и совершенствовать систему противопожарной защиты в первую очередь для жилых домов. Обстановка для выделенных объектов намного лучше, чем в целом по стране, в сумме по трём строкам в табл. 5 потери за 2022 год составили 28 человек. Указанные официальные

данные полностью опровергают мнение о том, что Постановление Правительства РФ от 30.03.2023 № 510 учитывает случаи, которые сопровождаются массовой гибелью и травмированием людей.

Количество погибших при пожарах от электрооборудования также чрезвычайно велико. Но и этот показатель следует учитывать при выборе организационных мероприятий и технических средств, направленных на защиту людей от воздействия опасных факторов пожаров главным образом в жилых домах.

Таблица 5

Распределение основных показателей обстановки с пожарами, выписка из табл. 6 [3]				
Объект пожара	Погибло человек			
	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
Здания учебно-воспитательного назначения	1	1	0	0
Здание здравоохранения и социального обслуживания	7	36	16	12
Здания для временного пребывания (проживания)	19	15	12	16
сумма:	27	52	28	28
Количество погибших всего в РФ по табл. 1 [3]	8 567	8 313	8 473	7 776
Количество погибших всего в РФ при пожарах от электрооборудования по табл. 3 [3]	2 034	1 942	2 325	2 058
Количество погибших в жилых домах по табл. 6 [3]	6 626	6 303	6 668	6 103
Количество погибших в жилых домах при пожарах от электрооборудования по табл. 16 [3]	1 696	1 576	1 924	1 715

Итак, на выделенных объектах во всём складывается относительно благоприятная обстановка и не требуются какие-либо особые решения для обеспечения пожарной безопасности. В том числе ни один из приведённых показателей

не может использоваться для обоснования применения выключателей дуги.

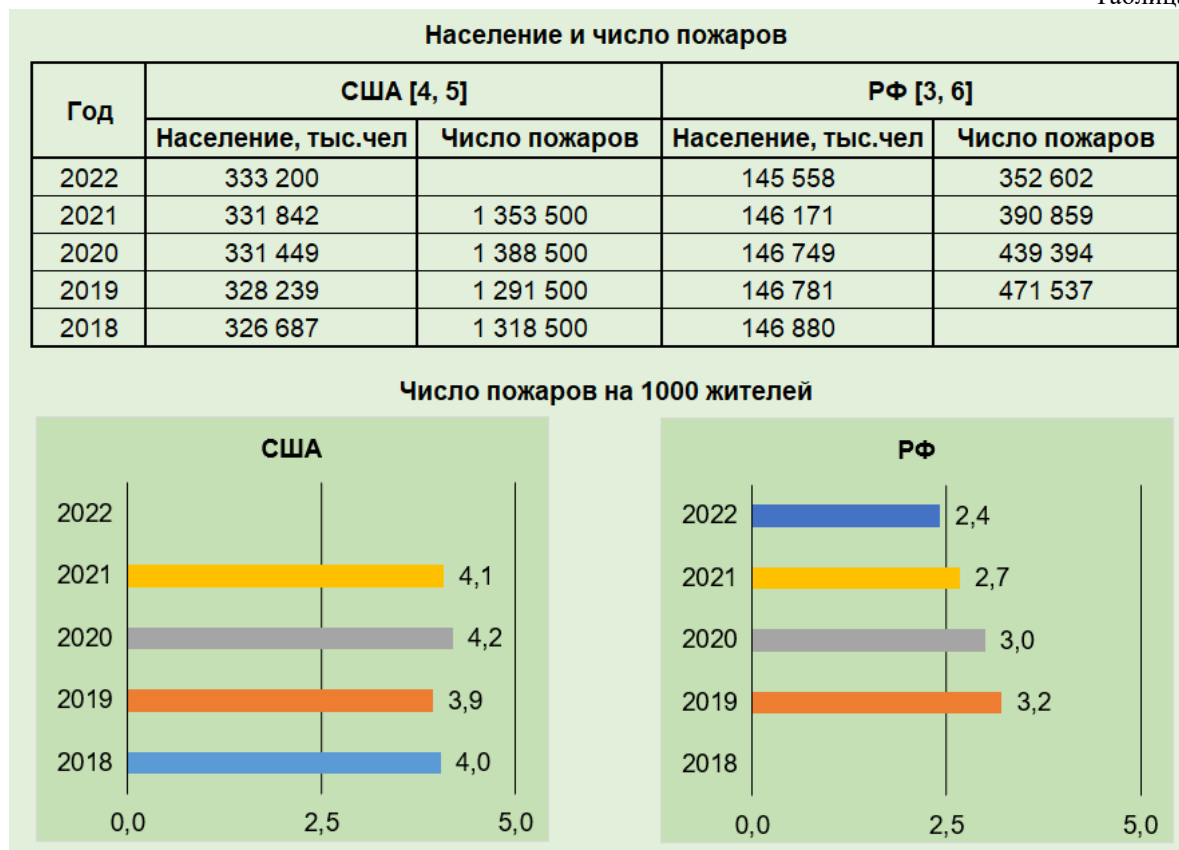
МАКРОПОКАЗАТЕЛИ США И РФ

Использования зарубежного опыта возможно в случае относительно близких условий внедрения

технологических решений. Однако пожары возникают на фоне самого широкого разнообразия способствующих и ограничивающих причин, от климата до менталитета людей. Тем не менее по территории, числу лесных пожаров, высокой пожарной опасности объектов защиты, а также

пожарной опасности строительных конструкций особенно в сельской местности и в малоэтажных городских поселениях имеет практический смысл сравнивать именно США и РФ. Совокупность названных и многих других факторов приводит к результатам, показанным в табл. 6.

Таблица 6



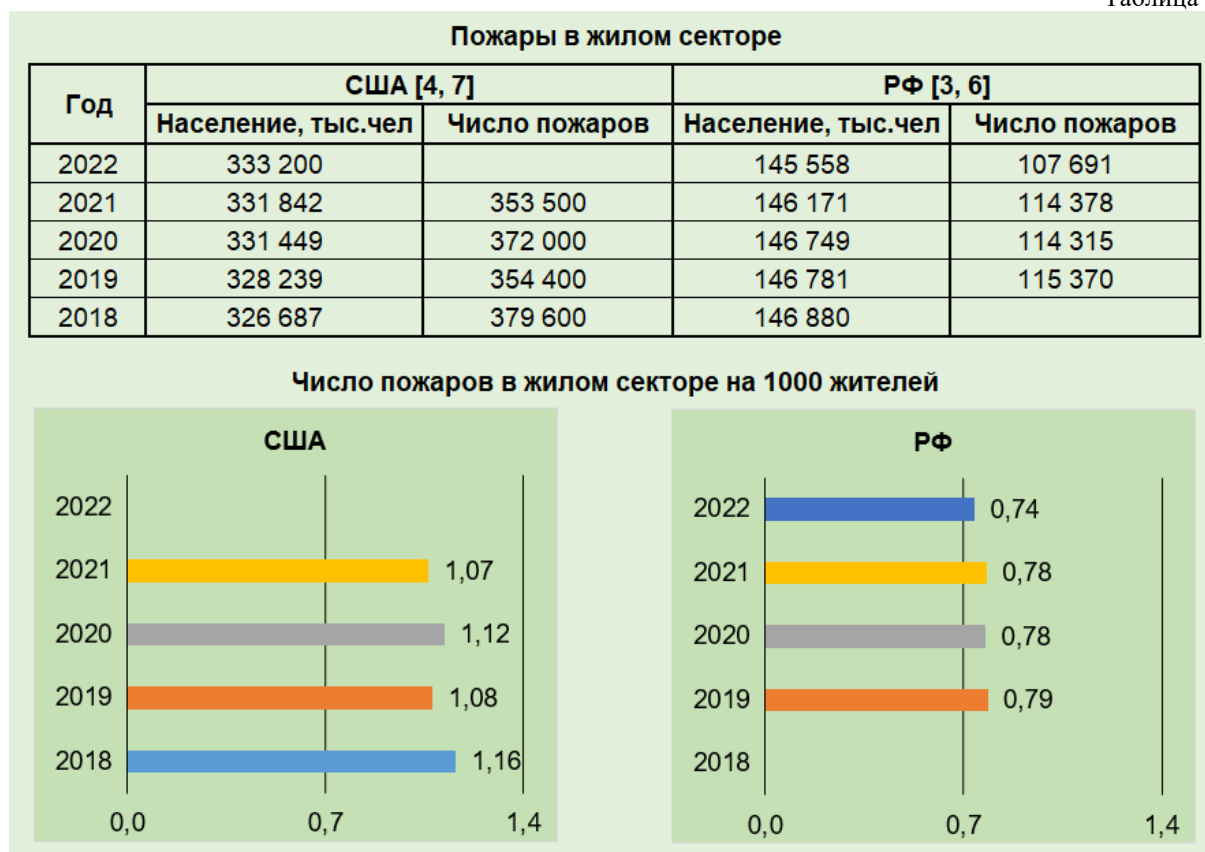
При переформатировании в таблично-графическую форму тут более новые данные расположены сверху (2018 год – внизу, 2022 год – вверху).

Следует отметить, что показатели РФ лучше, чем США, т.к. за пять последних лет имело место меньше пожаров и их число постоянно уменьшалось. Это видно, как по абсолютным значениям, так и по относительным (в расчёте на тысячу жителей).

В рамках рассматриваемой темы кроме общего числа пожаров имеет смысл сравнивать показатели для наиболее уязвимых объектов, а именно домов и

построек жилого сектора. И тут, например, можно отметить такие общие ошибки, как прокладка электропроводок по горючему основанию и расположение нагревательных приборов на строительных конструкциях из горючих материалов. Также следует учитывать одинаковые проблемы, возникающие из-за большого числа старых электроустановок, выполненных с применением изоляционных материалов, распространяющих горение.

Абсолютные и относительные показатели для жилого сектора лучше в РФ (см. табл. 7).



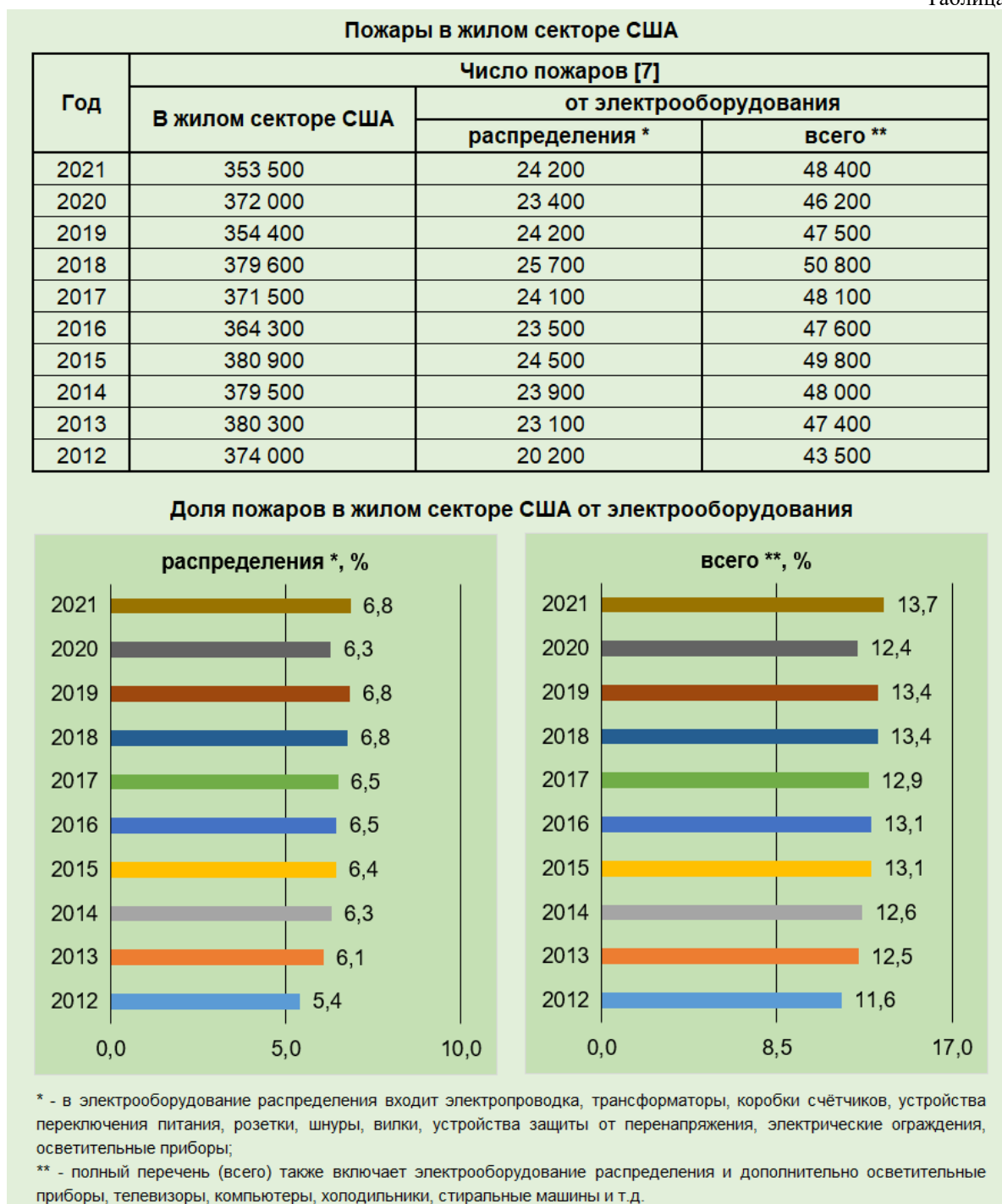
Исходя из этого уже можно предполагать то, что система противопожарной защиты построена рационально. Но для более надёжной оценки следует подробнее рассмотреть ситуацию и технологии защиты. Здесь же (в рамках статистики) важно отметить сопоставимость относительных показателей, в расчёте на тысячу жителей они различаются на проценты. Следовательно, имеет место определённое нивелирование межгосударственных различий. Именно это позволяет использовать зарубежный опыт для прогнозирования. Если какая-либо технология даёт положительный результат в США, то можно ожидать такой же эффект при её внедрении в РФ. Точно также отрицательный результат следует иметь ввиду ещё до внедрения зарубежных технологий. Именно такая предпосылка сложилась

в настоящее время в отношении идеи использования выключателей дуги для электроустановок в РФ. Поэтому далее рассмотрена соответствующая статистика США.

ИТОГИ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ДУГИ

Как известно, к 2012 году в США после длительного начального периода был сформирован современный перечень помещений, которые в обязательном порядке должны оборудоваться защитой от дугового пробоя [1]. Соответственно более 10 лет фактически действует естественный полигон для массовых испытаний выключателей дуги в жилых домах. Итоги такого глобального эксперимента представлены в табл. 8, где в верхних строках и столбцах графиков вновь расположены более новые сведения.

Таблица 8



Дополненные и переформатированные данные, как и предыдущие в работе [1], не выявили положительной динамики. Никакого снижения числа пожаров электрооборудования в жилом секторе за 10 лет не наблюдалось, напротив заметен рост. Причём ухудшение ситуации видно по отдельным группам электрооборудования и в целом для электроустановок, а также по абсолютным и относительным показателям.

Таким образом массовое применение выключателей дуги решение поставленной задачи не обеспечило. Повторять этот эксперимент в

России без дополнительных исследований не имеет никакого смысла. Через десять лет будет получен тот же ущерб от пожаров с весомым увеличением расходов на внедрение бесполезных устройств. Уверенно можно утверждать, что экономический эффект от затрат отсутствует. А чтобы исключить предположение о том, что без выключателей дуги результаты были бы ещё хуже, воспользуемся детализацией статистических данных из работ [8, 9]. Они также уже приводились в работе [1], здесь лишь дополнены и показаны в табл. 9.

Таблица 9

Средние значения за 2015...2019 г. пожаров электрооборудования в жилых домах США и пожаров, при которых дуга идентифицирована как источник тепла				
Ист.	Перечень электрооборудования	Число пожаров электрооборудования	С дуговым пробоем	
			число	%
[8] [9]	Распределительное и осветительное (электропроводка, шнуры, вилки, розетки, трансформаторы, лампы и т.д.)	32 620	23 760	73
[10]	Электроприборы (электропроводка, шнуры, источник питания, кухонное оборудование, отопительное оборудование, вентиляторы, кондиционеры, холодильники, телевизоры и т.д.)	46 700	29 200	63

По сути, расследования выявили то, что десятки тысяч пожаров сопровождались дуговым пробоем, несмотря на массовое оснащение объектов выключателями дуги. Т.е. в подавляющем большинстве случаев (73% и 63%) выключатели дуги поставленную задачу не решили, своевременного отключения электропитания не было, и развитие аварийной ситуации не предотвращено.

Важно отметить, что сегодня установлена и причина отрицательного результата массового внедрения. Для этого путём натурального моделирования пожаров выявлены этапы повреждения и зажигания изоляции, других горючих материалов, плавления и разрыва проводников при перегрузках, первичных и вторичных замыканиях, а также при появлении дефектных соединений. Полученный алгоритм процесса однозначно показывает, что тот дуговой пробой, который может быть идентифицирован устройствами защиты, возникает на последней стадии развития пожароопасной ситуации, причём уже после воспламенения горючих материалов. Следовательно выявление дугового пробоя не может предотвратить пожар по объективным причинам, независимо от качества выключателей дуги [1, 11]. И высокая доля сопровождаемых дуговым пробоем пожаров в жилых домах США (73% и 63%) связана именно с этими объективными причинами, т.е. с определённой последовательностью событий.

Следует понимать то, что обсуждение защиты электроустановок от аварий и пожаров многие годы ведётся в социальных сетях. На русскоязычных и на иностранных форумах давно представлены многочисленные тесты выключателей дуги различных моделей и всех изготовителей. В основном это эксперименты практикующих электриков, которые показали то, что устройства не реагируют на первичные замыкания (размыкания) и на появление дефектных соединений, лишь иногда срабатывают при вторичных замыканиях металлических проводников, причём после воспламенения изоляции. Таким образом

бесплезность применения выключателей дуги хорошо известна.

Данные доказательства низкой эффективности американской технологии никак не учитывались при установлении обязательного применения. Причём серьёзные противоречия Постановления Правительства РФ от 30.03.2023 № 510 были указаны в отзывах и обращениях, но разработчики нормативного правового акта, а также ответственные лица, игнорировали указанные факты и уклонились от их обсуждения.

УНИВЕРСАЛЬНАЯ ЗАЩИТА

Принципы построения универсальной защиты обобщены в работе [1], а конструктивные решения подробно рассмотрены в монографии [12]. Суть же заключается в развитии простой идеи отключения электропитания по сигналу пожарного извещателя (пожарной сигнализации) с помощью штатного устройства дифференциального тока. Наиболее важно то, что «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (Федеральный закон 123-ФЗ от 22.07.2008 ред. от 01.03.2023) содержит указание о том, что линии электроснабжения помещений зданий и сооружений должны иметь устройства защитного отключения, предотвращающие возникновение пожара (п. 4 Статьи 82). Для этого в том числе и предназначены устройства дифференциального тока. Одновременно автоматические установки пожаротушения и пожарной сигнализации в зависимости от разработанного при их проектировании алгоритма должны обеспечивать подачу сигналов на технические средства управления инженерным оборудованием (п. 4 Статьи 83). Причём к инженерному оборудованию относится и система электроснабжения. Таким образом применение универсальной защиты полностью соответствует требованиям нормативного правового акта, кроме того, опирается на ряд нормативных документов (СП 484.1311500.2020, СП 485.1311500.2020, СП 486.1311500.2020, СП 256.1325800.2016 и ГОСТ Р 50571.4.41—2022). В этом заключается основа экономической эффективности.

Техническая эффективность универсальной защиты проявляется благодаря выполнению первоочередных действий для предотвращения развития опасных ситуаций при самом широком перечне причин пожаров или аварий. И, если защита от дуги, нацелена лишь на один маловероятный источник опасности, то универсальная защита будет действовать как при пожарах электрооборудования, так и при любых других инициаторах аварийного режима, иных источниках загорания.

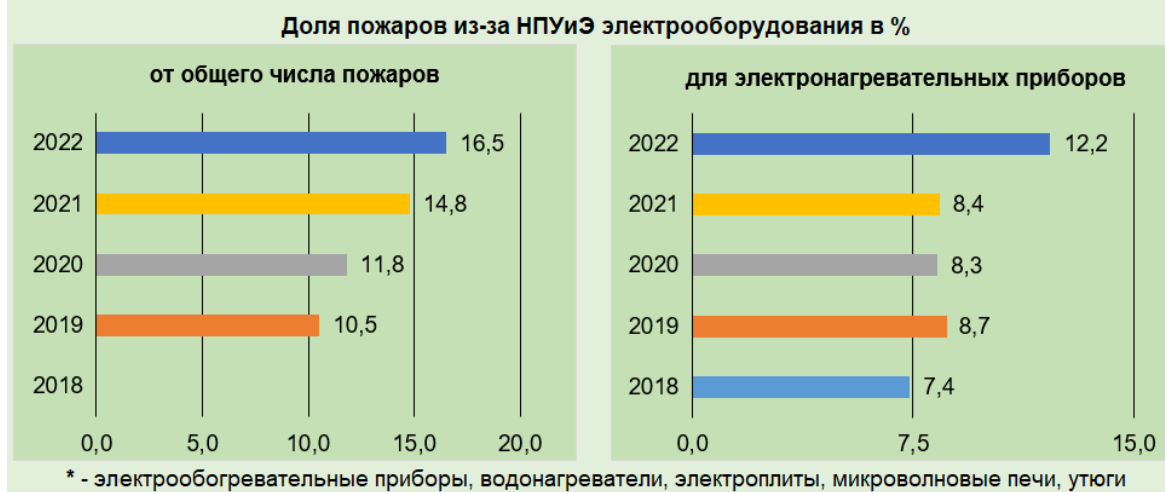
Существенным преимуществом универсальной защиты является и то, что её применение не требует изменения типовых проектов электроснабжения. Ради сравнения следует сказать, что для организации защиты от

дугового пробоя необходимо перерабатывать проектную документацию и переоборудовать электрощиты.

К сожалению, в отличие от широкопродвинутой американской технологии (защиты от дугового пробоя) российское решение (универсальная защита) не имеет столь серьёзной финансовой поддержки, и его внедрение ограничивается лишь частной инициативой. Такое пренебрежение собственными достижениями совершенно непонятно, тем более что применение универсальной защиты возможно практически для любых электроустановок, и целесообразность самого широкого охвата объектов непосредственно следует из анализа статистики пожаров (см. табл. 10).

Таблица 10

Количество пожаров в РФ			
Год	Всего по табл. 1 [3]	Из-за НПУиЭ электрооборудования по табл. 3 [3]	От электронагревательных приборов* по табл. 26 [3]
2022	352 602	58 278	7 092
2021	390 859	57 766	4 847
2020	439 394	51 930	4 323
2019	471 537	49 638	4 305
2018	-	41 763	3 085



Приведённые данные показывают, что при снижении общего количества пожаров, постоянно сохраняется негативная тенденция для пожаров, причиной которых стали нарушения правил устройства и эксплуатации электрооборудования. Особую группу тут составляют электронагревательные приборы. В сборнике [3] к ним ориентировочно отнесены несколько видов. Точный перечень от 14.03.2023 из более чем 60-ти наименований (от тёплого пола до кофеварок) приведён в приложении Технического регламента Таможенного Союза "О безопасности низковольтного оборудования" (ТР ТС 004/2011). Заметим, что количество электронагревательных приборов в быту и на производстве постоянно возрастает, а решения по обеспечению безопасности явно не успевают за происходящими

изменениями. В результате в 2022 году с ними уже случилось около 20 пожаров ежедневно (в табл. 10 в верхней строке – 7092 пожара за год).

По диаграммам под таблицами видно, что доля пожаров электрооборудования существенно растёт по сравнению с общим числом пожаров. Также увеличивается доля пожаров от электронагревательных приборов. Она рассчитана относительно числа пожаров электрооборудования, и рост означает опережение средних показателей, т.е. ухудшение ситуации год за годом.

Особенность электронагревательных приборов заключается в том, что из-за контакта (касания) с ними могут воспламеняться горючие материалы. В начале такого пожара электроустановка остаётся полностью исправной, электрические показатели не меняются, и никакие

устройства (автоматические выключатели, реле напряжения, устройства дифференциального тока и т.д., в том числе выключатели дуги) самостоятельно не могут идентифицировать опасную ситуацию. Поэтому, если от электроплиты загорается салфетка или масло, первоочередные действия своевременно способны инициировать только средства пожарной автоматики. Массовое применение технологии универсальной защиты для

электронагревательных приборов, таким образом, получается обоснованным, как по принципу действия, так и на основании статистики пожаров.

Дополнительно следует заметить, что полная оценка эффективности защиты возможна только с учётом сопутствующих проявлений опасных факторов пожара. Для пояснения этого положения в табл. 11 приведена выписка о количестве погибших по двум показателям.

Таблица 11

Количество погибших из-за сопутствующих проявлений опасных факторов пожара				
Причины	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
Поражение электрическим током, по табл. 10 [3]	6	10	4	4
Взрыв, по табл.11 [3]	57	60	58	61

Поражение электрическим током при пожарах возникает из-за выноса напряжения на токопроводящие части технологических установок, оборудования, агрегатов, изделий и иного имущества. Также вследствие потери ориентации, других ошибочных действий, например, при попытке отключения электропитания вручную. К сожалению, в числе погибших из-за этого оказываются спасатели и пожарные.

В помещениях, где используется природный газ, любой электроприбор является потенциальным источником зажигания. Взрыв при утечке чаще всего инициирует искрение в выключателе, реже нагретая поверхность.

Важно, что сопутствующие проявления возникают не только при пожаре от электрооборудования. Поэтому защита, контролирующая электрические показатели и в этом случае оказывается бесполезной. Если пожар произошёл от непотушенной сигареты, либо возникла утечка газа, ни обычные автоматические выключатели, ни выключатели дуги не сработают. Автоматическое отключение в таком случае обеспечивает только технология универсальной защиты.

Пожарные извещатели и газовые датчики контролируют неэлектрические показатели, поэтому по их сигналу возможно своевременное отключение штатных устройств дифференциального тока. Это защищает от взрыва и от поражения электрическим током, в том числе спасателей и пожарных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Всеобщая заинтересованность в пожарной безопасности электроустановок сомнений не вызывает. Тема находится в центре внимания разработчиков и пользователей электрооборудования. В том числе на протяжении многих лет не угасают дискуссии о выключателях дуги. И тут надо сказать о таком лоббировании, которого ещё не было в истории электротехники. Главное удивительно то, что для обоснования фактически не используются никакие экспериментальные данные, а доводы в пользу применения устройств защиты подкрепляются только комиксами и мультфильмами. В своё время известная «Война токов» тоже сопровождалась

ужасными картинками в газетах и журналах, но всё же были и реальные сведения о технологиях, их достоинствах и недостатках. Однако прогресс лоббирования в 21-м веке позволяет обойтись без науки. Поэтому производители выключателей дуги при небольшом сопротивлении населения сначала легко освоили рынок США, затем Европы. В настоящее время они пытаются покорить Россию, причём тут были выбраны не те объекты, которые нуждались в дополнительных мерах защиты, а те, где можно было получить финансирование из государственного бюджета. Подобный прагматизм вполне понятен, поскольку в наиболее уязвимом жилом секторе монетизировать идею за счёт собственников практически невозможно.

Поход к освоению рынка начинался с перевода на русский язык и принятия ГОСТ ИЕС 62606—2016. Данный нормативный документ отличается полным пренебрежением метрологическими нормами, например, при испытании устройств защиты предлагается использовать некалиброванную нагрузку (бытовые дрели, компрессоры, пылесос). Кроме того, для проверки работоспособности в качестве источника дуговой пробы выбраны разрядник с графитовым электродом и проводники с изоляцией, повреждённой предварительно при напряжении 7000 В, затем при напряжении 2000 В. Однако ни одним исследованием не доказано то, что данные источники адекватно моделируют дуговой пробой в реальных электроустановках, где нет никаких графитовых электродов и нет изоляции, пробитой при высоком напряжении. Вершина же неопределённости стандарта заключается в том, что полностью отсутствуют критерии для того, чтобы отличить пожароопасный дуговой пробой от безопасного, т.е. того, который мы ежедневно имеем во всех выключателях, контакторах, коллекторах двигателей, стартерах, программаторах, реле, также при соединении штырей вилок с гнездами розеток.

Второй ступенькой для признания выключателей дуги стали изменения свода правил «Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа» СП 256.1325800.2016. Он и первоначально не отличался корректностью, впрочем, был похож на

прочие с обычным количеством ошибок, но особо выделился после существенных дополнений. Так, в редакции с изменениями 1-5 упоминания о выключателях дуги (УЗДП, дуговом пробое, искрении) встречаются 172 раза. Т.е. нормативный документ буквально превращён в рекламный буклет выключателей дуги. Прочая защита там упоминается во много раз реже. Например, автоматические выключатели только 25 раз, а про реле напряжения вообще ничего не сказано, хотя люди их давно и охотно используют, как для защиты оборудования от повреждений, так и для защиты от пожаров.

Постановление Правительства РФ от 30.03.2023 № 510 таким образом стало третьим и решающим шагом. Им вопреки всем доказательствам и в ущерб продвижению собственных решений предоставлены монопольные преимущества и оказана поддержка провальной американской технологии. Реализация этого постановления будет осуществляться исключительно в интересах изготовителей и поставщиков выключателей дуги без какого-либо полезного эффекта у потребителей.

В целом рассмотренные нормативные документы и нормативный правовой акт нарушают принципы технического регулирования, установленные Федеральным законом от 27.12.2002 № 184-ФЗ (с изм. от 29.12.2022) «О техническом регулировании». В том числе они не соответствуют уровню научно-технического развития, не обеспечивают единство правил и методов испытаний при оценке соответствия и ограничивают конкуренцию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельников В.С. Пожарная безопасность электроустановок, универсальное решение и итоги применения защиты от дуги / Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – №4 (130). – DOI: 10.23670/IRJ.2023.130.45 – URL: <https://research-journal.org/media/articles/4848.pdf>

2. Харламенков А.С. Целесообразность применения устройств защиты от дугового пробоя / Пожаровзрывобезопасность. 2021, т. 30, №2, с. 117-122 – URL: <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/983/640>

3. Пожары и пожарная безопасность в 2022 году. Статистика пожаров и их последствий. Информационно-аналитический сборник. ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2023, 80 с (с изм. на

31.07.2023) – URL: <https://www.vniipo.ru/institut/informatsionnye-sistemy-reestry-bazy-i-banki-danny/federalnyy-bank-dannykh-pozhary/>

4. The population of the US. United States Census Bureau – URL: <https://www.census.gov/>

5. World Fire Statistics, CTIF 2023 N 28 – URL: https://www.ctif.org/sites/default/files/2023-06/CTIF_Report28-ESG.pdf

6. Численность населения России. Федеральная служба государственной статистики – URL: <https://rosstat.gov.ru/>

7. Residential Building Causes - ROUNDED National Fire Estimates by Cause (2003-2021). Data Sets / U.S. Fire Administration USFA.FEMA.gov, An official website of the Federal Emergency Management Agency, 12 s. – URL:

<https://www.usfa.fema.gov/downloads/xls/statistics/residential-nonresidential-fire-loss-estimates-2003-2021.xlsx>

8. Campbell R. Home Fires Caused by Electrical Distribution and Lighting Equipment / NFPA journal, winter 2022, p.81-82 – URL: https://www.nxtbook.com/nxtbooks/nfpa/journal_2022winter/index.php

9. Campbell R. Home Fires Caused by Electrical Distribution and Lighting Equipment: Supporting Tables / February 2022 National Fire Protection Association (NFPA) // NFPA Research, Quincy, MA – URL:

<https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Electrical/osElectricalDistLighting.pdf>

10. Campbell R. Home Fires Caused by Electrical Failure or Malfunction: Supporting Tables / November 2021 National Fire Protection Association (NFPA) // NFPA Research, Quincy, MA – URL:

<https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Electrical/osHomeFiresCausedbyElectricalFailureMalfunction.pdf>

11. Мельников В.С. Пожарная безопасность электроустановок, алгоритм зажигания / Международный научно-исследовательский журнал, 2023, №1 (127) – URL: <https://research-journal.org/media/articles/3550.pdf>

12. Мельников В.С. Пожарная автоматика защитного отключения электроустановок. М.: Мир науки, 2019. — 152 с. – URL: <http://izd-mn.com/PDF/08MNNPM19.pdf>

**РУЛЕВОЕ УПРАВЛЕНИЕ, РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КРУТЯЩЕГО
МОМЕНТА В ЭЛЕКТРОМОБИЛЕ 4X4 С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПРИВОДА
НА КАЖДОЕ КОЛЕСО.**

*Сафиулин И.А.**НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С.Сейфуллина»
г. Астана***STEERING CONTROL, CALCULATION OF TORQUE DISTRIBUTION IN A 4X4 ELECTRIC
VEHICLE WITH THE APPLICATION OF INDIVIDUAL DRIVE TO EACH WHEEL.***I. A. Safiulin**Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seyfullin
Astana*DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2023.1.112.1877**АННОТАЦИЯ**

Рассматривается математическая модель реализации рулевого управления и распределения крутящего момента в автомобиле с применением мотор колес. Его основная функция - предоставление водителю возможности изменять направление движения автомобиля, перенаправляя его колеса. В рамках проекта автомобиля, с использованием технологии "torque vectoring" и четырех мотор-колес, предлагают уникальный подход к рулевому управлению. Это связано с возможностью независимого контроля над мощностью и направлением вращения каждого колеса, что обеспечивает высочайший уровень маневренности и стабильности.

ABSTRACT

The study investigates a mathematical model for the implementation of steering control and torque distribution in a vehicle employing in-wheel motors. The primary function of this system is to provide the driver with the capability to alter the vehicle's direction of motion by adjusting the orientation of its wheels. Within the framework of the vehicle project, a unique approach to steering control is proposed, utilizing "torque vectoring" technology in conjunction with four in-wheel motors. This allows for independent control over the power and rotational direction of each wheel, thereby achieving unparalleled levels of maneuverability and stability.

Ключевые слова: рулевое управление, мотор колесо, электромобиль**Key words:** steering control, wheel motor, electric vehicle.**Введение**

Рулевое управление является одной из ключевых систем в любом автомобиле. Его основная функция - предоставление водителю возможности изменять направление движения автомобиля, перенаправляя его колеса.

Система рулевого управления включает в себя целый ряд элементов, начиная от рулевого колеса и заканчивая рулевыми наконечниками. Между этими конечными точками есть множество компонентов, включая рулевую колонку, рулевую рейку, рулевые тяги и многое другое. Эти компоненты работают вместе для передачи движения от рулевого колеса к колесам автомобиля.

Когда водитель поворачивает рулевое колесо, это движение передается через рулевую колонку, которая, в свою очередь, воздействует на рулевую рейку. Рулевая рейка связана с колесами автомобиля через рулевые тяги и наконечники. Когда рейка движется влево или вправо, она перемещает рулевые тяги, которые, в свою очередь, поворачивают колеса автомобиля.

Системы рулевого управления могут быть разделены на несколько типов в зависимости от их конструкции и принципа работы, однако в нашем случае рационально применение рулевой рейки с электрическим усилителем.

Цель исследования

В рамках проекта автомобиля, с использованием технологии "torque vectoring" и четырех мотор-колес, предлагают уникальный подход к рулевому управлению. Это связано с возможностью независимого контроля над мощностью и направлением вращения каждого колеса, что обеспечивает высочайший уровень маневренности и стабильности.

В этом виде системы используют электрический мотор для прямого воздействия на рулевую рейку или колеса. Они обеспечивают быстрый и точный отклик на действия водителя, а также повышают энергоэффективность.

Современные автомобили так же могут быть оснащены системами поддержки рулевого управления, дополнительно такими как система стабилизации курсовой устойчивости (ESP), адаптивная система рулевого управления и т.д. Они обеспечивают более комфортное управление автомобилем, улучшают безопасность и повышают эффективность управления.

Материал и методы исследования

Система рулевого управления в таких автомобилях включает в себя основные компоненты, такие как рулевое колесо, рулевую колонку, датчики и компьютерную систему управления. Однако, вместо традиционной механической или гидравлической связи между рулевым колесом и колесами автомобиля, вся

система рулевого управления работает на электронном уровне, и представляет собой электромеханическую систему.

Когда водитель поворачивает рулевое колесо, датчики регистрируют этот ввод и передают информацию в систему управления автомобилем. Затем система управления решает, сколько мощности нужно передать на каждое из четырех мотор-колес, а также в каком направлении должны вращаться колеса для выполнения желаемого маневра.

Технология "torque vectoring", или векторизация крутящего момента, играет ключевую роль в этом процессе. Она позволяет системе управления автоматически распределять мощность между колесами, чтобы улучшить управляемость и стабильность автомобиля.

Например, при прохождении поворота система может передать больше мощности на внешние колеса и меньше - на внутренние. Это ускоряет вращение внешних колес и замедляет вращение внутренних, что помогает автомобилю быстрее и более плавно выполнить поворот. Эта технология также может помочь при боковом скольжении, автоматически перераспределяя мощность между колесами, чтобы восстановить управление.

Система рулевого управления в спортивных автомобилях с технологией "torque vectoring" и четырьмя мотор-колесами предлагает великолепное сочетание управляемости, стабильности и производительности. Однако, она также требует сложной электронной системы управления и высокоточных датчиков для обеспечения своей работы.

Расчет рулевого управления может быть сложной задачей, требующей глубокого понимания теории и практики автомобильного дизайна. Однако, для представления общего понимания, мы можем разбить эту задачу на несколько ключевых этапов.

Определение требуемого усилия на рулевом колесе: это усилие зависит от различных факторов, включая вес автомобиля, скорость движения, размеры колес и т.д. Есть несколько стандартных формул для расчета этого усилия, например, с использованием коэффициента трения между шинами и дорогой, радиуса колеса, расстояния между колесами и т. д.

В рамках данного проекта обопремся на стандартные требования к рулевому колесу.

Приложенное усилие к рулевому колесу должно лежать в диапазоне от 40Н до 120Н.

Так как наша основная цель разработать систему управления тягой на колесах, то мы ограничимся расчётом передаточных чисел рулевой рейки.

Для легкового автомобиля приемлемым считается 3.5 оборотов рулевого колеса от одного крайнего положения колес в другое, или не более 1.8 оборота от нейтрального положения до

крайнего в любую сторону. Те колеса максимально повернуты.

Исходя из этого сначала необходимо рассчитать необходимое передаточное число рулевой рейки.

$$i_{SW} := \frac{\alpha_{SW_max}}{2} \cdot \frac{360^\circ}{\alpha_{max}}$$

Где:

α_{SW_max} – максимальное значение угла поворота рулевого колеса от нейтрального положения в крайнее;

α_{max} - угол поворота рулевого колеса; – максимальное значение среднего угла поворота передних колес от нейтрального положения в крайнее;

i_{sw} – передаточное число рулевой рейки.

Далее определим угол поворота передних колес: Этот угол, как правило, зависит от угла поворота рулевого колеса и передаточного числа рулевого механизма. Он также может зависеть от скорости движения автомобиля и типа системы рулевого управления.

далее определим значение среднего угла поворота передних управляемых колес

$$\alpha := \frac{\alpha_{SW}}{i_{SW}}$$

Где:

α - средний угол поворота передних колес;

α_{sw} - угол поворота рулевого колеса;

i_{sw} – передаточное число рулевой рейки.

Когда автомобиль проходит через поворот, каждое колесо следует по своей собственной дуге. Внешние колеса проходят по большему радиусу, чем внутренние. Если все колеса были установлены на одинаковый угол поворота, это привело бы к скольжению и потере сцепления. Чтобы избежать этого, углы поворота передних колес должны быть разными - внутреннее колесо поворачивается под большим углом, чем внешнее. Этот принцип и называется углами Аккермана. Однако в реальности все 4 колеса катятся по индивидуальному радиусу, с разной скоростью и с различным крутящим моментом

В механической трансмиссии это решается применением меж колесного и межосного дифференциалов. В случае электрической трансмиссии это невозможно, но тем не менее это очень важная группа факторов, в значительной степени влияющая на управляемость и эффективность трансмиссии и автомобиля в целом.

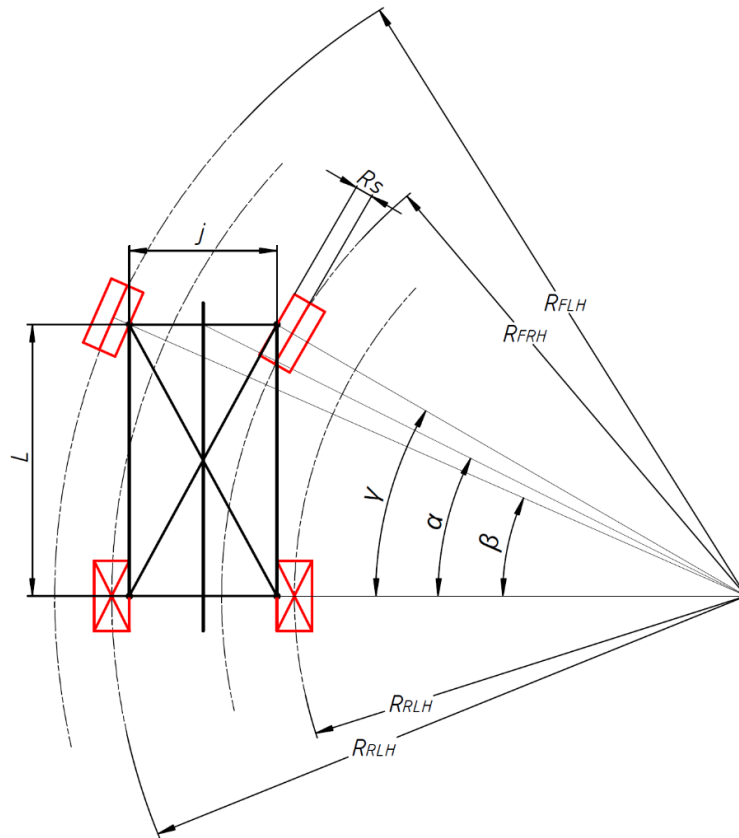


Рис 1. Схема графически отображает углы Аккермана и траектории колес при вхождении в поворот

Рассчитаем требуемые углы поворота внешнего и внутреннего колеса передней управляемой оси

$$\cot\beta := \frac{1}{\tan(\alpha)} + \frac{j}{2 \cdot L} \quad)$$

$$\cot\gamma := \cot\beta - \frac{j}{L} \quad \gamma := \operatorname{acot}(\cot\gamma)$$

Далее рассчитаем радиусы описываемых траекторий каждого колеса:

$$R_{MFA} := \left(\frac{L}{\sin(\alpha)} \right)$$

$$R_{FLH} := \left(\frac{L}{\sin(\beta)} + R_s \right)$$

$$R_{FRH} := \left(\frac{L}{\sin(\gamma)} - R_s \right)$$

$$R_{RLH} := \left(\frac{L}{\tan(\alpha)} + \frac{j}{2} + R_s \right)$$

$$R_{RRH} := \left(\frac{L}{\tan(\alpha)} - \frac{j}{2} - R_s \right)$$

После определения радиусов, введем в наши расчеты новую переменную.

Это среднее значение траектории передней управляющей оси, задающее вектор движения автомобиля:

$$S_{MFA} := 1$$

Относительно этого параметра рассчитаем коэффициенты пройденной траектории S для всех колес.

$$S_{FLH} := \frac{R_{FLH}}{R_{MFA}}$$

$$S_{FRH} := \frac{R_{FRH}}{R_{MFA}}$$

$$S_{RLH} := \frac{R_{RLH}}{R_{MFA}}$$

$$S_{RRH} := \frac{R_{RRH}}{R_{MFA}}$$

Аналогичным методом рассчитаем скорость вращения V и необходимый крутящий момент T для каждого колеса.

$$S_{MFA} := 1$$

$$S_{FLH} := \frac{R_{FLH}}{R_{MFA}}$$

$$S_{FRH} := \frac{R_{FRH}}{R_{MFA}}$$

$$S_{RLH} := \frac{R_{RLH}}{R_{MFA}}$$

$$S_{RRH} := \frac{R_{RRH}}{R_{MFA}}$$

$$V_{MFA} := 1$$

$$V_{FLH} := S_{FLH} \cdot V_{MFA}$$

$$V_{FRH} := S_{FRH} \cdot V_{MFA}$$

$$V_{RLH} := S_{RLH} \cdot V_{MFA}$$

$$V_{RRH} := S_{RRH} \cdot V_{MFA}$$

$$T_{MFA} := 1$$

$$T_{FLH} := S_{FLH} \cdot T_{MFA}$$

$$T_{FRH} := S_{FRH} \cdot T_{MFA}$$

$$T_{RLH} := S_{RLH} \cdot T_{MFA}$$

$$T_{RRH} := S_{RRH} \cdot T_{MFA}$$

Результаты исследования и их обсуждение

Как пример расчета рассмотрим легковой автомобиль

Со следующими параметрами, и при условии, что рулевое колесо установлено в крайнее

положение. Также для удобства и наглядность возьмем задающую базовую скорость 1000об/мин и крутящий момент 1000Н*м.

$$j := 1495 \text{ mm} \quad L := 2750 \text{ mm} \quad Rs := 177.5 \text{ mm}$$

$$\alpha_{SW} := 1.75 \cdot 360^\circ = 630.0000 \text{ deg} \quad i_{SW} := \frac{3.5}{2} \cdot \frac{360^\circ}{35^\circ} = 18.0000$$

$$\alpha := \frac{\alpha_{SW}}{i_{SW}} = 35.0000 \text{ deg}$$

$$\cot\beta := \frac{1}{\tan(\alpha)} + \frac{j}{2 \cdot L} = 1.7000 \quad \text{acot}(\cot\beta) = 0.5317 \quad \beta := \text{acot}(\cot\beta) = 30.4660 \text{ deg}$$

$$\cot\gamma := \cot\beta - \frac{j}{L} = 1.1563 \quad \text{acot}(\cot\gamma) = 0.7130 \quad \gamma := \text{acot}(\cot\gamma) = 40.8534 \text{ deg}$$

$$R_{MFA} := \left(\frac{L}{\sin(\alpha)} \right) = 4794.4787 \text{ mm}$$

$$R_{FLH} := \left(\frac{L}{\sin(\beta)} + Rs \right) = 5601.2677 \text{ mm} \quad R_{FRH} := \left(\frac{L}{\sin(\gamma)} - Rs \right) = 4026.5824 \text{ mm}$$

$$R_{RLH} := \left(\frac{L}{\tan(\alpha)} + \frac{j}{2} + Rs \right) = 4852.4070 \text{ mm} \quad R_{RRH} := \left(\frac{L}{\tan(\alpha)} - \frac{j}{2} - Rs \right) = 3002.4070 \text{ mm}$$

$$S_{MFA} := 1$$

$$S_{FLH} := \frac{R_{FLH}}{R_{MFA}} = 1.1683$$

$$S_{FRH} := \frac{R_{FRH}}{R_{MFA}} = 0.8398$$

$$S_{RLH} := \frac{R_{RLH}}{R_{MFA}} = 1.0121$$

$$S_{RRH} := \frac{R_{RRH}}{R_{MFA}} = 0.6262$$

$$V_{MFA} := 1000 \text{ rpm}$$

$$V_{FLH} := S_{FLH} \cdot V_{MFA} = 1168.2746 \text{ rpm}$$

$$V_{FRH} := S_{FRH} \cdot V_{MFA} = 839.8374 \text{ rpm}$$

$$V_{RLH} := S_{RLH} \cdot V_{MFA} = 1012.0823 \text{ rpm}$$

$$V_{RRH} := S_{RRH} \cdot V_{MFA} = 626.2218 \text{ rpm}$$

$$T_{MFA} := 1000 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_{FLH} := S_{FLH} \cdot T_{MFA} = 1168.2746 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_{FRH} := S_{FRH} \cdot T_{MFA} = 839.8374 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_{RLH} := S_{RLH} \cdot T_{MFA} = 1012.0823 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_{RRH} := S_{RRH} \cdot T_{MFA} = 626.2218 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Выводы

В данной статье были рассмотрены достаточно простой метод распределения крутящего момента в автомобилях с индивидуальным приводом на каждое колесо. Такая методика позволяет производить расчет и строить математические модели для различных многоколесных транспортных средств.

Список литературы

Шасси автомобиля: Рулевое управление. (Fahrwerktechnik: Lenkung) Производственное издание. Перевод с немецкого В.Н.Пальянова. Под редакцией А.А.Гальбрейха. М.: Машиностроение, 1987

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОЦЕСС ВИХРЕОБРАЗОВАНИЯ

Серикулы Жандос,

PhD, доцент

*кафедры «Технологические машины и оборудование»,
Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова
Казахстан, г. Шымкент*

Кумисбеков Серик Аргинбаевич,

к.т.н, профессор

*кафедры «Технологические машины и оборудование»
Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова
Казахстан, г. Шымкент*

Муталов Нуржигит,

докторант

*кафедры «Технологические машины и оборудование»
Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова
Казахстан, г. Шымкент*

Серииков Абылай Серикулы,

докторант

*кафедры «Технологические машины и оборудование»
Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова
Казахстан, г. Шымкент*

*Serikuly Zhandos, PhD, Associate Professor
Department of Technological Machines and Equipment
M. Auezov South Kazakhstan University
Kazakhstan, Shymkent*

*Kumisbekov Serik Arginbaevich, candidate of technical sciences, professor
Department of Technological Machines and Equipment,
M. Auezov South Kazakhstan University
Kazakhstan, Shymkent*

*Mutalov Nurzhigit, doctoral student
Department of Technological Machines and Equipment,
M. Auezov South Kazakhstan University
Kazakhstan, Shymkent*

*Serikov Abylay Serikuly, doctoral student
Department of Technological Machines and Equipment,
M. Auezov South Kazakhstan University
Kazakhstan, Shymkent*

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2023.1.112.1878

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается актуальность возобновляемых источников энергии. Предлагается новая установка с регулярной структурой преобразователей. Проведены исследования влияния конструктивных параметров на частоту вибраций и амплитуду колебания. Даны рекомендации расположения преобразователей в рабочей зоне. Определены оптимальные значения расположения преобразователей в радиальном и вертикальном направлениях.

SUMMARY

The article discusses the relevance of renewable energy sources. A new installation with a regular structure of converters is proposed. Research has been carried out on the influence of design parameters on vibration frequency and vibration amplitude. Recommendations are given for the location of converters in the working area. The optimal values for the location of the transducers in the radial and vertical directions are determined.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, ветроэнергетика, преобразователи, частота вибраций, амплитуда колебания.

Keywords: renewable energy sources, wind power, converters, vibration frequency, vibration amplitude.

Современное состояние энергетической политики требует быстрого реагирования. Развитые страны поэтапно переходят на возобновляемые источники энергии (ВИЭ). В соответствии с резолюцией № 33/148 Генеральной Ассамблеи ООН к нетрадиционным и возобновляемым источникам энергии относятся: торф; энергия биомассы; энергия ветра; энергия солнца; энергия водных потоков на суше; средне и высокопотенциальная геотермальная энергия; энергия морей и океанов; низкопотенциальная тепловая энергия.

Учитывая вредные выбросы в атмосферу при сжигании ископаемого сырья электростанции, с каждым годом приводит к изменению климата. Более двухсот стран ратифицировали Парижское соглашение об изменении климата.

Ряд стран изменили энергетическую политику с экономическим стимулированием ВИЭ. На протяжении нескольких десятилетий проводятся исследования получения качественного источника энергии разных ВИЭ. На сегодня результаты этих работ демонстрируют конкурентоспособность ВИЭ.

По сравнению традиционными энергоносителями прошлого века темпы роста и ввода в эксплуатацию мощностей ВИЭ с начала столетия до 2018 года солнечной фотоэлектрической генерации во всем мире в

совокупности достигла 505 ГВт и ветряных турбин 591 ГВт [1].

На протяжении нескольких тысячелетий человечество использует энергию ветра. Кинетическая энергия ветра всегда была и остается доступной практически во всех уголках Земли. Энергия ветра привлекательна и с точки зрения экологии: при ее использовании нет выбросов в атмосферу, нет опасных радиоактивных отходов. [2].

Применение любой возобновляемой энергии требует анализа устойчивости, который зависит от трех основных компоненты: воздействие на окружающую среду, внешние издержки, а также экономика и финансирование. Каждая из этих переменных имеет большое влияние на применение возобновляемых источников энергии; По этой причине имеются многочисленные работы исследователей влияния, целесообразности и экономической эффективности и применимости для каждого региона в работах по странам: Европейский союз [3-12], США [13-15], Китай [16], Россия [17-19], Индия [20-21], Австралии [22], Южная-Корея [23], Казахстан [1]

Согласно статистическим предварительным данным, опубликованным WWEA [24], общая мощность всех ветряных турбин, установленных в мире к концу 2019 года, достигла 655,5 ГВт. За 2019 год наблюдается рост мощности по всему миру на 56,4 ГВт. Все ветряные турбины, установленные к

к концу 2018 года, могут покрыть около 6% глобальный спрос на электроэнергию.

Преимущества ветровой энергетики: низкая себестоимость; нулевая стоимость топливной составляющей, неисчерпаемый источник энергии; экологически приемлемая энергетика; надежность поставок; модульный дизайн, быстрый монтаж; ветроэнергетика не мешает ведению сельского хозяйства и промышленной деятельности вблизи ветростанций.

Ветроэнергетика является одним из наиболее перспективных источников энергии для Казахстана, с исключительно богатой ветровыми ресурсами территорией потенциал энергии ветра в стране составляет около 3 млрд. кВт в год. В РК 10 районов с большим ветропотенциалом со средней скоростью 8-10 м/с, Особое значение имеют проблемы создания малоэнергоемких и высокоинтенсивных технологий ВЭУ. В современных условиях основным требованием к созданию любой техники является достижение низких энергозатрат на единицу выпускаемой продукции или для достижения необходимой эффективности. Таким образом, этот параметр является основной характеристикой конструктивного совершенства.

В электрогенерирующей установке с регулярной структурой заложен принцип создания синфазного режима. Это достигается рациональным размещением контактных элементов вдоль и поперек движения воздушного потока. Такое конструктивно-режимное решение приводит к существенной интенсификации проводимых процессов.

Описание установки. Для проведения экспериментальных работ сконструирована установка размером: первая 600x600x1000 мм применялась в лаборатории имени академика О.Балабекова ЮКУ им.М.Ауэзова. Установка состоит из металлического каркаса закрытое по сторонам органическим стеклом для визуализации процесса, протекающего в установке. Внутри установки установлены в высоту металлические трубы диаметром 10 мм закрепленные сверху и снизу установки. Трубы использовались для практичности для дальнейшего использования в них электрических проводов при генерации энергии. На трубах и прутьях с определенным шагом в вертикальном направлении t_v установлены преобразователи размером 70x50 мм.

Принцип работы установки заключается в следующем. Воздушный поток, подаваемый с низу установки проходя преобразователи, образует вихри и при правильном расположении преобразователей можно достичь объединения вихрей.

Преобразователи под воздействием воздушного потока изгибаются. Генерация электроэнергии достигается за счет деформации и вибрации пьезоэлементов, установленных сверху каждого преобразователя. Первый этап работы, исследование размещение контактных элементов вдоль и поперек движения воздушного потока

определить режим одновременного вихреобразования.

Исследование качественных и количественных параметров движения исследуемых преобразователей определялись при помощи стробоскопического тахометра Testo 477. Скорость ветра замерялась анемометром «mini air I». Изменение скорости воздушного потока осуществлялась от 1 до 5 м/с, Использование интервала от 1 м/с до 5 м/с обусловлено тем что по шкале Бафорта равен 2 (1,6-3,3 м/с) и 3 (3,4-5,4 м/с) баллам и легко досегаем даже в городской среде.

Исследуемыми параметрами движения преобразователей явились частота вибраций ω и амплитуда колебания A . Диапазон изменения: режимных параметров: скорость воздушного потока W_g 1÷5 м/с; конструктивных параметров: шаг между преобразователями по вертикали t_v/b 1÷5; шаг между преобразователями по горизонтали t_p/b 1,5÷4; размер преобразователей 50x70 мм.

Проведенные исследования параметров движения преобразователей в зависимости от скорости воздушного потока показывают, что с увеличением W_g наблюдается рост частоты вибраций ω , и амплитуды колебаний A свободных концов преобразователей. Рост вышеперечисленных параметров движения обусловлен увеличением динамического напора воздушного потока, эффективно воздействующего на площадь свободных концов преобразователей.

Так как для эффективной работы в аппарате необходимы высокие значения частоты при умеренных величинах амплитуды, что также увеличивает срок службы преобразователей.

Помимо режимных параметров, исследовано влияние конструктивных параметров преобразователей, т.е. размещение преобразователей в вертикальном и радиальном направлениях в объеме рабочей зоны на параметры движения частоты вибраций и амплитуды колебания.

Известно, что при обтекании призматических тел, вихри образуются. Срыв вихрей также происходит попеременно и вихревой след, помимо периода движения, имеет еще полупериод. Поэтому для преобразователей можно дважды достичь режима одновременного вихреобразования.

При нарушении синфазного режима в эффективность установки снижается за счет уменьшения числа вихрей, образованных в объеме рабочей зоны. Это происходит в результате вынужденного срыва вихрей, не завершивших цикл формирования за телами, расположенными выше по потоку, вихрями, оторвавшимися с нижерасположенных по потоку тел.

Изучение характера движения свободных концов преобразователей в аппарате показали, что ввиду несимметричности вихреобразования за насадочными элементами, влияние сил, возникающих при срыве вихрей и воздействующих на параметры движения ω_{φ} и A существенно. Так, на кривых $\omega_v = f(t_v/b)$ и $A = f(t_v/b)$ (рисунок 2.5, 2.6), в

режимах одновременного вихреобразования, при $t/b = 2b$ и $4b$ суммарная мощность вихрей такова, что она способна гасить вибрации свободных концов преобразователей.

Однако, при этом амплитуда вибраций несколько увеличивается, так как составляющая силы вихря воздействует в исправлении движения свободных концов преобразователей. Нарушение режимов одновременного вихреобразования приводит к тому, что мощность вихрей не суммируется, и более того происходит срыв несформировавшихся вихрей при последовательном обтекании элементов насадки в направлении движения воздушного потока. В этом случае частота вибраций возрастает, а амплитуда снижается.

При изменении расстояния между гирляндами с преобразователями в радиальном направлении t/b режиме одновременного вихреобразования, происходит плавное снижение ω_v и некоторое увеличение величины A .

Повидимому, это связано с механизмом образования вихрей, частота которых при значениях $t/b < 2b$ определяется величиной зазора между соседними элементами, а при $t/b \geq 2b$ шириной обтекаемых элементов насадки. Перестройка механизма образования вихрей при $t/b > 2b$ приводит к незначительному влиянию их на параметры ω_v, A .

Выводы

В работе представлена новая установка для преобразования кинетической энергии воздушного потока преобразования в электрическую энергию. Спроектирована экспериментальная установка и проводились экспериментальные работы. Определены оптимальные значения расстояний преобразователей между собой в вертикальном и радиальном направлении. Исследованы механизмы взаимодействия вихревых потоков в зависимости от конструктивных параметров. В результате режима одновременного вихреобразования увеличивается КПД установки, в результате чего увеличивается вырабатываемая энергия.

Данная конструкция применима практически во всех отраслях промышленности. Конечно, на данный момент выработка электроэнергии с помощью пьезоэлементов невелика, но установка отличается простотой конструкции и низкой себестоимостью. Возможно применение в качестве вспомогательного источника энергии для получения недорогой энергии.

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP14972723)»

Список использованной литературы

1. Национальный энергетический доклад 2019. – Астана: АО «Ассоциация KAZENERDGY» <http://www.kazenergy.com/ru/analyst/190/>
2. Безруких П.П., Безруких П.П., Грибков С.В. Ветроэнергетика: Справочно методическое

издание / Под общей редакцией П.П. Безруких. — М.: «Интехэнерго-Издат», «Теплоэнергетик», 2014. — 304 с.

3. Hewitt R.J., Bradley N., Compagnucci A.B., Barlagne C., Ceglaz A., Cremades R., McKeen M., Otto I.M., Slee B. Social Innovation in Community Energy in Europe: A Review of the Evidence // *Frontiers in Energy Research*. -2019, -Vol 7(Art.31) - P.1-27

4. Möllerström E. Wind Turbines from the Swedish Wind Energy Program and the Subsequent Commercialization Attempts—A Historical Review // *Energies*. – 2019, - Vol. 12, N690 - P.1-12

5. Kaushal A., Hertem D.V. An Overview of Ancillary Services and HVDC Systems in European Context // *Energies*. – 2019, - Vol.12, N3481 - P.1-20

6. Hu J., Harmsen R., Crijns-Graus W., Worrell E., Broek M.v.d. Identifying barriers to large-scale integration of variable renewable electricity into the electricity market: A literature review of market design // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018, - Vol.81 - P.2181–2195

7. Joosa M., Staffell I. Short-term integration costs of variable renewable energy: Wind curtailment and balancing in Britain and Germany // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018, - Vol.86 - P.45–65

8. Benedeka J., Sebestyén T.-T., Bartóka B. Evaluation of renewable energy sources in peripheral areas and renewable energy-based rural development // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018 - Vol.90 - P.516–535

9. Corsatean T.D., Giaccaria S., Covrig C-F., Zaccarelli N., Ardelean M. RES diffusion and R&D investments in the flexibilisation of the European electricity networks // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016 - Vol.55 - P.1069–1082

10. Lehmann P., Creutzig F., Ehlers M.-H., Friedrichsen N., Heuson C., Hirth L., Pietzcker R. Carbon Lock-Out: Advancing Renewable Energy Policy in Europe // *Energies*. - 2012, Vol.5 - P.323-354;

11. Viebahn P., Soukup O., Samadi S., Teubler J., Wiesen K., Ritthoff M. Assessing the need for critical minerals to shift the German energy system towards a high proportion of renewables // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015, Vol.49 - P.655–671

12. Verzijlbergha R.A., De Vries L.J., Dijkemab G.P.J., Herder P.M. Institutional challenges caused by the integration of renewable energy sources in the European electricity sector // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017 – Vol.75 - P.660–667

13. Mann M., National Renewable Energy Laboratory 2011. - US Department of Energy http://www.nrel.gov/analysis/sustainability_analysis.html,

14. Mohtasham J. Review Article-Renewable Energies International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES15 // *Energy Procedia*. – 2015, Vol.74 – P.1289 – 1297

15. Peter D., Saundry Review of the United States energy system in transition // Energy, Sustainability and Society. – 2019, Vol.9:4 - P.1-32
16. Zhang Y., Tang N., Niu Y., Du X. Wind energy rejection in China: Current status, reasons and perspectives // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016, - Vol.66 - P.322–344
17. Мингалеева Р.Д., Зайцев В.С., Бессель В.В., Оценка технического потенциала ветровой и солнечной энергетики России // ТЕРРИТОРИЯ НЕФТЕГАЗ. – 2014, - № 3 - С.82-90
18. Винников А.В., Денисенко Е.А., Хицкова А.О. К расчёту экономического потенциала ветровой энергетики и установок // Научный журнал КубГАУ. – 2016, - №115(01) - С.1-13
19. Рашитов А.Р., Андрианова Л.П., Перспективные технологии ветровой и солнечной энергетики // Международный научный журнал «Инновационная наука». – 2016, - №11-2 - С.51-53
20. Kumar. J., Majid M.A. Renewable energy for sustainable development in India: current status, future prospects, challenges, employment, and investment opportunities // Energy, Sustainability and Society. – 2020, - Vol.10:2 - P.1-36
21. Dawn S., Tiwari P.K., Goswami A.K., Singh A.K., Rajesh Panda Wind power: Existing status, achievements and government's initiative towards renewable power dominating India // Energy Strategy Reviews. – 2019, - Vol.23 - P.178–199
22. Li H.X., Edwards D.J., Hosseini M.R., Costin G.P., A review on renewable energy transition in Australia: An updated depiction // Journal of Cleaner Production. – 2020, - Vol.242 - P.1-17
23. Mohammed H. Alsharif I.D., Kim J., Kim J.H. Opportunities and Challenges of Solar and Wind Energy in South Korea // A Review Sustainability. – 2018, - Vol.10,1822 - P1-23
24. Global Wind Power Statistic 2020. – Bonn Germany: World Wind Energy Association <https://library.windea.org/global-statistics/>

ОСОБЕННОСТИ ДЕФЕКТОВ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ СВЧ СЕНСОРОМ НА ЭФФЕКТЕ ГОРБУНОВА.

Малютин Н.Д.

д.т.н., профессор ТУСУР, г. Томск

Суторихин В.А.

м.н.с., ТУСУР, г. Томск.

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2023.1.112.1879

АННОТАЦИЯ

Современные работы, посвященные дефектоскопии металлов с применением эффекта Горбунова [1-4], до сих пор рассматривались как варианты использования нового прибора. Причина в том, что практические испытания различных металлов, их скрытых дефектов, не окончены до сих пор. Обнаруживаются новые, неизвестные ранее свойства как самих дефектов, так и возможностей их диагностики. Общим для них является только способ обнаружения.

Основное достоинство нового дефектоскопа – надежность индицирования скрытых дефектов металла без сканирования и приложения дополнительной механической нагрузки. Время индицирования составляет 1-2 секунды, глубина залегания дефектов от долей миллиметра до нескольких метров[5].

Ключевые слова: Эффект Горбунова, сенсор СВЧ, динамические дефекты

Введение

Первоначально полагалось, что дефекты металла, индицируемые новым прибором, будут аналогичны дефектам, определяемым методом акустической эмиссии. Могут быть обнаружены только в момент существования этой эмиссии [6]. Основными достоинствам нового метода должны были быть:

- рабочее расстояние (100-180 мм),
- высокая температура исследуемой поверхности (300-500 градусов Цельсия, предельная для распространения упругих ультразвуковых волн),
- возможность снятия показаний во время движения объекта (вращение валов турбин, насосов, генераторов).
- возможность увеличения чувствительности за счет применения для анализа спектральных методов, работающих в узком частотном диапазоне, позволяющем снизить шумовой фон, повысить отношение сигнал/шум [7].

В процессе испытаний на разрыв, изгиб было установлено, что ожидаемые результаты по рабочему расстоянию, чувствительности полностью подтвердились. Чувствительность на уровне тепловых шумов при нормальной температуре не хуже сенсоров контактного типа

Кроме того, выяснились новые обстоятельства. Оказалось, что время обнаружения дефектов, преобразующих ультразвук в электромагнитное поле на поверхности, не зависит от наличия предварительной (дополнительной) механической нагрузки[. Нет необходимости использования разрывных и изгибных машин. Дефекты, возникшие когда либо под действием механических нагрузок остаются «активными» при полном сбросе нагрузок. Термин «активные» следует понимать как – определяемые ранее в виде имеющих линейную зависимость скорости счета от приложенной нагрузки (из метода акустической эмиссии). Для нового метода такие дефекты следует называть теперь динамическими, возникающими при аномальном взаимодействии

ультразвука с электронным газом, явление названо эффектом Горбунова.

Скоро выяснилось, что амплитуда сигнала «активности» дефекта является функцией времени. Она (амплитуда) меняется от максимума 10-20 дБ отношения сигнал/шум до минимума 2-3 дБ за время от десятка секунд до нескольких сот часов [8,9].

Кроме того, было установлено, что использование термоудара (по методу Бричкова) позволяет восстанавливать «активность» (свойство динамичности) до прежнего уровня. Сам принцип появления полезных сигналов на выходе СВЧ дефектоскопа (фазового детектора) позволяет надежно индцировать динамические дефекты. Как было указано выше, индцируемые дефекты могут терять свое полезное свойство. При первом измерении из за несовершенства прибора, работающего на уровне тепловых шумов, могут показаться слабыми (2-3 дБ отношения сигнал/шум), не относящимися к динамическим. Если после термоудара амплитуда такого полезного сигнала увеличивается на 3-10 дБ, это значит индцируемый дефект относится к динамическим.

Во время испытаний были получены результаты, не известные ранее, такие, которые невозможно предсказать исходя из известной теории металлов:

1. Эффект «мерцания» амплитуды полезного сигнала. Пропадание и самовосстановление полезного сигнала при непрерывном воздействии ультразвука.

2. Длительное время обнаружения для циркониевых трубках, имеющих дефекты на поверхности внутри трубок и в теле стенок. Это время превышает сотни часов.

3. Кроме эффектов «мерцания», длительного времени сохранения динамичности дефектов для циркония, которые невозможно предвидеть, пользуясь известной теорией [3], был зафиксирован эффект нелинейного преобразования переменной поверхностной проводимостью – а именно генерация квадратичных составляющих бокового спектра СВЧ сигнала при воздействии бигармоническим ультразвуком.

Эффект нелинейного взаимодействия пары ультразвуковых сигналов (f_1, f_2) на дефекте наблюдается как появление дополнительных сигналов частоты (f_1+f_2), (f_1-f_2), амплитудой сравнимой с амплитудами первоначальных сигналов.

Этот эффект известен из теории расчета спектрального состава бигармонического сигнала фазовой модуляции с помощью уравнений вытекающих из цилиндрических функций Бесселя [4].

Но наличие такого эффекта при взаимодействии бигармонического ультразвука со скрытыми дефектами металла небыл известен.

По мнению авторов может называться эффектом **Малютина- Суторихина**.

В свою очередь, определение причин его появления следует рассматривать как функцию «модулирования» поверхностной плотности проводимости сигналами ультразвука, такой подход, по нашему мнению, позволит в дальнейшем выяснить природу самого взаимодействия.

Уже сейчас известно, что воздействие пары сравнимых по амплитуде сигналов двух разных частот ($\text{COS}(\Omega_1 t) + \text{COS}(\Omega_2 t)$), практически **суммы сигналов**, приводит к выполнению операции **произведения пары этих сигналов**. Результирующая плотность проводимости поверхности содержит гармонические составляющие $\text{COS}(\Omega_1 + \Omega_2)t$,

$\text{COS}(\Omega_1 - \Omega_2)t$. Кроме того, остаются в спектре и прежние две составляющие $\text{COS}(\Omega_1 t) + \text{COS}(\Omega_2 t)$. Измеренная величина амплитуд всех полученных сигналов сравнима друг с другом, что не позволяет предполагать операцию возведения с степень 2, при которой амплитуды первоначальных сигналов должны были бы увеличиться в квадрате.

Продолжая исследования следует выявить влияние температуры объекта на свойство преобразования ультразвука в электрическую проводимость поверхности. Возможно снижение температуры до близкой к температуре жидкого гелия ($2-5 \text{ K}^0$) приведет к изменению функции преобразования (модулирования).

Свойство влияния статических магнитных полей на свойство преобразования ультразвука в электрическую проводимость поверхности тоже должно быть исследовано.

Заключение

Результатом проведенных экспериментов стало не только подтверждение положительных качеств СВЧ дефектоскопа на эффекте Горбунова, но и получение неизвестных ранее эффектов, практически не связанных с известной теорией металлов [10], взаимодействием упругих колебаний с особыми зонами металла, оказывающихся практически дефектами, индцируемыми ранее методом акустической эмиссии.

Внедрение лазерных источников упругих колебаний металлической поверхности позволит выполнить практически полностью дистанционный индикатор динамических дефектов. Использование методики триангуляционного расчета местоположения дефекта опираясь на измерения фазовой задержки между упругими колебаниями металла и колебаниями поверхностной проводимости позволит, в конечном счете, разрабатывать вместо индикаторов, измерители динамических дефектов.

С научной точки зрения, выполненные исследования показали, что практически возможна генерация дополнительных электрических зарядов внутри металла без использования жесткого рентгеновского излучения. Достаточно использование слабого ультразвука и особых зон металла, связанных с образованием известных дефектов (микротрещины, расслоения, сдвиг слоев

кристаллической решетки, непровары и другие дефекты сварных швов, дефекты вызванные наводораживанием поверхности перегретым паром, усталостные трещины). Указанная генерация, время регистрации дефектов после снятия нагрузки, эффекты мерцания полезного сигнала при непрерывном действии ультразвука не могут быть объяснены в рамках представленной краткой теории эффекта Горбунова. Требуется существенная доработка теории металлов (теории конденсированных сред) в части появления электрических зарядов в металлах под действием слабого ультразвука. Траекторий движения свободных зарядов внутри металла и на его поверхности.

Используемая литература:

2. Gorbunov V, Sutorikhin V. Possible control of elastic deformation limits by the microwave (MW) method. Defectoscopy. 1999;7:75-80.
2. Sutorikhin V. Sophisticated Microwave Nondestructive Testing Method for Metals. Applied Physics Research. 2012;4(4-10):8-10.
3. Kim Y, Jofre L, DFF, FMQ. "Microwave sub-surface imaging technology for damage detection of concrete structures," Journal of Engineering Mechanics, SCE 130; 2004.
4. Gorbunov VI, Sutorihin VA. Possibility defectoscope of the metal details of the microwave oven afield. Electronic magazine "Technical acoustics". 2010;60-66.
5. Vasilyev YD, Lyuboshitz VL. The virial Theorem and some properties of the electron gas in metals (Session RAS 23.02.1994 g.). The Successes of the Physical Sciences. 1994;4(164):367-374.
6. Gorbunov V.I., Sutorikhin V.A. Industrial Laboratory. 1999. T. 65. № 10. . С. 654-656
7. THE POSSIBILITIES OF MONITORING THE LIMIT OF ELASTIC DEFORMATIONS BY A MICROWAVE METHOD
Gorbunov V.I., Sutorikhin V.A. Russian Journal of Nondestructive Testing. 1999. T. 35. № 7. . С. 552-556
8. V.I.Gorbunov, V.A.Sutorihin. Possibility defectoscope of the metal details of the microwave oven a field. Electronic magazine "Technical acoustics", <http://ejta.org>, 2010
9. Sutorikhin.V. Sophisticated Microwave Nondestructive Testing Method for Metals. Applied Physics Research. Vol. 4, No 4, 2012, pp.8-17
10. Kostoglotov A.M., Prist A.V., Acoustics-emission method of modeling of the processes of the destruction material. Defektoskopiya, 2002, p 36

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 517.51

ПРИБЛИЖЕНИЯ МНОГОКРАТНО ДИФФЕРЕНЦИРУЕМЫХ ФУНКЦИЙ ДВОЙНЫМИ СИНГУЛЯРНЫМИ ИНТЕГРАЛАМИ МЕЛЛИНА*Мусаев Али Мехти**к.ф.м.н., доц. Азербайджанский Государственный Нефтяной и Промышленный Университет, г. Баку.*

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2023.1.112.1880

АННОТАЦИЯ

Результаты об аппроксимации функций сингулярными интегралами играют важную роль и имеют многочисленные применения в различных областях математики. Многие вопросы о порядке приближения и их порядок сходимости различного класса функций линейными операторами, в частности сингулярными интегралами, исследованы П.П.Коровкиным, В.В.Жуком, И.П.Натансоном, С.М.Лозинским, Б.И.Голубов, Б.И.А.Лебегом, П.Л.Бутцером[10], Р.Несселем[11], Р.Мамедовым[4] и другими.

В работе рассмотрены асимптотического значения приближения многократно дифференцируемых функций двух переменных двойными

сингулярными интегралами Меллина. Получено асимптотическое значение приближения многократно дифференцируемых функций посредством двойных сингулярных интегралов Меллина. Доказанные теоремы применяются к конкретным сингулярным интегралам.

Ключевые слова: Пространства, асимптотика, сингулярный интеграл, приближения, измеримая, параметр.

Пусть $f(r_1, r_2)$ действительная функция, определенная и измеримая на

$$R_2^+ = \left(\begin{array}{c} 0, +\infty \\ 0, +\infty \end{array} \right).$$

Обозначим через $L_p(R_2^+)$ пространство функций $f(r_1, r_2)$ для которых норма

$$\|f\|_{L_p(R_2^+)} = \begin{cases} \iint |f(r_1, r_2)| \frac{dr_1}{r_1} \frac{dr_2}{r_2} & \text{при } p = 1, \\ \sup_{(r_1, r_2) \in R_2^+} |f(r_1, r_2)| & \text{при } p = \infty \end{cases}$$

конечна.

$$\text{Обозначим } \Delta_m^k f(r_1, r_2) = \begin{cases} f(r_1, r_2) & \text{при } k = 0, \\ \sup_{(r_1, r_2) \in R_2^+} |f(r_1, r_2)| & \text{при } k \geq 1. \end{cases}$$

и

$$E_{r_1, r_2}^{k_1+k_2} f(r_1, r_2) = \begin{cases} f(r_1, r_2) & \text{при } k_1 + k_2 = 0, \\ E_{r_2}^{(k_2)} f(r_1, r_2) & \text{при } k_1 = 0, \\ E_{r_1}^{(k_1)} f(r_1, r_2) & \text{при } k_2 = 0, \\ E_{r_2}^{(1)} E_{r_1, r_2}^{(k_1+k_2-1)} f(r_1, r_2) & \text{при } k_1 + k_2 \geq 1. \end{cases}$$

Рассмотрим двойной сингулярный интеграл Меллина. Пусть $K_{\lambda_1, \lambda_2}(\rho_1, \rho_2)$ функция, заданная на R^+ зависящая от вещественных параметров λ_1, λ_2 и удовлетворяющая условию

$$\iint_{R_2^+} K_{\lambda_1, \lambda_2}(\rho_1, \rho_2) \frac{d\rho_1}{\rho_1} \frac{d\rho_2}{\rho_2} = 1.$$

Выражение

$$A_{\lambda_1, \lambda_2}(f; \rho_1, \rho_2) = \iint_{R_2^+} f\left(\frac{r_1}{\rho_1}, \frac{r_2}{\rho_2}\right) K_{\lambda_1, \lambda_2}(\rho_1, \rho_2) \frac{d\rho_1}{\rho_1} \frac{d\rho_2}{\rho_2}. \quad (1)$$

будем называть двойным сингулярным интегралом Меллина.

Теорема. Пусть функция $f(r_1, r_2) \in L(R^+)$ в окрестности точки r_1, r_2 имеет непрерывные до n -го порядка (n – четное число) и неотрицательная функция $K_{\lambda_1, \lambda_2}(\rho_1, \rho_2)$ удовлетворяет условиям :

$$K_{\lambda_1, \lambda_2}(\rho_1, \rho_2) = K_{\lambda_1, \lambda_2}(\rho_1^{-1}, \rho_2) = K_{\lambda_1, \lambda_2}(\rho_1, \rho_2^{-1}) = K_{\lambda_1, \lambda_2}(\rho_1^{-1}, \rho_2^{-1})$$

$$v_{\lambda_1, \lambda_2}^{[2(k-s), 2s]} = \iint_{R_2^+} \ln^{2(k-s)} \rho_1 \cdot \ln^{2s} \rho_2 K_{\lambda_1, \lambda_2}(\rho_1, \rho_2) \frac{d\rho_1}{\rho_1} \frac{d\rho_2}{\rho_2} < +\infty$$

при $s \leq k, k = 1, 2, \dots, n/2$, где $R_2^+ = \left(\frac{1}{1}, +\infty\right)$.

Если выполняется условия

$$\lim_{\lambda_i \rightarrow \lambda_i^0} \frac{v_{\lambda_1, \lambda_2}^{(n+j)}}{v_{\lambda_1, \lambda_2}^{(n)}} = 0 \quad (2)$$

по крайней мере при одном значении j ($j = 1, 2, \dots$), то имеет место следующее асимптотическое равенство

$$A_{\lambda_1, \lambda_2}(f; r_1, r_2) - f(r_1, r_2) + 4 \sum_{k=0}^{[n/2]} \frac{1}{(2k)!} \sum_{s=0}^k C_{2k}^{2s} v_{\lambda_1, \lambda_2}^{[2(k-s), 2s]} \cdot E_{r_1^{2(k-s)}, r_2^{2s}}^{(2k)} f(r_1, r_2) + 0 \left[v_{\lambda_1, \lambda_2}^{(n)} \right] \quad (3)$$

при $\lambda_i \rightarrow \lambda_i^0$ ($i = 1, 2$), где

$$v_{\lambda_1, \lambda_2}^{(n)} = \iint_{R_2^+} \sqrt{(\ln^2 \rho_1 + \ln^2 \rho_2)^n} K_{\lambda_1, \lambda_2}(\rho_1, \rho_2) \frac{d\rho_1}{\rho_1} \frac{d\rho_2}{\rho_2}$$

Доказательство. Так как

$$A_{\lambda_1, \lambda_2}(f; \rho_1, \rho_2) - f(r_1, r_2) = \iint_{R_2^+} \left[f\left(\frac{r_1}{\rho_1}, \frac{r_2}{\rho_2}\right) + f\left(r_1 \rho_1, \frac{r_2}{\rho_2}\right) + f\left(\frac{r_1}{\rho_1}, r_2 \rho_2\right) + f(r_1 \rho_1, r_2 \rho_2) - 4 f(r_1, r_2) \right] K_{\lambda_1, \lambda_2}(\rho_1, \rho_2) \frac{d\rho_1}{\rho_1} \frac{d\rho_2}{\rho_2},$$

то для любого $\rho > 0$ имеем

$$\begin{aligned} & A_{\lambda_1, \lambda_2}(f; r_1, r_2) - f(r_1, r_2) - 4 \sum_{k=1}^{[n/2]} \frac{1}{(2k)!} \sum_{s=0}^k C_{2k}^{2s} v_{\lambda_1, \lambda_2}^{[2(k-s), 2s]} \cdot E_{r_1^{2(k-s)}, r_2^{2s}}^{(2k)} f(r_1, r_2) \\ &= \left\{ \int_1^{1+\delta} \int_1^{1+\delta} + \int_1^{1+\delta} \int_{1+\delta}^{\infty} + \int_{1+\delta}^{\infty} \int_1^{1+\delta} + \int_{1+\delta}^{\infty} \int_{1+\delta}^{\infty} \right\} \times \\ & \quad \left\{ f\left(\frac{r_1}{\rho_1}, \frac{r_2}{\rho_2}\right) + f\left(r_1 \rho_1, \frac{r_2}{\rho_2}\right) + f\left(\frac{r_1}{\rho_1}, r_2 \rho_2\right) + f(r_1 \rho_1, r_2 \rho_2) - \right. \\ & \quad \left. - 4 \sum_{k=1}^{[n/2]} \frac{1}{(2k)!} \sum_{s=0}^k C_{2k}^{2s} \ln^{2(k-s)} \rho_1 \cdot \ln^{2s} \rho_2 \cdot E_{r_1^{2(k-s)}, r_2^{2s}}^{(2k)} f(r_1, r_2) \right\} \times \\ & \quad \times K_{\lambda_1, \lambda_2}(\rho_1, \rho_2) \frac{d\rho_1}{\rho_1} \frac{d\rho_2}{\rho_2} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 \quad (4) \end{aligned}$$

В силу условия теоремы имеет равенство

$$\begin{aligned} & \varphi_{\rho_1, \rho_2}(f; r_1, r_2) = \\ & = 4 \sum_{k=1}^{[n/2]} \frac{1}{(2k)!} \sum_{s=0}^k C_{2K}^{2S} \ln^{2(k-s)} \rho_1, \ln^{2s} \rho_2 \cdot E_{r_1^{2(k-s)}, r_2^{2s}}^{(2k)} f(r_1, r_2) + 0 \left[(\sqrt{\ln^2 \rho_1 + \ln^2 \rho_2})^n \right] \end{aligned}$$

при $\rho_i \rightarrow 1 + (i = 1, 2)$ где

$$\varphi_{\rho_1, \rho_2} f(r_1, r_2) = f\left(\frac{r_1}{\rho_1}, \frac{r_2}{\rho_2}\right) + f\left(r_1 \rho_1, \frac{r_2}{\rho_2}\right) + f\left(\frac{r_1}{\rho_1}, r_2 \rho_2\right) + f(r_1 \rho_1, r_2 \rho_2)$$

Следовательно, для любого $\varepsilon > 0$ есть $\rho > 0$ такое, что при

$$0 < \rho_i - 1 < \delta \quad (i = 1, 2)$$

справедливо неравенство

$$|A_1| < \varepsilon \int_1^{1+\delta} \int_1^{1+\delta} (\sqrt{\ln^2 \rho_1 + \ln^2 \rho_2})^n K_{\lambda_1, \lambda_2}(\rho_1, \rho_2) \frac{d\rho_1}{\rho_1} \frac{d\rho_2}{\rho_2} < \varepsilon v_{\lambda_1, \lambda_2}^n \quad (5)$$

$$A_1 = 0(v_{\lambda_1, \lambda_2}^n) \text{ при } \lambda_i \rightarrow \lambda_i^0 \quad (i = 1, 2)$$

Рассмотрим A_2 :

$$\begin{aligned} |A_2| & \leq \int_1^{1+\delta} \int_{1+\delta}^{+\infty} |v_{\lambda_1, \lambda_2}(f; r_1, r_2)| K_{\lambda_1, \lambda_2}(\rho_1, \rho_2) \frac{d\rho_1}{\rho_1} \frac{d\rho_2}{\rho_2} + \sum_{k=1}^{[n/2]} \frac{1}{(2k)!} \cdot \sum_{s=0}^k C_{2K}^{2S} \left| E_{r_1^{2(k-s)}, r_2^{2s}}^{(2k)} f(r_1, r_2) \right| \cdot \\ & \cdot \int_1^{1+S} \int_{1+S}^{+\infty} \ln^{2(k-s)} \rho_1, \ln^{2s} \rho_2 K_{\lambda_1, \lambda_2}(\rho_1, \rho_2) \frac{d\rho_1}{\rho_1} \frac{d\rho_2}{\rho_2} = A_2^{(1)} + A_2^{(2)} \end{aligned}$$

Так как

$$\begin{aligned} A_2^{(1)} & \leq c_1 \int_1^{1+\delta} \int_{1+\delta}^{+\infty} \left| f\left(\frac{r_1}{\rho_1}, \frac{r_2}{\rho_2}\right) + f\left(r_1 \rho_1, \frac{r_2}{\rho_2}\right) + f\left(\frac{r_1}{\rho_1}, r_2 \rho_2\right) + f(r_1 \rho_1, r_2 \rho_2) \right| \cdot (\sqrt{\ln^2 \rho_1 + \ln^2 \rho_2})^{n+j} \cdot \\ & \cdot K_{\lambda_1, \lambda_2}(\rho_1, \rho_2) \frac{d\rho_1}{\rho_1} \frac{d\rho_2}{\rho_2} \leq c_1 \|f\|_{L_p} v_{\lambda_1, \lambda_2}^{n+j} \\ A_2^{(2)} & \leq \sum_{k=1}^{[n/2]} \frac{1}{(2k)!} \cdot \sum_{s=0}^k C_{2K}^{2S} \left| E_{r_1^{2(k-s)}, r_2^{2s}}^{(2k)} f(r_1, r_2) \right| \times \\ & \times \ln^{(n-2k+j)}(1 + \rho) \int_1^{1+S} \int_{1+S}^{+\infty} (\sqrt{\ln^2 \rho_1 + \ln^2 \rho_2})^{n+j} K_{\lambda_1, \lambda_2}(\rho_1, \rho_2) \frac{d\rho_1}{\rho_1} \frac{d\rho_2}{\rho_2} \leq C_2 v_{\lambda_1, \lambda_2}^{n+j} \end{aligned}$$

при $j \geq 1$, то в силу условия (2) получим

$$A_2 = 0(v_{\lambda_1, \lambda_2}^n), \lambda_i \rightarrow \lambda_i^0 \quad (i = 1, 2) \quad (6)$$

Аналогично, оцениваются A_3 и A_4

$$A_3 = 0(v_{\lambda_1, \lambda_2}^n) \quad (7)$$

$$A_4 = 0(v_{\lambda_1, \lambda_2}^n) \text{ при } \lambda_i \rightarrow \lambda_i^0 \quad (i = 1, 2) \quad (8)$$

Из оценок (5), (6), (7), (8) и выражения (4) следует равенство (3).

Теперь применим доказанные теоремы к конкретным интегралам Меллина.

Выражение

$$\prod_{\lambda_1 \lambda_2} (f; r_1, r_2) = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{4} \iint_{R_2^+} f\left(\frac{r_1}{\rho_1}, \frac{r_2}{\rho_2}\right) e^{-\lambda |\ln \rho_1| - \lambda_2 |\ln \rho_2|} \frac{d\rho_1}{\rho_1} \frac{d\rho_2}{\rho_2}$$

назовём двойным сингулярным интегралом Меллина. В этом случае

$$v_{\lambda_1, \lambda_2}^{[2(k-s), 2s]} = [2(k-s)]! (2s)!, v_{\lambda_1, \lambda_2}^{[n]} = \frac{\pi}{2} \frac{\Gamma(n+3)}{\delta^{(n+2)}} < +\infty, \text{ где } \delta = \delta(\xi) = \cos \xi + \sin \xi$$

при $\xi \in [0, \pi/2]$.

Следовательно, на основании теоремы имеет

$$\prod_{\lambda_1 \lambda_2} (f; r_1, r_2) - f(r_1, r_2) = 4 \sum_{k=1}^{[n/2]} \sum_{s=0}^k \frac{E_{r_1^{2(k-s)}, r_2^{2s}}^{(2k)} f(r_1, r_2)}{\lambda_1^{2(k-s)} \cdot \lambda_2^{2s}} + 0 \left([\lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2}] \frac{n}{2} \right)$$

при $\lambda_i \rightarrow \infty (i = 1, 2)$.

Следствие. Если $f(r_1, r_2) \in L(R_2^+)$ в окрестности точек (r_1, r_2) имеет непрерывные частные производные второго порядка, то имеет место

$$\prod_{\lambda_1 \lambda_2} (f; r_1, r_2) - f(r_1, r_2) = 4 \left[\frac{E_{r_1^2}^{(2)} f(r_1, r_2)}{\lambda_1^2} + \frac{E_{r_2^2}^{(2)} f(r_1, r_2)}{\lambda_2^2} \right] + 0(\lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2})$$

при $\lambda_i \rightarrow \infty (i = 1, 2)$.

Список литературы

Мамедов Р.Г. Приближение функции линейными операторами. Баку 1967 г, 252 стр.
 Мамедов Р.Г. Преобразование Меллина и теория приближения. Баку 1991 г. 272 стр.
 Musayev A.M. On saturation order of functions some variables by singular. International journal of Applied Mathematics, Vol.31, №2018, June.
 Мусаев А.М. On asymptotic estimation of approximation of functions by general Mellin type a singular integrals. Transformation of Azerbaijan, 2009, XXIX, №4, pp.113-121.
 Мусаев А.М. О порядке приближение [m, n]-сингулярных интегралов в метрике пространство $L_{p, \sigma, \tau}(E_2^+)$. Abstracts of IV International Scientific and Practical Conference Rome, Italy, february 26-28, 2021, pp194-202.
 Мусаев А.М. О классе насыщения функций нескольких переменных α сингулярными интегралами в пространства $L^p(R_n)$. Proceedings of

XI International Scientific and Practical Conference London, United Kingdom. 2-4 June 2021, 734-742
 Мусаев А.М. On saturation order of functions some variables by singular. International journal of Applied Mathematics, vol.31, №3, 2018 June, Bulgaria.
 Мусаев А.М. On linear operators giving higher order approximation of functions in $L_o^p(R^+)$, International Journal of Applied Mathematics, Vol.33, №1, 2020, pp.15-27.
 Мусаев А.М. Boundedness of commutators of an oscillatory integral operators in variable exponent Morrey spaces. International Journal of Applied Mathematics, vol. 34, № 4, pp.745-760, August 2021.
 Berens H., Butzer P. On the best approximation for singular integrals by Laplace transform methods, On Approximation Theory, P.L. Butzer and J. Korevaar, JSNMS, Birkhauser, 1964, pp.24-42.
 Kolbe W., Nessel R. Saturation theory in connection with Mellin transform methods, SJAM, J. Mat. Anal. V3, №2, 1972, pp.246-252.

О РЕЗУЛЬТАНТЕ МНОГОЧЛЕНОВ С ЦЕЛЫМИ РАЦИОНАЛЬНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ.*Паришутина Елена Григорьевна,**учитель математики, ГБОУ Школа № 2036**методист отдела модерации электронного контента (Математика), Государственное автономное образовательное учреждение высшего образования города Москвы «Московский городской педагогический университет»***ON THE RESULTANT OF POLYNOMIALS WITH INTEGER RATIONAL COEFFICIENTS.***E. G. Parshutina,**mathematics teacher, School No. 2036**Methodologist of the Department of Electronic content Moderation (Mathematics), State Autonomous Educational Institution of Higher Education of the city of Moscow "Moscow City Pedagogical University"**DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2023.1.112.1881***SUMMARY**

The question of the algebraic meaning of a non-zero integer is studied if this number is the result of two polynomials with rational integer coefficients. The concept of p -corresponding polynomials is defined. Two theorems on the nonzero resultant are formulated.

АННОТАЦИЯ

Исследован вопрос об алгебраическом смысле отличного от нуля целого числа, если это число является результатом двух многочленов с целыми рациональными коэффициентами. Определено понятие p -соответствующих многочленов. Сформулированы две теоремы о ненулевом результате.

Key words: resultant, polynomial, rational coefficient, factorization, the ring of polynomials, degree of the polynomial, determinant, resultant theorem, nonzero resultant theorem, canonical decomposition.

Ключевые слова: результат, многочлен, рациональный коэффициент, разложение на множители, кольцо многочленов, степень многочлена, определитель, теорема о результате, теорема о ненулевом результате, каноническое разложение.

Понятие результата является основным в теории исключения неизвестного из систем алгебраических уравнений высших степеней и помогает ответить на важный вопрос теории многочленов – о разложении на множители.

Результант двух многочленов, рассматриваемых над произвольным полем, может быть представлен в форме определителя. Если результат равен нулю, то это означает, что многочлены имеют общий множитель степени не меньше единицы; если же его значение отлично от нуля, то многочлены не имеют общего множителя указанного типа.

Настоящее исследование посвящено выяснению алгебраического смысла отличного от нуля целого числа, если это число является результатом двух многочленов с целыми рациональными коэффициентами.

В данной статье представлены результаты исследования случая, когда результат отличен от нуля и рассматривается для многочленов от одного неизвестного.

В работе используются следующие стандартные обозначения:

Z – множество целых рациональных чисел,

Q – поле рациональных чисел,

P – произвольное поле;

нуль и единица произвольного поля обозначаются арифметическими символами 0 и 1; элементы поля P обозначаются строчными буквами латинского алфавита;

$P[x]$ – кольцо многочленов над произвольным полем P ,

$Q[x]$ – кольцо многочленов на полем Q ,

$Z[x]$ – подкольцо кольца $Q[x]$.

н.о.д. $(f(x), g(x))$ – наибольший общий делитель многочленов $f(x)$ и $g(x)$.

Символ $\deg f(x)$ обозначает степень многочлена $f(x)$,

$\det A$ – определитель квадратной матрицы A ,

Z_p – поле классов вычетов по простому модулю p .

Элементы поля Z_p обозначаются $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \dots$, где a, b, c, \dots – числа из Z .

Символ $\stackrel{\text{def}}{=}$ означает равенство «по определению».

Рассмотрим кольцо многочленов $P[x]$ над произвольным полем P .

Возьмем два многочлена $f(x), g(x) \in P[x]$, не являющихся элементами поля P .

$$f(x) = a_0x^n + a_1x^{n-1} + \dots + a_n$$

$$g(x) = b_0x^m + b_1x^{m-1} + \dots + b_m$$

с условием, что их старшие коэффициенты отличны от нуля.

Определение.

Результантом $R(f, g)$ двух многочленов $f(x)$ и $g(x)$ называется определитель порядка $\deg f(x) + \deg g(x)$ следующего вида:

$$R(f, g) = \begin{vmatrix} a_0 a_1 \dots a_n \dots \\ \cdot a_0 a_1 \dots a_n \dots \\ \dots \dots \dots \\ \dots a_0 a_1 \dots a_n \\ b_0 b_1 \dots b_m \dots \\ \cdot b_0 b_1 \dots b_m \\ \dots \dots \dots \\ \dots \dots \dots \\ \dots b_0 b_1 \dots b_m \end{vmatrix}.$$

На незаполненных местах в данном определителе должны быть нули.

При написании конкретных результатов все необходимые нули выписываются.

Результат обладает важным свойством, которое сформулировано и доказано в форме основной теоремы о результате. Известна следующая теорема ([1], 127-129; [2], 502).

Основная теорема о результате.

Многочлены ненулевой степени
 $f(x) = a_0 x^n + a_1 x^{n-1} + \dots + a_n$ и
 $g(x) = b_0 x^m + b_1 x^{m-1} + \dots + b_m$,

старшие коэффициенты которых отличны от нуля, обладают общим множителем степени не ниже первой тогда и только тогда, когда их результат равен нулю:

$$R(f, g) = 0.$$

Рассмотрим теперь многочлены над полем рациональных чисел Q , т.е. рассмотрим кольцо многочленов $Q[x]$. В этом кольце содержатся многочлены с целыми рациональными коэффициентами. Они образуют подкольцо многочленов $Z[x] \subset Q[x]$. Очевидно, что если $f(x) \in Z[x]$, $g(x) \in Z[x]$ и $R(f, g) = a$, то число $a \in Z$.

Если $a = 0$, то согласно основной теореме о результате существует общий делитель $d(x) \in Q[x]$ с условиями, что $\deg d(x) \geq 1$

Пусть $a \neq 0$. В этом случае ненулевое значение результата также имеет определенный смысл; выяснению этого смысла и посвящено настоящее исследование.

Предположим сначала, что $a \neq \pm 1$ и, следовательно, имеет место каноническое разложение

$$a = p_1^{v_1} \cdot p_2^{v_2} \cdot \dots \cdot p_s^{v_s}.$$

Пусть p – одно из простых p_1, \dots, p_s , то есть $a \vdots p$. Возникает вопрос: какие свойства многочленов $f(x)$ и $g(x)$ характеризует простое число p ?

Прежде чем ответить на поставленный вопрос, дадим определение p – соответствующих многочленов.

Определение.

Каждому многочлену $f(x)$ с целыми рациональными коэффициентами поставим в соответствие многочлены над полем классов вычетов Z_p по модулю p , заменив все коэффициенты многочлена соответствующими им классами из Z_p .

Таким образом, если

$$f(x) = a_0 x^n + a_1 x^{n-1} + \dots + a_n,$$

то

$$\bar{f}(x) \stackrel{\text{def}}{=} \bar{a}_0 x^n + \bar{a}_1 x^{n-1} + \dots + \bar{a}_n$$

и многочлен $\bar{f}(x)$ назовем p – соответствующим многочлену $f(x)$.

Будем предполагать при этом, что a_0 не делится на p , т.к. в противном случае $\bar{a}_0 = \bar{0}$ и степень многочлена только понизится. Заметим, что обратный переход от многочлена над полем классов вычетов по модулю p к многочлену с целыми рациональными коэффициентами будет определяться неоднозначно: многочлену $\bar{f}(x)$ соответствует многочлен $f_1(x)$, коэффициенты которого не только совпадают с коэффициентами многочлена $f(x)$, но и могут быть сравнимы с ними по данному модулю p .

Ответ на поставленный выше вопрос о том, какие свойства многочленов $f(x)$ и $g(x)$ характеризует простое число p , являющееся делителем ненулевого результата, дают следующие теоремы.

Первая теорема о ненулевом результате.

Если $R(f, g) = a$, $a \neq 0$, $a \neq \pm 1$, то для каждого простого числа p , делящего a , p – соответствующие многочлены $\bar{f}(x)$ и $\bar{g}(x)$ над полем классов вычетов Z_p имеют общий множитель степени не меньше единицы.

В доказательстве этой теоремы используются сформулированные и доказанные в данном исследовании леммы о замене элементов определителя на числа, сравнимые с ними по модулю p .

Вторая теорема о ненулевом результате.

Пусть даны два многочлена $f(x)$ и $g(x)$ с целыми рациональными коэффициентами. При этом $\deg f(x) \geq 1$, $\deg g(x) \geq 1$. Если результат этих многочленов равен ± 1 , т.е. $R(f, g) = \pm 1$, то ни при каком p , являющимся простым, p – соответствующие многочлены $\bar{f}(x)$ и $\bar{g}(x)$ не имеют общего множителя степени не меньше единицы в поле с p элементами.

Доказательство второй теоремы проводится методом от противного.

Приведем пример, иллюстрирующий первую теорему о ненулевом результате.

Пример 1.

Рассмотрим многочлены с целыми коэффициентами над полем Q .

$$f(x) = 4x^3 + 7x^2 - x + 2,$$

$$g(x) = x^2 + 2.$$

Составим и вычислим их результат над этим полем

$$R(f, g) = \begin{vmatrix} 4 & 7 & -1 & 2 & 0 \\ 0 & 4 & 7 & -1 & 2 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 2 \end{vmatrix} = 432;$$

Каноническое разложение значения результата имеет вид: $a = 432 = 2^4 \cdot 3^3$.

В данном случае число a имеет два простых делителя – числа 2 и 3. В соответствии с этим рассмотрим два случая.

1) $a : 2$.

Рассмотрим 2 – соответствующие многочлены над полем классов вычетов по модулю 2.

$$\bar{f}(x) = x^2 + x,$$

$$\bar{g}(x) = x^2.$$

Без вычисления результата многочленов над полем Z_2 и без применения алгоритма Евклида очевидно, что н.о.д. $(x^2 + x; x^2) = x$.

2) $a : 3$.

Рассмотрим 3 – соответствующие многочлены над полем классов вычетов по модулю 3.

$$\bar{f}(x) = x^3 + x^2 + \bar{2}x + \bar{2},$$

$$\bar{g}(x) = x^2 + \bar{2}.$$

Так как

$$x^3 + x^2 + \bar{2}x + \bar{2} = x(x^2 + \bar{2}) + (x^2 + \bar{2}) = (x + \bar{1})(x^2 + \bar{2}),$$

то легко заметить, что

$$\text{н.о.д.}(\bar{f}(x), \bar{g}(x)) = x^2 + \bar{2}.$$

Значит, p – соответствующие многочлены над полем классов вычетов по модулю p при значении результата, отличном от 0 и ± 1 , имеют общие множители степени не меньше единицы. В данном примере 2 – соответствующие множители имеют общий множитель x , а 3 – соответствующие многочлены имеют общий множитель $x^2 + \bar{2}$.

Приведем примеры, иллюстрирующие вторую теорему о ненулевом результате.

Пример 2.

Приведём примеры многочленов, для которых результат равен ± 1 .

$$a) f(x) = x^2 + x + 1,$$

$$g(x) = x + 1,$$

$$R(f, g) = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{vmatrix} = 1.$$

$$б) f(x) = x^2 + 3x + 1,$$

$$g(x) = x^2 + 3x,$$

$$R(f, g) = \begin{vmatrix} 1 & 3 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 3 & 1 \\ 1 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 3 & 0 \end{vmatrix} = 1.$$

Легко видеть, что в приведённых примерах многочлены не имеют общих множителей. Согласно второй теореме о ненулевом результате ни при каком числе p , являющимся простым, p – соответствующие многочлены $\bar{f}(x)$ и $\bar{g}(x)$ не имеют общего множителя степени не меньше единицы ни в каком конечном поле с p элементами.

Изложенная выше теория применима и при решении вопроса о наличии кратного множителя у многочлена $f(x)$ в конечных полях с p элементами, т. к. дискриминант многочлена $f(x)$ определяется как результат многочлена $f(x)$ и его формальной производной $f'(x)$. Для проверки существования кратного множителя степени не меньше единицы у многочлена, после вычисления дискриминант сравнивают с нулём.

Пусть $f(x)$ – ненулевой многочлен произвольного кольца $P[x]$, где P – поле характеристики нуль,

$$f(x) = a_0x^n + a_1x^{n-1} + \dots + a_n$$

с условием, что старший коэффициент $f(x)$ отличен от нуля.

Определение.

Дискриминантом многочлена $f(x) \in P[x]$ называется результат $f(x)$ и его производной, умноженной на $a_0^{-1}(-1)^{\frac{n(n-1)}{2}}$. Дискриминант многочлена обозначается через $D(f)$.

Таким образом,

$$D(f) = (-1)^{\frac{n(n-1)}{2}} a_0^{-1} R(f(x), f'(x))$$

Ответ на вопрос о наличии кратного множителя у многочлена $f(x) \in P[x]$ даёт следующая теорема.

Теорема о дискриминанте.

Многочлен $f(x) \in P[x]$ тогда и только тогда имеет кратный множитель степени не меньше единицы, когда его дискриминант равен нулю.

Рассмотрим случай, когда дискриминант многочлена $f(x)$ отличен от нуля, а сам многочлен $f(x)$ есть многочлен над Z степени $n \geq 2$, т.е.

$$f(x) = a_0x^n + a_1x^{n-1} + \dots + a_n,$$

где $a_0, a_1, \dots, a_n \in Z, a_0 \neq 0$ и $D(f) = a, a \neq 0$

Пусть p – произвольно взятый простой делитель числа a . Случай, когда $p/a_0 \dots p/a_{n-2}$ интереса не представляет, т.к. p – соответствующий многочлен $\bar{f}(x)$ сводится тогда либо к многочлену первой или нулевой степени, либо к нулю. Поэтому мы и будем предполагать, что a_0 не делится на p (в противном случае рассуждения остаются такими, уменьшится только степень p – соответствующего многочлена $\bar{f}(x)$).

Согласно изложенной выше теории результата двух многочленов над кольцом Z_p – соответствующий многочлен $\bar{f}(x)$ со старшим коэффициентом $\bar{a}_0 \neq \bar{0}$ и его производная будет иметь общий множитель $h(x)$ степени не меньше единицы при условии, что $h'(x) \neq 0$.

Можно доказать, что этот множитель будет кратным для многочлена

$$\bar{f}(x) = \bar{a}_0 x^n + \bar{a}_1 x^{n-1} + \dots + \bar{a}_n$$

Пример 3.

Вычислим дискриминант многочлена

$$f(x) = x^3 - 3x + 7$$

Предварительно найдем его производную

$$f'(x) = 3x^2 - 3$$

$$(-1)^3 D(f) = R(f(x), f'(x))$$

$$= \begin{vmatrix} 1 & 0 & -3 & 7 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -3 & 7 \\ 3 & 0 & -3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & -3 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 & -3 \end{vmatrix} = 1215$$

$$a = 1215 = 3^5 \cdot 5$$

Дискриминант многочлена отличен от нуля, поэтому $f(x)$ не имеет кратных множителей в основном поле – поле Q . Пусть $p = 5$. Запишем 5 – соответствующий многочлен в поле классов вычетов Z_5 :

$$\bar{f}(x) = x^3 + 2x + 2$$

Этот многочлен имеет кратный множитель в поле классов вычетов Z_5 :

$$h^2(x) = (4x + 1)^2, \text{ т.к.}$$

$$\bar{f}(x) = (4x + 1)^2 \cdot (x + 2)$$

Список литературы.

Ван дер Варден, Б. Л., Алгебра / Б. Л. ван дер Варден ; под ред. Ю.И. Мерзлякова. – Москва : Наука, 1979. – 623 с.

Кострикин, А. И., Введение в алгебру : учебник для университетов / А. И. Кострикин. – Москва : Наука, 1977. – 495 с.

Куликов, Л. Я., Алгебра и теория чисел / Л. Я. Куликов. – Москва : Высшая школа, 1979. – 562 с.

Курош, А. Г., Курс высшей алгебры / А. Г. Курош. – Москва : Физматгиз, 1962. – 432 с.

Ляпин, Е. С., Алгебра и теория чисел / Е. С. Ляпин, А. Е. Евсеев. – Москва : Просвещение, 1978. – 832 с.

Окунев, Л. Я., Высшая алгебра / Л. Я. Окунев. – Москва : Государственное учебно-

педагогическое издательство министерства просвещения РСФСР, 1958 – 336 с.

Евразийский Союз Ученых. Серия: технические и физико-математические науки

Ежемесячный научный журнал

№ 9 (112)/2023 Том 1

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Макаровский Денис Анатольевич

AuthorID: 559173

Заведующий кафедрой организационного управления Института прикладного анализа поведения и психолого-социальных технологий, практикующий психолог, специалист в сфере управления образованием.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Штерензон Вера Анатольевна

AuthorID: 660374

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт новых материалов и технологий (Екатеринбург), кандидат технических наук

Синьковский Антон Владимирович

AuthorID: 806157

Московский государственный технологический университет "Станкин", кафедра информационной безопасности (Москва), кандидат технических наук

Штерензон Владимир Александрович

AuthorID: 762704

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт фундаментального образования, Кафедра теоретической механики (Екатеринбург), кандидат технических наук

Зыков Сергей Арленович

AuthorID: 9574

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Отдел теоретической и математической физики, Лаборатория теории нелинейных явлений (Екатеринбург), кандидат физ-мат. наук

Дронсейко Виталий Витальевич

AuthorID: 1051220

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Кафедра "Организация и безопасность движения" (Москва), кандидат технических наук

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке ссылка на журнал обязательна. Материалы публикуются в авторской редакции.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Художник: Валегин Арсений Петрович
Верстка: Курпатова Ирина Александровна

Адрес редакции:
198320, Санкт-Петербург, Город Красное Село, ул. Геологическая, д. 44, к. 1, литера А
E-mail: info@euroasia-science.ru ;
www.euroasia-science.ru

Учредитель и издатель ООО «Логика+»
Тираж 1000 экз.