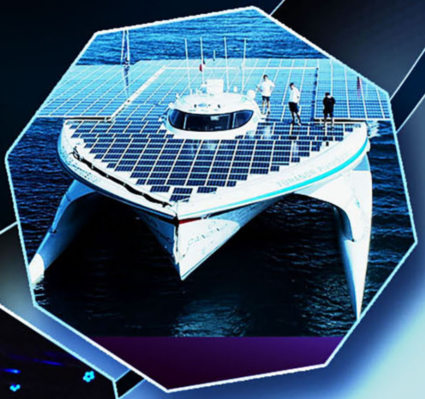
Monograph

PROSPECTIVE GLOBAL SCIENTIFIC TRENDS

Book 7. Part 8

'2021



SWorld
Germany

Denysiuk S., Verbytskyi I.V., Bernatskyi A.V., Bondarenko I.V., Burlakov V.I.et al.

PROSPEKTIVE GLOBALE WISSENSCHAFTLICHE TRENDS

INNOVATIVE TECHNIK, TRANSPORT, SICHERHEIT

PROSPECTIVE GLOBAL SCIENTIFIC TRENDS

INNOVATIVE TECHNOLOGY, TRANSPORT, SECURITY

Monographic series «European Science»
Book 7. Part 8.

In internationalen wissenschaftlich-geometrischen Datenbanken enthalten
Included in International scientometric databases

MONOGRAPHIE

MONOGRAPH

ScientificWorld-NetAkhatAV
Karlsruhe 2021

*Monographic series «**European Science**»*

Authors:
Bernatskyi A.V. (3), Bondarenko I.V. (9), Burlakov V.I. (4), Burlakova G.Y. (4), Denysiuk S. (7), Fedoriv M. (6), Galushchak I. (6), Garmash S.N. (2), Kolomiichuk M. (7), Kudinova E. (5), Kurliak P. (6), Liuta D. (1), Liutyi R. (1), Lukashenko V.A. (3), Manoilov O. (5), Pakhomova V.N. (8), Shamsutdinova N.O. (3), Siora O.V. (3), Sokolovskyi M.V. (3), Tyshkovets M. (1), Verbytskyi I.V. (9)

Reviewers:
Kovalov V.D., Rector of Donbass State Machine-Building Academy, Laureate of the State Prize of Ukraine in Science and Technology, Laureate of the Prize of the Cabinet of the Ministry of Finance of Ukraine for the disintegration and introduction of technical sciences (4);
Suglobov V.V., Azov State Technical University, Head of the Department of Pediatric Transport, Road, Budget, Meliorativny Machines and Establishment, Doctor of Technical Sciences, Professor (4);
Vaschenko V.A., Cherkasy State Technical University, Head of the Department of Physics, Doctor of Technical Sciences, Professor (4);
Derevianko Denys, Head of the power supply department, associate professor, PhD in technical sciences (7);
Kyselova Anna Gennadyivna, Department of System Design, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", PhD, associate professor (9);
Bielokha Halyna Sergyivna, Department of Power Supply, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", PhD, associate professor (9).

Prospektive globale wissenschaftliche Trends: Innovative Technik, Transport, Sicherheit. Monografische Reihe «Europäische Wissenschaft». Buch 7. Teil 8. 2021.

Prospective global scientific trends: Innovative technology, transport, security. Monographic series «European Science». Book 7. Part 8. 2021.

ISBN 978-3-949059-44-5
DOI: 10.30890/2709-2313.2021-07-08

Published by:
ScientificWorld-NetAkhatAV
Lußstr. 13
76227 Karlsruhe, Germany
in conjunction with Institute «SE&E»
e-mail: orgcom@sworld.education
site: www.sworld.education

Copyright © Authors, 2021
Copyright © Drawing up & Design. ScientificWorld-NetAkhatAV, 2021

ÜBER DIE AUTOREN / ABOUT THE AUTHORS

1. *Bernatskyi Artemii Volodymyrovych*, E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine, PhD in technical sciences, senior researcher - *Chapter 3 (co-authored)*
2. *Bondarenko Iuliia Valeryivna,* National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine, PhD in technical sciences, assistant professor - *Chapter 9 (co-authored)*
3. *Burlakov Viktor Ivanovich,* Priazovsky State Technical University, Ukraine, PhD in technical sciences, assistant professor - *Chapter 4 (co-authored)*
4. *Burlakova Galina Yurievna,* Priazovsky State Technical University, Ukraine, PhD in technical sciences, assistant professor - *Chapter 4 (co-authored)*
5. *Denysiuk Sergii,* National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor - *Chapter 7 (Co-authored)*
6. *Fedoriv Mykhaylo*, Ivano-Frankivsk National University of Oil and Gas, Ukraine, PhD in technical sciences, assistant professor - *Chapter 6 (co-authored)*
7. *Galushchak Ivan,* Ivano-Frankivsk National University of Oil and Gas, Ukraine, PhD in technical sciences, assistant professor - *Chapter 6 (co-authored)*
8. *Garmash Svetlana Nickolaevna,* Ukrainian State University of Chemical Technology, Ukraine, PhD in Agricultural Sciences, assistant professor - *Chapter 2*
9. *Kolomiichuk Maryna,* National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine, master - *Chapter 7 (Co-authored)*
10. *Kudinova Ekaterina,* State Higher Educational Institution "Priazovsky State Technical University", Ukraine - *Chapter 5 (co-authored)*
11. *Kurliak Petro,* Ivano-Frankivsk National University of Oil and Gas, Ukraine, PhD in technical sciences, assistant professor - *Chapter 6 (co-authored)*
12. *Liuta Daria,* National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine - *Chapter 1 (co-authored)*
13. *Liutyi Rostyslav,* National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine, PhD in technical sciences, assistant professor - *Chapter 1 (co-authored)*
14. *Lukashenko Volodymyr Andriiovych,* E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine, PhD in technical sciences - *Chapter 3 (co-authored)*
15. *Manoilov Oleg,* State Higher Educational Institution "Priazovsky State Technical University", Ukraine - *Chapter 5 (co-authored)*

16. *Pakhomova Victoria Nikolaevna,* Ukrainian State University of Science and Technology (Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan), Ukraine, PhD in technical sciences, assistant professor - *Chapter 8*
17. *Shamsutdinova Nataliia Oleksandrivna*, Institute of Electric Welding. E.O. Paton National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine, student - *Chapter 3 (co-authored)*
18. *Siora Oleksandr Vasylovych,* E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine, specialist - *Chapter 3 (co-authored)*
19. *Sokolovskyi Mykola Volodymyrovych,* E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine, graduate student - *Chapter 3 (co-authored)*
20. *Tyshkovets Mariia*, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine - *Chapter 1 (co-authored)*
21. *Verbytskyi Ievgen Volodymyrovych,* National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine, Doctor of Technical Sciences, assistant professor - *Chapter 9 (co-authored)*

Inhalt / Content

CHAPTER 1
PHYSICO-CHEMICAL FUNDAMENTALS OF SYNTHESIS OF BINDING MATERIALS FROM ORTHOPHOSPHORIC ACID AND INORGANIC SALTS OF METALS

Introduction 8
1.1. Modern scientific issues of creation and use of binders 8
1.2. The aim and objectives of the study 9
1.3. Method of experiments and calculations 9
1.4. Qualitative analysis of the chemical interaction of inorganic salts with orthophosphoric acid 11
1.5. Synthesis of phosphate binders using sulfuric acid salts 12
1.6. Synthesis of phosphate binders using salts of halogen acids 23
1.7. Synthesis of phosphate binders using nitric acid salts 33
1.8. Synthesis of phosphate binders using carbonates 38
Conclusions 44

CHAPTER 2
SAFETY AND HYGIENE IN THE CONDITIONS PANDEMIC COVID-19

Introduction 46
2.1. Risks of COVID-19 infection. 46
2.2. Regulatory framework in the field of occupational safety and health 47
2.3. Danger of work of medical personnel 48
2.4. Requirements for the organization of workplaces 50
2.5. Disease management in the workplace 53
2.6. Mental health and wellbeing of workers 54
2.7. Occupational hygiene in the workplace 55
2.8. Work areas and workplaces 57
2.9. General measures for labor protection at enterprises 58
Conclusions 58

CHAPTER 3
STUDY ON THE INFLUENCE OF PULSED AND CONTINUOUS-WAVE GENERATION MODES OF LASER RADIATION ON THE RESULTS OF WELDING OF CORROSION- AND HEAT-RESISTANT AISI 321 STEEL IN DIFFERENT SPATIAL POSITIONS

Introduction 60
3.1. Techniques used in the study 60
3.2. Analysis of visual examination results 61
3.3. Analysis of radiographic examination results 61
3.4. Analysis of the results of metallographic study 63
Conclusions 74

CHAPTER 4
USE OF VIBRO-CENTRIFUGAL METHOD FOR PROCESSING PARTS FROM SUPERHARD CERAMICS

Introduction 75
4.1. Selection of tool materials for machining superhard ceramics 75
4.2. Surface quality of ceramics after vibro-centrifugal treatment 77
4.3. Varying the radius of rounding of the cutting edge of ultrahard ceramic inserts 81
4.4. Stability of cutting tools for superhard ceramics 85
Conclusions 86

CHAPTER 5
MODERN CONCEPTS OF IMPROVING THE TOOL RESISTANCE OF THE TOOL DURING DEVELOPMENT

Introduction 87
5.1. Analysis of the conditions of vibration during machining........................ 87
5.2. Overview of ways to prevent vibration during deployment processing 88
5.3. Review of scan designs and prospects for improving their designs and application in technological systems to improve vibration resistance........ 89
5.4. Analysis of the influence of design parameters of sweeps with alternating inclination of helical teeth on vibration resistance and substantiation of conceptual features of their structure 91
Conclusions 94

CHAPTER 6
CONSTRUCTION OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE RELIABILITY OF THE ELECTRIC DRIVE OF PUMP UNITS

Introduction 95
6.1. Characteristics of the object of study 95
6.2. Construction of a mathematical model of reliability 95
6.3. Mathematical model of stator winding reliability.................................. 103
Conclusions 104

CHAPTER 7
ANALYSIS OF FINANCIAL AND TECHNICAL INDICATORS OF SYSTEM EFFICIENCY IN DYNAMIC MODES

Introduction 105
7.1. Systems of active management of distributed energy facilities............... 105
7.2. Dynamic pricing in Microgrid 106
7.3. Algorithm for calculating the price of primary fuel depending on the uneven consumption of active power.. 107
Conclusions 112

CHAPTER 8
DETERMINATION OF NETWORK ATTACKS USING NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES

Introduction 113
8.1. Problem statement and database selection 114
8.2. Research of the type of neural network to determine attacks 116
8.2.1. Multilayer perceptron 116
8.2.2. Self-organizing map 117
8.2.3. Neural fuzzy network 119
8.2.4. Hybrid attack detection: combining different classifiers 121
8.3. Research of one-level and two-level approaches to detecting network attacks 121
8.3.1. Determination of neural network configurations 121
8.3.2. Investigation of neural network error and learning time 123
8.3.3. Investigation of errors of the first and second kind 123
8.4. Combined option for detecting attacks: a combination of neural network technology with immunology 125
8.4.1. Initial data for SOM 125
8.4.2. Sampling based on the clonally selection algorithm 126
8.4.3. Research results 127
Conclusions 128

CHAPTER 9
SWITCHED RELUCTANCE MOTORS. DESIGN, SIMULATION, CONTROL

Introduction 129
9.1. Typical operation and design principles of switched reluctance motors. 131
9.2. Operation features and pole ratios of U-shaped pole switched reluctance motors 134
9.3. Optimal pole profile of U-shaped pole switched reluctance motors 141
9.4. Minimizing the torque ripple of electric drive for switched reluctance motors 147
Conclusions 153

References 155

ISBN 978-3-949059-44-5

KAPITEL 1 / CHAPTER 1
PHYSICO-CHEMICAL FUNDAMENTALS OF SYNTHESIS OF BINDING MATERIALS FROM ORTHOPHOSPHORIC ACID AND INORGANIC SALTS OF METALS
ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ СИНТЕЗУ ЗВ'ЯЗУВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ОРТОФОСФОРНОЇ КИСЛОТИ ТА НЕОРГАНІЧНИХ СОЛЕЙ МЕТАЛІВ

DOI: 10.30890/2709-2313.2021-07-08-015

1.1. Modern scientific issues of creation and use of binders

Binders are used in many fields of technology, such as construction, chemical, paint and varnish, mechanical engineering and instrumentation. They have also found their purpose in the medical and food industries. At the same time, metallurgy, foundry production and production of refractories have a significant advantage in terms of specific consumption of binders [1-4].

According to official data, today it is necessary to use 7…8 tons of auxiliary (molding) materials for the production of one ton of foundry products, part of which are binders [1, 5-8]. Prospects for the development of foundry production and mechanical engineering, which in many countries of the world form the main part of the state budget and regulate economic processes, depend on their properties, quality, and environmental friendliness.

Since the early 90's of the twentieth century, the leading place in foundry technology has been occupied by sand-resin molding and core mixtures of both cold and thermal hardening. Binders in them are urea, phenol-formaldehyde and furan resins [1, 2, 5]. In many countries around the world, the production of resin binders has been discontinued due to high environmental threats to the components (phenol, formaldehyde, furfural, etc.). Therefore, recently the search for new technical solutions based on the use of inorganic binders has become relevant.

One of the main directions in the search for new inorganic binders is the study of phosphate materials. They are a large group of compounds that can be obtained in finished form or by chemical synthesis from non-deficient and environmentally friendly components. The problems of creating phosphate binders were studied by prominent scientists: W. D. Kingery [9], D. Wygant [10], V. F. Zhuravlyov [11], M. M. Sychov [12], L. G. Sudakas [13, 14], V. A. Kopeikin [4] and others. Investigations of molding and core mixtures with binder components were carried out in the works of Yu. P. Vasin [15], E. S. Gamov [16], S. S. Zhukovsky [17], I. E. Illarionov [18, 19], S. P. Doroshenko [20].

The scientific basis for the synthesis of phosphates from oxide materials is quite clear, but not fully disclosed in some areas. This hinders the development of new types of binders, particularly for molds and cores. To date, there is no description of the laws of physicochemical processes of interaction of orthophosphoric acid with inorganic salts of sulfuric, hydrochloric, nitric, carbonic and other acids. There are no regularities in the formation of phosphates of active metals (elements of groups I and II of the periodic table), which have binding properties, there is no data on the dynamics of their transformations during heating. Information on the mutual

conversions of phosphates and sodium polyphosphates and the comparison of their binding properties is fragmentary.

1.2. The aim and objectives of the study

The aim of the study is to establish the laws of physicochemical interaction of the most common inorganic metal salts with orthophosphoric acid and to study the binding properties of synthesized products.

Research objectives:

1. Qualitative analysis of the processes that occur during the interaction of orthophosphoric acid with inorganic metal salts.
2. Calculation and analysis of thermodynamic parameters of orthophosphoric acid interaction processes with inorganic metal salts at different temperatures.
3. Establishing the influence of side physicochemical processes (hydration, dehydration, hydrolysis, thermal decomposition) on the interaction of inorganic salts with orthophosphoric acid.
4. Establishment of phase and mineralogical composition of products synthesized in the studied systems.
5. Research of the binding potential of synthesized products by determining the strength of samples based on granular quartz filler.
6. Research of the dynamics of transformations of synthesized phosphate binders components when heated to 1000 °C.

1.3. Method of experiments and calculations

Binders based on a combination of inorganic metal salts and orthophosphoric acid have not yet been developed. The general chemical scheme by which this process could take place, in a simplified form can be represented as follows:

$$Me_x(AR)_y + H_3PO_4 = Me_3(PO_4)_y + H_x(AR),$$
$$\text{or } Me_x(AR)_y + H_3PO_4 = Me_3(PO_4)_y \cdot nH_2O + \text{gas}, \quad (1)$$

where Me – metal;
AR – acid residue;
x, y – valence of acid residue and metal.

The most common acid residues are SO_4; SO_3; NO_3; Cl, as well as PO_4. Phosphates $Me_3(PO_4)_y$ or their crystal hydrate form $Me_3(PO_4)_y \cdot nH_2O$, usually have binding properties.

Acid H_3PO_4 is weaker than H_2SO_4; H_2SO_3; HCl; HBr and HNO_3, and from this point of view the passage of reactions (1) is impossible.

If an insoluble salt or gaseous product is formed in the right part of the reaction, the weak acid can displace the strong one from its salts, provided that the strong acid salt is water-soluble.

Phosphates are mostly insoluble, with the exception of sodium phosphate and, according to some data [21], sparingly soluble magnesium phosphate. Therefore, the probability of exchange reactions (1) exists. After that their thermodynamic

possibility comes to the fore.

The thermodynamic possibility of interaction of orthophosphoric acid with inorganic metal salts was evaluated by the calculated values of the isobaric-isothermal potential (Gibbs energy) for each chemical reaction. The reaction potential was determined at different temperatures from 20 to 300 °C, or from 293 to 573 K.

Two formulas can be used to find the isobaric-isothermal reaction potential when the temperature rises. The first of them takes into account the dependence of heat capacity on temperature (using virial coefficients a, b, c). However, these coefficients for the vast majority of reagents (including aluminum salts) are not listed in the literature [22-24 and others]. In addition, the heating of the samples in our case is relatively insignificant, and therefore the dependence of heat capacity on temperature can be neglected. Based on this, the formula is used in the calculations:

$$\Delta G_T = \Delta H^0_{298} - T \cdot S^0_{298} + \Delta C^{\,0}_{p\,298}(T - 298) - \Delta C^{\,0}_{p\,298} \cdot T \cdot \ln\frac{T}{298}, \qquad (2)$$

where ΔG_T – change of isobaric-isothermal potential (Gibbs energy), J/mol;

ΔH^0_{298} – standard enthalpy, J/mol;

T – temperature, K;

S^0_{298} – standard entropy, J/(mol·K);

ΔC_p – heat capacity, J/(mol·K).

Based on the results of calculations, a conclusion was made about the thermodynamic probability of the studied reactions.

Cylindrical specimens (Fig. 1) with a diameter and height of 50 mm were made to assess the binding potential of the synthesized phosphate or complex materials. Such samples are a standard test for the strength of molding and core mixtures in foundry production.

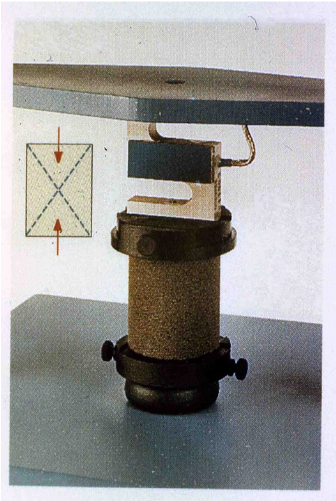


Fig. 1 – Standard cylindrical sample for compressive strength test

The mixture from which the samples were made, included a granular quartz filler, the particle size distribution of which is shown in table 1.

 ISBN 978-3-949059-44-5

Table 1 – Particle size distribution of quartz sand

The size of quartz particles, mm	2.5	1.6	1.0	0.63	0.4	0.315	0.2	0.16	0.1	0.063	0.05	<0.05
Percentage, %	0.0	0.0	0.0	2.5	10.9	15.7	36.3	21.5	8.5	3.1	0.5	1.0

Samples were made from mixtures according to the following two options:

1. Granular quartz filler (92.0% by weight), orthophosphoric acid (3.0% by weight), inorganic metal salt (3.0% by weight), water (2.0% by weight) – the graphs show as "acid + name of inorganic salt".

2. Granular quartz filler (90.0% by weight), pre-prepared binder composition (5.0% by weight) and water (5.0% by weight) are shown on the graphs as "binder composition". This name refers to a dry composition prepared by pre-mixing 1 mass part of orthophosphoric acid and 5 mass parts of inorganic metal salt, followed by exposure for 1 hour at a temperature of 200 °C (473 K).

Technical orthophosphoric acid in the form of an 85% solution was used in all experiments.

The compressive strength of the samples was determined on a specialized unit "УС-700" after exposure to 24 hours at normal temperature and after drying for 1 hour at temperatures from 100 to 200 °C (from 373 to 473 K). In some cases, after the analysis of physicochemical processes, additional experiments were performed at temperatures up to 300 °C (573 K).

Strengths less than 1.0 MPa were considered unsatisfactory, as this is not enough for any practical application.

1.4. Qualitative analysis of the chemical interaction of inorganic salts with orthophosphoric acid

To conduct a qualitative study, inorganic metal salts in the amount of 5 mass parts with orthophosphoric acid in the amount of 1 mass part were mixed. The total weight of each sample was 20 g.

To the thus obtained samples were added 5 ml of water to convert them to a liquid state, and then monitored the behavior of the compositions at normal temperature for 5 hours.

Similar portions of each mixture were subjected to pre-heat treatment (150… 200 °C or 423…473 K). Then 5 ml of water was added and the behavior of each of them at normal temperature for 5 hours was studied.

The results of the observations are presented in table 2. The hardening of the compositions was determined visually as well as with a sharp object (their conditional strength was controlled with a needle with a diameter of 1 mm). If the sample remained wet or became crumbly after the water evaporated, the absence of any binding properties was recorded (0). If the sample did not fall apart, but visually did not have strength – 1. Low conditional strength was estimated at 2 points, medium strength – 3 points, high strength – 4 points. High conditional strength – the sample is almost not susceptible to abrasive effects, was rated 5 points.

Table 2 – The results of the interaction of orthophosphoric acid with inorganic metal salts

Pos. ind.	The main substance of the sample	Processes after mixing with H_3PO_4	Conditional strength of the samples after the addition of water and exposure, score	
			in the initial state	heat treated at 423…473 K
1	Li_2SO_4	without visible reaction	0	1
2	Na_2SO_3	gas evolution, pungent odor	1	4
3	$Na_2S_2O_5$	gas evolution, pungent odor	1	4
4	$Na_2S_2O_8$	gas evolution, pungent odor	0	1
5	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	without visible reaction	0	1
6	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	without visible reaction	0	1
7	$CoSO_4 \cdot 7H_2O$	changed the color to burgundy	0	1
8	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	without visible reaction	0	1
9	$MnSO_4 \cdot 5H_2O$	without visible reaction	0	2
10	KCl	without visible reaction	0	1
11	KBr	without visible reaction	0	2
12	NaCl	without visible reaction	0	3
13	$CaCl_2 \cdot 4H_2O$	heating, pungent odor	0	3
14	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	without visible reaction	0	1
15	$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	pungent odor	1	4
16	$NiCl_2 \cdot 6H_2O$	gas evolution, pungent odor	0	1
17	$BaCl_2$	without visible reaction	0	1
18	$NaNO_3$	without visible reaction	0	1
19	$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	without visible reaction	2	5
20	$Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$	without visible reaction	0	1
21	$Sr(NO_3)_2$	without visible reaction	0	1
22	$Ba(NO_3)_2$	without visible reaction	0	1
23	Li_2CO_3	active reaction	0	1
24	Na_2CO_3	active reaction	1	1
25	$NaHCO_3$	active reaction	1	1
26	$CaCO_3$	slight heating	2	1
27	$BaCO_3$	without visible reaction	1	1

1.5. Synthesis of phosphate binders using sulfuric acid salts

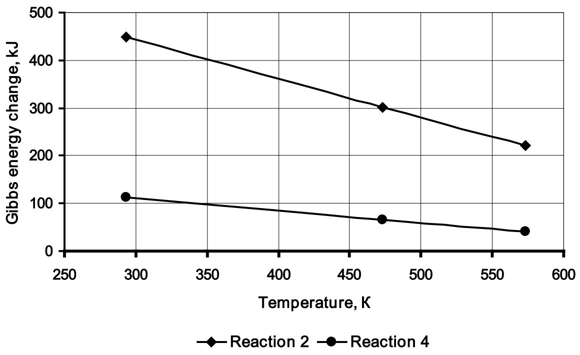
Sulfuric acids are stronger than orthophosphoric acid, and therefore from a chemical point of view, only those reactions are possible, as a result of which insoluble phosphates are formed. The materials used in this work are salts of various acids: sulfuric H_2SO_4, H_2SO_3, and mixed or complex salts with anions (SO_2SO_3), (S_2O_8).

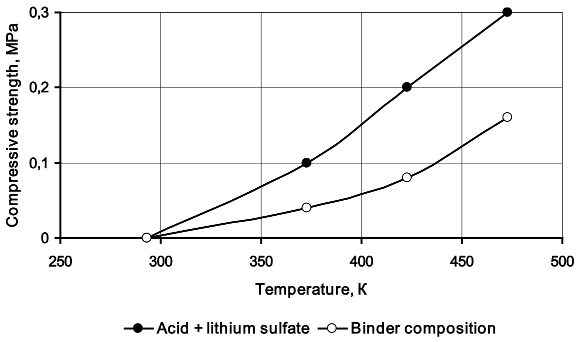
Salts of sulfuric acid are subject to hydrolysis by anion. Many sulfates have stable crystal hydrate forms. These factors are taken into account when analyzing the processes in the studied systems.

Thermodynamic calculations for chemical reactions of orthophosphoric acid interaction with a number of sulfate salts are performed and their results are analyzed.

The following reactions (2)…(4) were analyzed for **lithium sulfate Li_2SO_4**. Thermodynamic characteristics of the reactions are shown in Fig. 2 (a):

$$3\ Li_2SO_4 + 2\ H_3PO_4 \rightarrow 2\ Li_3PO_4 + 3\ H_2O\uparrow + 3\ SO_3\uparrow \quad (2)$$
$$Li_2SO_4 + H_3PO_4 \rightarrow Li_2HPO_4 + H_2O\uparrow + SO_3\uparrow \quad (3)$$
$$Li_2SO_4 + 2\ H_3PO_4 \rightarrow 2\ LiH_2PO_4 + H_2O\uparrow + SO_3\uparrow \quad (4)$$





a **b**

Fig. 2 – Gibbs energy change in the range from 293 to 573 K for the reactions of interaction of lithium sulfate with orthophosphoric acid (a) and the compressive strength of samples (b)

Lithium sulfate is not prone to hydration and hydrolysis. Therefore, no other processes can occur except reactions (2)…(4). It is thermodynamically established that these reactions are impossible (Fig. 2, a), and, consequently, the phosphate binder is not formed in this system. This is also confirmed by the data of the previous experiment (see Table 2). Hardening of the mixture with this system almost does not occur (Fig. 2, b).

However, the numerical strength of the samples indicates that the binder in the mixture is still present. There are two reasons for this. First, lithium sulfate has its own binding capacity. Secondly, orthophosphoric acid interacts with quartz (filler mixture) when heated. This has been confirmed by the authors [4, 14], in particular in our publications [25-27]. However, heating up to 573 K is required for the interaction of the acid with quartz, so the formation of silicon phosphate in this case is only partial. Therefore, the strength of the investigated samples is due to lithium sulfate and partly silicon phosphate. However, the result of 0.3 MPa is obviously insufficient.

Reactions (5)...(7) were analyzed for **sodium sulfite Na_2SO_3**. The thermodynamic characteristics of these reactions are shown in Fig. 3 (a).

$$3\ Na_2SO_3 + 2\ H_3PO_4 \rightarrow 2\ Na_3PO_4 + 3\ H_2O\uparrow + 3\ SO_2\uparrow \quad (5)$$
$$Na_2SO_3 + H_3PO_4 \rightarrow Na_2HPO_4 + H_2O\uparrow + SO_2\uparrow \quad (6)$$
$$Na_2SO_3 + 2\ H_3PO_4 \rightarrow 2\ NaH_2PO_4 + H_2O\uparrow + SO_2\uparrow \quad (7)$$

Sodium sulfite is a salt of sulfuric acid that is slightly stronger than orthophosphoric acid. It is thermodynamically established that the chemical reaction of sodium phosphate formation is possible at any temperature, including under normal conditions. A previous experiment (see Table 2) showed the release of gas with a pungent odor. According to official sources, it is SO_2. Thus, the main process

in the system is the formation of sodium phosphate.

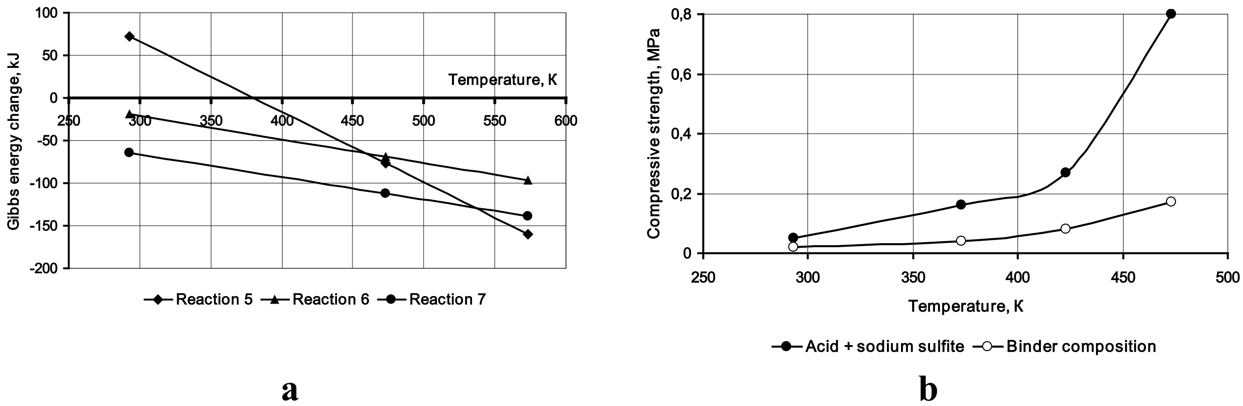


Fig. 3 – Gibbs energy change in the range from 293 to 573 K for the reactions of sodium sulfite with orthophosphoric acid (a) and compressive strength of samples (b)

However, a satisfactory strength index could not be achieved (Fig. 3, b). Complete conversion of sodium sulfite to its phosphates in the first sample (acid + sodium sulfite) is possible, taking into account the mass ratios of chemical reactions (5)…(7). This should form a mixture of acidic sodium phosphates with a small amount of trisubstituted orthophosphate. These compounds provide an increase in strength in Fig. 3 (b). The effect of temperature is explained by the fact that the curing of the composition with water-soluble sodium phosphates requires the removal of moisture. In the second sample (binder composition), the maximum amount of sodium sulfite that can react is 37%, the rest remains in the original state. The strength of the samples is much lower, because they are dominated by sodium sulfite, rather than its phosphates.

Sodium pyrosulfite $Na_2S_2O_5$ is a mixed salt of sulfuric acids (H_2SO_4, H_2SO_3). It is less stable and emits SO_2 gas when heated to 338 K, melts at 423 K and decomposes completely at 575 K [28]. There are no reliable data on the thermodynamic characteristics of sodium pyrosulfite, so no analysis of its chemical reactions with orthophosphoric acid was performed.

According to the previous experiment (see Table 2), the evolution of gas in the process of mixing this salt with acid indicates the passage of a chemical reaction, which results in the formation of one of the sodium phosphates. Significant hardening of the samples (Fig. 4), compared with the samples of the second sample, in which there is a significant amount of residual sodium pyrosulfite, confirms the formation of sodium phosphates.

Similar processes, according to sample observations (see Table 2), occur in the system with **sodium persulfate $Na_2S_2O_8$**. It is a salt of sulfuric acid, but less stable and prone to decomposition. However, the decomposition apparently occurs only partially (before the formation of ordinary sodium sulphate Na_2SO_4). Since data on the thermodynamic parameters of sodium persulfate are also not available, it is not possible to analyze the Gibbs energy change for its reactions with acid. Indirect evidence of the formation of sodium phosphates in this system are the results obtained in Fig. 5.

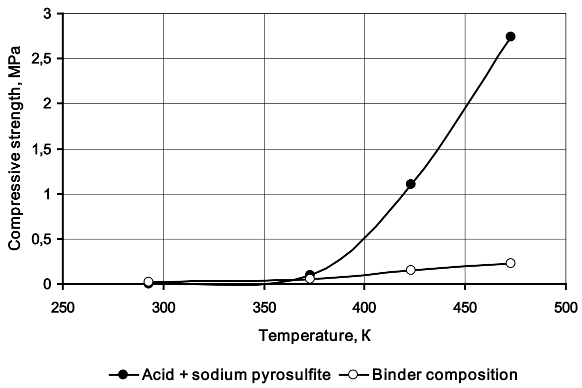


Fig. 4 – Dependence of compressive strength of samples of a mixture with orthophosphoric acid and sodium pyrosulfite on temperature

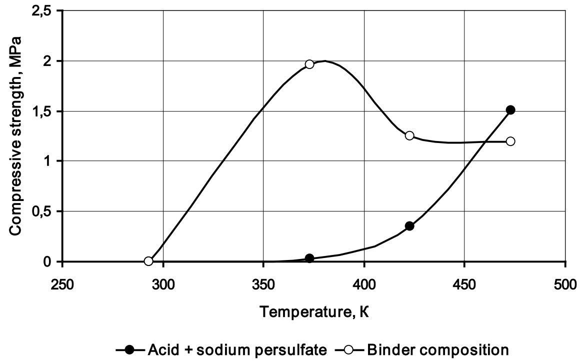


Fig. 5 – Dependence of the compressive strength of samples of a mixture with orthophosphoric acid and sodium persulfate on temperature

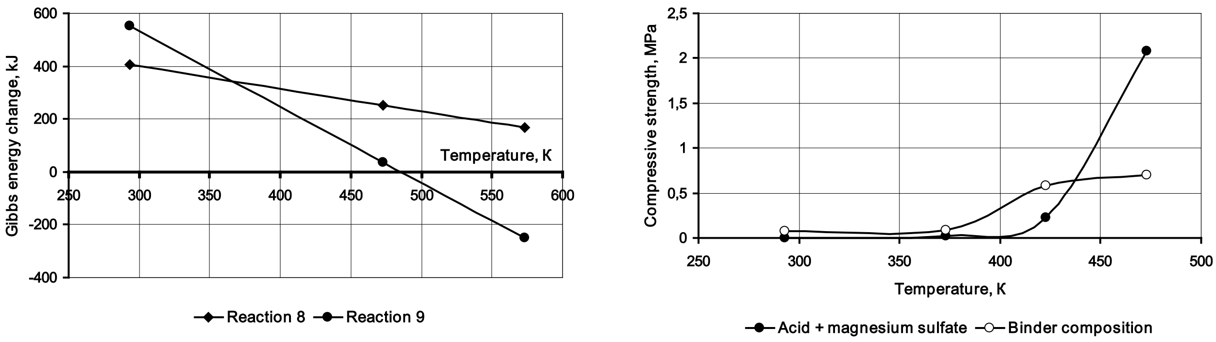
The process of phosphate formation occurs at a temperature of about 473 K, because this temperature compared to others provides a significant strengthening of the samples. The second sample consists of a binder composition treated at 473 K. It obviously contains water-soluble sodium phosphates. Hardening of the sample is due to the removal of moisture at a temperature of 373…423 K.

Reactions (8) and (9) were analyzed for **magnesium sulfate $MgSO_4$**. Thermodynamic characteristics of the reactions are shown in Fig. 6 (a).

$$3\ MgSO_4 + 2\ H_3PO_4 \rightarrow Mg_3(PO_4)_2 + 3\ H_2O + 3\ SO_3\uparrow \quad (8)$$

$$3\ [MgSO_4 \cdot 7H_2O] + 2\ H_3PO_4 \rightarrow Mg_3(PO_4)_2 + 24\ H_2O + 3\ SO_3\uparrow \quad (9)$$

Magnesium sulfate is a salt of a strong acid. Crystalline heptahydrate magnesium sulfate was used in the research. At a temperature of 473 K and more, as shown in the graphs in Fig. 6 (a), it must interact with orthophosphoric acid by reaction (9). Since this salt is not subject to hydrolysis and has a high thermal stability (decomposition temperature 1410 K) [28], this system really should form a phosphate binder component. These conclusions are confirmed by the properties of the samples of the mixture. The figures are very low up to a temperature of 473 K. The samples have a strength of 2.1 MPa when it is reached (Fig. 6, b).



a **b**

Fig. 6 – Gibbs energy change in the range from 293 to 573 K for the reactions of interaction of magnesium sulfate with orthophosphoric acid (a) and compressive strength of samples (b)

The mass ratio of components for chemical reaction (9) and reactions of formation of acidic magnesium phosphates is analyzed, since the probability of their formation is also high:

$$MgSO_4 \cdot 7H_2O + H_3PO_4 \rightarrow MgHPO_4 + 8\ H_2O + SO_3 \uparrow \quad (10)$$

$$MgSO_4 \cdot 7H_2O + 2\ H_3PO_4 \rightarrow Mg(H_2PO_4)_2 + 8\ H_2O + SO_3 \uparrow \quad (11)$$

The mass ratio of magnesium sulfate to acid in reaction (9) is 3.2:1, in reaction (10) – 2.15:1, in reaction (11) – 1.05:1. Thus, in the first sample, the ratio is closest to the formation of monosubstituted magnesium phosphate $Mg(H_2PO_4)_2$. According to researchers [10-14], acidic phosphates of metals have a much higher binding potential.

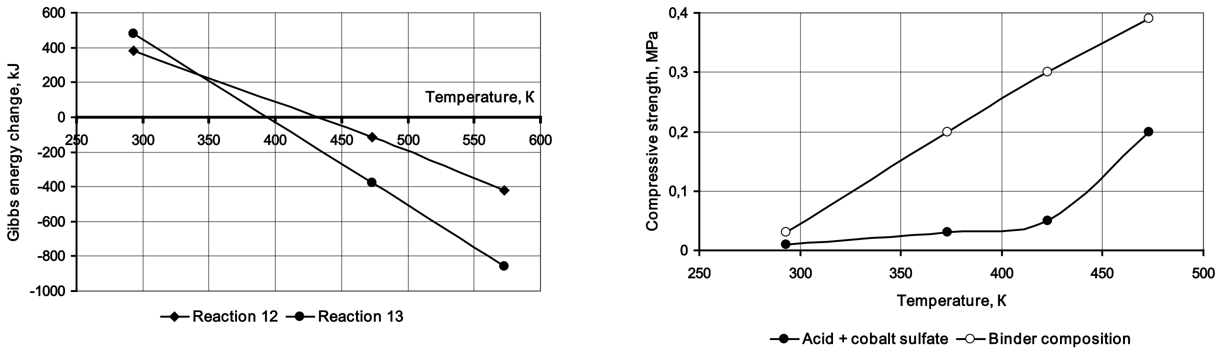
The mixture with the binder composition does not provide sufficient strength. First, this is due to the fact that it has already undergone a partial conversion of magnesium sulfate to phosphate. Magnesium phosphate is poorly soluble in water and therefore does not form adhesive bonds when mixed with quartz filler. Second, the estimated amount of magnesium sulfate that reacted is not more than 64%, and the rest is residual magnesium sulfate. The calculation also shows that trisubstituted magnesium phosphate is formed in this sample. Its binding potential is much lower, which leads to a much lower value of strength (Fig. 6, b).

Comparison of thermodynamic data (Fig. 6, a) and the results of control of the strength of samples (Fig. 6, b) lead to a fundamental scientific conclusion: **It has been established that the replacement of a strong acid salt with its crystal hydrate analogue can be a theoretical basis for the synthesis of a phosphate binder.**

Reactions (12)…(13) were analyzed for **cobalt sulfate $CoSO_4$**. Thermodynamic characteristics of the reactions are shown in Fig. 7 (a).

$$3\ CoSO_4 + 2\ H_3PO_4 \rightarrow Co_3(PO_4)_2 + 3\ H_2O \uparrow + 3\ SO_3 \uparrow \quad (12)$$

$$3\ [CoSO_4 \cdot 7H_2O] + 2H_3PO_4 \rightarrow Co_3(PO_4)_2 + 24H_2O\uparrow + 3SO_3\uparrow \quad (13)$$



a b

Fig. 7 – Gibbs energy change in the range from 293 to 573 K for the reactions of interaction of cobalt sulfate with orthophosphoric acid (a) and compressive strength of samples (b)

Cobalt sulfate is a much less stable chemical compound than the sulfates previously discussed. Heptahydrate cobalt sulfate at 314…316 K turns into hexahydrate, at 344 K – into monohydrate and in the range of 523…693 K completely loses crystal hydrate water [29]. In addition, cobalt sulfate is prone to cation hydrolysis. This can result in the formation of cobalt hydroxide, which is also able to react with acid.

The thermodynamic possibility of reactions has been proven with any form of cobalt sulfate. According to the graphs in Fig. 7 (a), the interaction can begin as early as 373…423 K. As a result, insoluble in water cobalt phosphates can be formed – anhydrous, octagonal (there is up to 413 K) dihydrate (there is up to 873 K). These phosphates are purple, and this is the color of the sample of the binder and samples of the core mixture.

Additionally, the chemical reactions of formation of cobalt acid phosphates were analyzed and it was established that for reaction (13) the ratio of cobalt sulfate to acid should be 3.65 : 1, for reaction (14) – 2.45 : 1, for reaction (15) – 1.21 : 1.

$$CoSO_4 \cdot 7H_2O + H_3PO_4 \rightarrow CoHPO_4 + 8H_2O\uparrow + SO_3\uparrow \quad (14)$$

$$CoSO_4 \cdot 7H_2O + 2H_3PO_4 \rightarrow Co(H_2PO_4)_2 + 8H_2O\uparrow + SO_3\uparrow \quad (15)$$

After analyzing the chemical reactions of heptahydrate cobalt sulfate with orthophosphoric acid, it was found that in the first sample (acid + cobalt sulfate) the conversion of sulfate to cobalt phosphate can be completed, and in the second sample (binder composition) only 73% of sulfate can react. Acidic phosphates are formed, so they have increased binding capacity. However, the overall strength remains low.

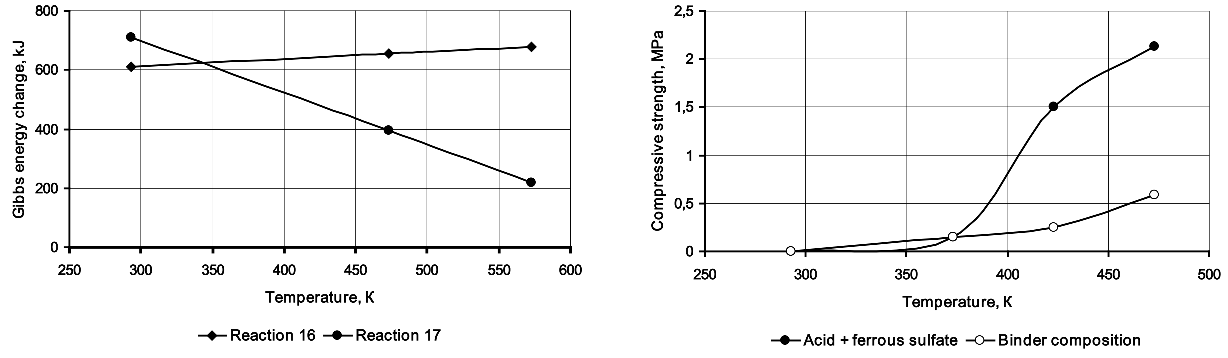
Reactions (16)…(17) were analyzed for **ferrous sulfate $FeSO_4$**. The thermodynamic characteristics of these reactions are shown in Fig. 8 (a).

$$3\ FeSO_4 + 2\ H_3PO_4 \rightarrow Fe_3(PO_4)_2 + 3\ H_2O\uparrow + 3\ SO_3\uparrow \quad (16)$$

$$3\ [FeSO_4 \cdot 7\ H_2O] + 2\ H_3PO_4 \rightarrow Fe_3(PO_4)_2 + 24\ H_2O\uparrow + 3\ SO_3\uparrow \quad (17)$$

Ferrous sulfate is used in crystal hydrate heptahydrate form. Thermodynamic analysis showed that none of the reactions of formation of iron phosphate from its sulfate is possible. Even significant heating (573 K or more) will not contribute to the formation of the binder component in this system. However, ferrous sulfate can be

hydrolyzed by the cation to form hydroxosulfate $[Fe(OH)]_2SO_4$ or even hydroxide $Fe(OH)_2$ [28]. In a mixture containing water, this process is possible. Iron hydroxide, in turn, can react with orthophosphoric acid to form iron phosphate.



a **b**

Fig. 8 – Gibbs energy change in the range from 293 to 573 K for the reactions of interaction of ferrous sulfate with orthophosphoric acid (a) and compressive strength of samples (b)

It is obvious that in the temperature range of 423…473 K such a chemical process of interaction of the formed iron hydroxide with acid takes place, which ultimately provides high strength (Fig. 8, b). The calculation of the mass ratios of the components, taking into account the reaction of hydrolysis of ferrous sulfate (18) and subsequent formation of phosphates (19)…(21), showed that in the first sample (acid + ferrous sulfate) in excess acid (less than 80% acid reacts), and in the second sample (binder composition) there is an excess of iron sulfate (no more than 72% of it reacts).

$$FeSO_4 \cdot 7\,H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + H_2\,SO_4 \uparrow + 5\,H_2O \quad (18)$$

$$3\,Fe(OH)_2 + 2\,H_3PO_4 \rightarrow Fe_3(PO_4)_2 + 6\,H_2O \quad (19)$$

$$Fe(OH)_2 + H_3PO_4 \rightarrow FeHPO_4 + 2\,H_2O \quad (20)$$

$$Fe(OH)_2 + 2\,H_3PO_4 \rightarrow Fe(H_2PO_4)_2 + 2\,H_2O \quad (21)$$

The relatively low strength of the pre-prepared binder composition is due to the fact that all ferrous phosphates are insoluble in water and do not provide the formation of adhesive bonds with the quartz filler. In addition, trisubstituted iron phosphate has a lower binding potential compared to acidic phosphates, the formation of which is typical for the first mixture, the strength of which is much higher (Fig. 8, b).

Comparison of thermodynamic data from Fig. 8 (a) and the results of the strength control of the samples (Fig. 8, b) lead to another fundamental conclusion: **It has been established that salts of strong acids and transition metals can interact with orthophosphoric acid in a stepwise scheme – hydrolysis by cation with subsequent formation of phosphates, which is the scientific basis for the synthesis of phosphate binders.**

Reactions (22)...(23) were analyzed for **manganese sulfate $MnSO_4$**. Thermodynamic characteristics of the reactions are shown in Fig. 9 (a).

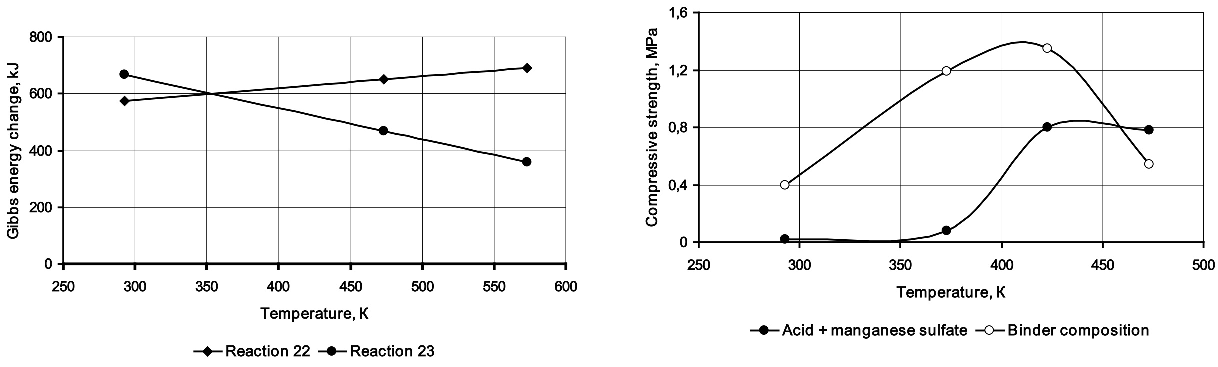
$$3\,MnSO_4 + 2\,H_3PO_4 \rightarrow Mn_3(PO_4)_2 + 3\,H_2O \uparrow + 3\,SO_3 \uparrow \quad (22)$$

$$3\,[MnSO_4 \cdot 5\,H_2O] + 2\,H_3PO_4 \rightarrow Mn_3(PO_4)_2 + 18H_2O\uparrow + 3SO_3\uparrow \quad (23)$$

Manganese sulfate is used in the crystal hydrate pentahydrate form. This salt also cannot thermodynamically react with orthophosphoric acid. However, it, like ferrous sulfate, is hydrolyzed to form $Mn(OH)_2$ hydroxide by the reaction:

$$MnSO_4 \cdot 5\,H_2O \rightarrow Mn(OH)_2 + H_2\,SO_4\uparrow + 3\,H_2O \quad (24)$$

Manganese hydroxide, in turn, is able to interact with orthophosphoric acid and form phosphates. Manganese phosphates are water-soluble (especially monosubstituted $Mn(H_2PO_4)_2$). In addition, they are more prone to hydration. This is indicated by the fact that in the previous experiment (see Table 2) the sample with manganese sulfate has a higher conditional strength than the sample with ferrous sulfate.



a b

Fig. 9 – Gibbs energy change in the range from 293 to 573 K for the reactions of interaction of manganese sulfate with orthophosphoric acid (a) and compressive strength of samples (b)

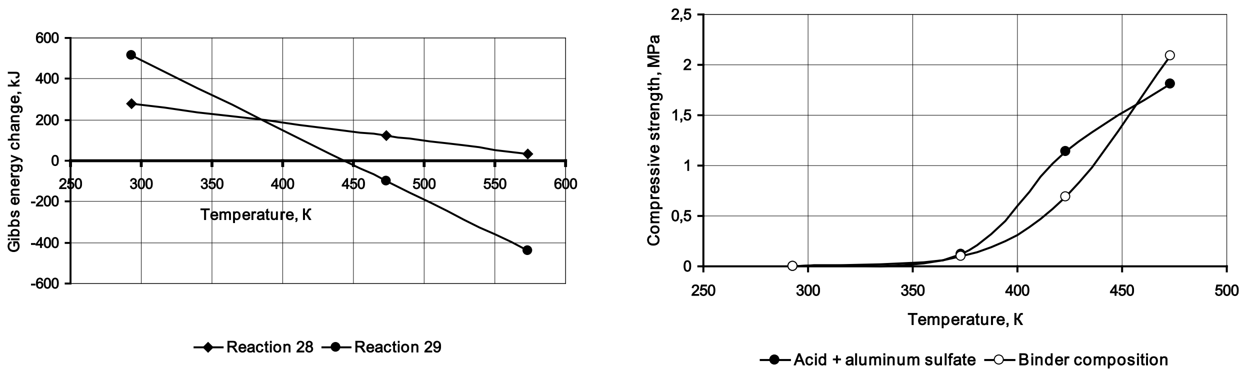
Mixtures with a binder composition have better strength than with individual components (Fig. 9, b). After aging in the oven, the composition changed its color from pink, inherent in manganese sulfate, to light gray. Apparently, acidic manganese phosphates have formed here, which have a high binding potential. However, the recalculation of the mass ratios for the hydrolysis reactions and the subsequent formation of phosphates (25)…(27) indicates that no more than 62% of manganese sulfate will react.

$$3\,Mn(OH)_2 + 2\,H_3PO_4 \rightarrow Mn_3(PO_4)_2 + 6\,H_2O \quad (25)$$
$$Mn(OH)_2 + H_3PO_4 \rightarrow MnHPO_4 + 2\,H_2O \quad (26)$$
$$Mn(OH)_2 + 2\,H_3PO_4 \rightarrow Mn(H_2PO_4)_2 + 2\,H_2O \quad (27)$$

A significant amount of manganese sulfate remains in the sample, which obviously has a better binding capacity than phosphate, and therefore provided a higher strength index. This is indicated by the fact that the strength of the mixtures with the first sample is less. According to the calculation of mass ratios in this case, manganese phosphate is completely formed.

The following reactions (28)…(29) were analyzed for **aluminum sulfate $Al_2(SO_4)_3$**. Thermodynamic characteristics of the reactions are shown in Fig. 10 (a).

$$Al_2(SO_4)_3 + 2\,H_3PO_4 \rightarrow 2\,AlPO_4 + 3\,H_2O\uparrow + 3\,SO_3\uparrow \quad (28)$$
$$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O + 2\,H_3PO_4 \rightarrow 2\,AlPO_4 + 21\,H_2O\uparrow + 3\,SO_3\uparrow \quad (29)$$



a **b**

Fig. 10 – Gibbs energy change in the range from 293 to 573 K for the reactions of interaction of aluminum sulfate with orthophosphoric acid (a) and compressive strength of samples (b)

Aluminum sulfate is used in the form of eighteenhydrous crystal hydrate. It was found that, as for other sulfate materials, the crystal hydrate is more active, and this activity depends on the number of moles of water. Anhydrous aluminum sulfate cannot react with orthophosphoric acid in the considered temperature range. Eighteenhydrous sulfate is able to interact when heated in the range of 423…473 K. In addition, aluminum sulfate is prone to hydrolysis by cation, which results in the formation of hydroxide $Al(OH)_3$. Such hydroxide at a temperature of about 373 K can react with acid. This is the basis for the preparation of well-known aluminum-phosphate and other complex binder components [3, 4, 14, 30, 31].

In the temperature range 423…473 K the samples of the mixture are harden. Regardless of the method of preparation, approximately the same result is achieved. From the analysis of Fig. 10 (b), it should be assumed that the strength of the mixtures can be determined by both sulfate and phosphate of aluminum, because the strength of mixtures with both samples gives the same results.

X-ray phase analysis was performed to determine the composition of the products of interaction between the components. The object of the research is a composition of 10 mass parts of aluminum sulfate $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ and 1 mass part of orthophosphoric acid. After mixing, the sample was kept in an oven at 473 K for 1 hour. The diffractogram of the composition is shown in Fig. 11.

A number of new phases have been identified in the composition. In particular, the actual aluminum sulfate $Al_2(SO_4)_3 \cdot 16.4H_2O$ was identified, which differs from the original sulfate $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ by the number of moles of crystal hydrate water. Two types of phosphates and aluminum hydroxide were also found. Therefore, the role of the binder component here is obviously performed by both aluminum phosphates and its sulfate, which predominates in the sample.

Based on the obtained results, the analysis of the kinetics of transformations that led to the formation of the specified phase composition was performed.

At the first stage there was a partial decomposition of crystal hydrate aluminum sulfate. In article [32] all forms of existence of crystal hydrates of this salt are investigated and it is shown that 16.4-hydrous sulfate really exists, and separation of 18 moles of crystal hydrate water occurs gradually in a wide range of temperatures – from 356.5 K to 713 K.

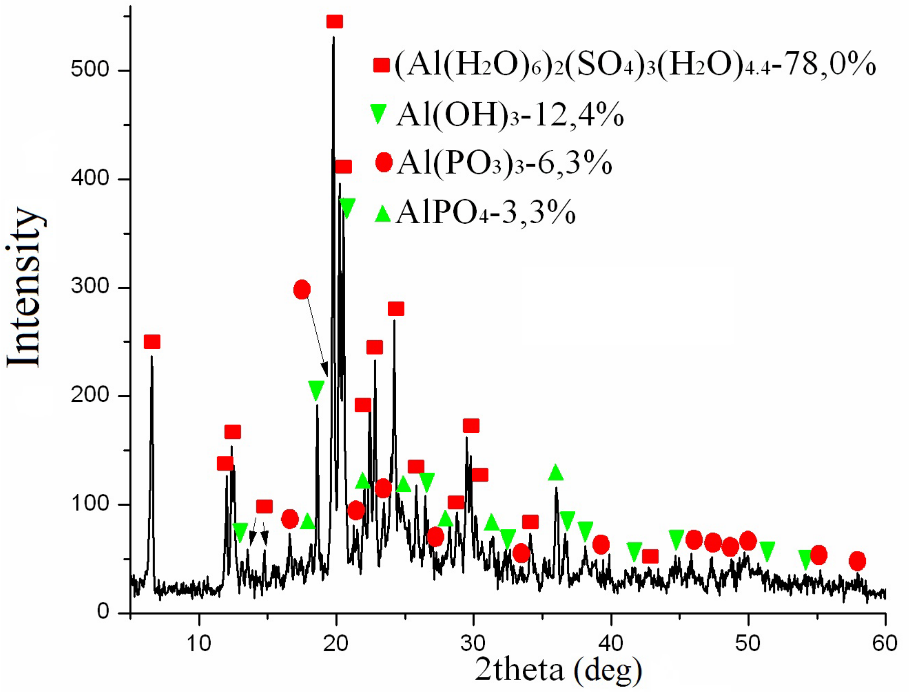


Fig. 11 – X-ray phase analysis of the composition of eighteenhydrous aluminum sulfate (10 mass parts) with orthophosphoric acid (1 mass part) after heat treatment at 473 K

In our case, the chemical reaction is as follows:

$$2Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O \rightarrow Al_2(SO_4)_3 \cdot 16{,}4H_2O + 2Al(OH)_3 + 3SO_3 + 1{,}6H_2O \quad (30)$$

Using the molar masses of the components, it can be calculated that the decomposition of 1332 mass parts of 18-hydrous sulfate produces 637 mass parts of 16.4-hydrous sulfate and 210 mass parts of aluminum hydroxide.

Thus, it is scientifically established that **in the systems of sulfates of transition metals with orthophosphoric acid the formation of intermediate phases (hydroxides) is possible not by hydrolysis reactions, but due to partial thermal compounds that form phosphates at relatively low (423…473 K) temperatures.**

Aluminum sulfate does not interact with orthophosphoric acid, as established thermodynamically. However, the hydroxide can interact with it at a temperature of 363…383 K. The binders in the test sample are formed by reactions:

$$Al(OH)_3 + H_3PO_4 \rightarrow AlPO_4 + 3H_2O \quad (31)$$

$$Al(OH)_3 + 3H_3PO_4 \rightarrow Al(PO_3)_3 + 6H_2O \quad (32)$$

In the sample, the mass ratio of aluminum sulfate to acid is 10 : 1. Returning to the reaction (30), we find that we have 1332 mass parts of 18-hydrous sulfate account for 133 mass parts of acid, and taking into account its concentration – 112 mass parts of H_3PO_4. To complete the reaction (31) on 105 mass parts of hydroxide, 98 mass parts of H_3PO_4 are required. Therefore, the maximum amount of hydroxide that could react: $105 \cdot \frac{112}{98} = 120$ mass parts. At the same time there were 210 – 120 = 90 mass parts of hydroxide. Also by this reaction, the amount of aluminum orthophosphate

formed from 120 mass parts of aluminum hydroxide: $122 \cdot \frac{120}{105} = 140$ mass parts.

After transformations (30) and (31), the sample must contain 637 mass parts (or 73.5%) of 16.4-hydrous aluminum sulphate, 90 mass parts (or 10.4%) of aluminum hydroxide, 140 mass parts (or 16.1%) of aluminum orthophosphate.

In fact, two different phosphates were formed in the sample, so the reaction (32) should be analyzed. For its full implementation, 105 mass parts of hydroxide require 297 mass parts of acid, and taking into account its concentration – 350 mass parts of H_3PO_4, and we have only 133 mass parts of H_3PO_4. Therefore, only a part of the hydroxide could react: $105 \cdot \frac{133}{350} = 40$ mass parts. This left 210 – 40 = 170 mass parts of aluminum hydroxide. Also by this reaction instead of 264 mass parts of aluminum metaphosphate, formed from 40 mass parts of hydroxide: $264 \cdot \frac{40}{105} = 100$ mass parts of aluminum metaphosphate $Al(PO_3)_3$.

After transformations (30) and (32), the sample must contain 637 mass parts (or 70.2%) of 16.4-hydrous aluminum sulphate, 170 mass parts (or 18.7%) of aluminum hydroxide, 100 mass parts (or 11.0%) of aluminum metaphosphate.

The calculated composition of the sample is very close to that determined by phase analysis, so the analyzed chemical processes (30)-(32) fully reflect the formation of the binder in this system. Since the binder contains two types of inorganic salts, it should be assigned to a new class – phosphosulfate binder.

In order to study the dynamics of transformations of this binder component during heating, a differential thermogravimetric analysis of the same sample was performed (Fig. 12).

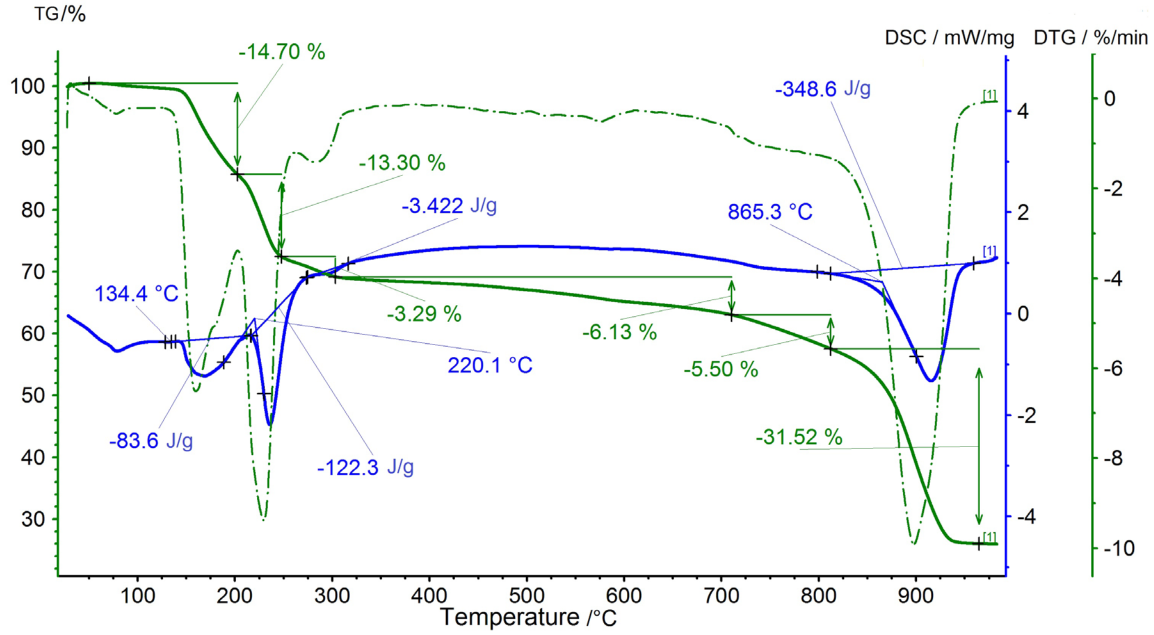


Fig. 12 – Differential thermogravimetric analysis of the composition of aluminum sulfate (10 mass parts) with orthophosphoric acid (1 mass part) after exposure at heat treatment of 473 K

Aluminum crystalline sulfate is gradually losing moles of bound water. This

process is two- or even three-stage (the graph shows two large endothermic effects and one effect with a small intensity of about 300 °C). In general, the process is expressed by the equation:

$$Al_2(SO_4)_3 \cdot 16{,}4H_2O \rightarrow Al_2(SO_4)_3 + 16{,}4H_2O\uparrow \tag{33}$$

According to the molar ratios of the components, we see that 637 mass parts of crystal hydrate sulfate forms 342 mass parts of anhydrous sulfate and 297 mass parts of H_2O. Given the phase composition of the investigated sample, in our case 780 mass parts of crystal hydrate aluminum sulfate forms 417 mass parts of anhydrous sulfate and 363 mass parts of H_2O. The release of H_2O from the total mass of the sample is 36.3%, and the total weight loss in Fig. 12 in the range up to 300 °C 14.7% + 13.3% + 3.3% = 31.3%, which is close to the calculated data.

Significant endothermic effect at a temperature of 865 °C is associated with thermal destruction of aluminum sulfate:

$$Al_2(SO_4)_3 \rightarrow Al_2O_3 + 3SO_3\uparrow \tag{34}$$

According to [33], this process should take place at a temperature of 580 °C. In our case, the binder is complex – phosphosulfate. Aluminum phosphate acts as a mineralizer, which significantly increases the decomposition temperature of the sulfate component.

According to the material balance of reaction (34) from 102 mass parts of aluminum sulfate should be formed 102 mass parts of aluminum oxide and should be released 240 mass parts of SO_3. In our sample, 417 mass parts of sulfate form 124 mass parts of Al_2O_3 and 293 mass parts of SO_3. The weight loss for the removal of the gaseous product is 29.3%, according to the DTG curve – 31.5%, this confirms the reaction (34).

Therefore, this system has been fully investigated and it has been established that binder is formed not by direct interaction of aluminum sulfate with acid, but due to the formation of aluminum hydroxide. It is a by-product of the partial decomposition of sulfate when heated.

Decomposition during heating of the binder component (aluminum sulfate) will lead to a significant decrease in strength at temperatures above 800 °C. The researched system is not suitable for use in refractory concretes, furnace linings and similar areas. However, the unique property of losing strength after heating makes it promising for molds and cores, because after pouring and crystallization of the metal should reduce the strength (ideally to zero) in order to reduce the work of removing castings from molds and cores from castings.

1.6. Synthesis of phosphate binders using salts of halogen acids

Halogen acids are stronger than orthophosphoric acid. This makes it impossible to chemically react this acid with halogen salts at normal temperature. However, thermodynamic calculations confirmed the possibility of phosphate formation when heated.

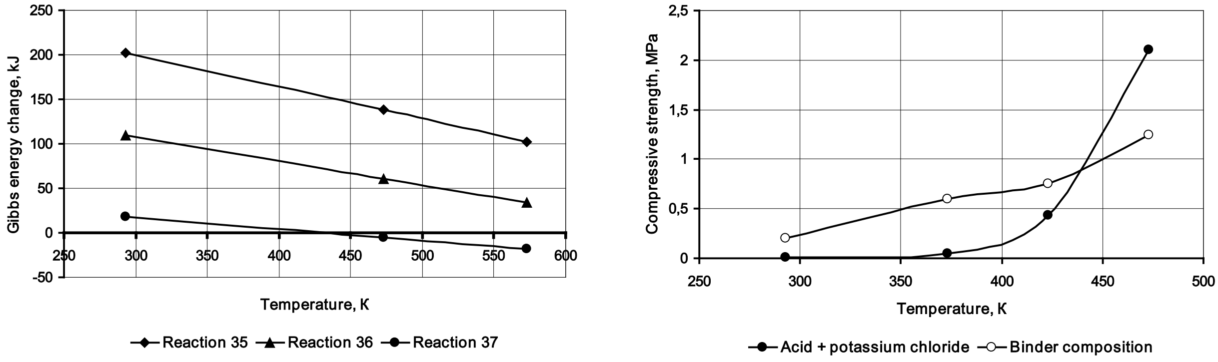
Reactions (35)…(37) were analyzed for **potassium chloride KCl**.

Thermodynamic analysis of reactions is shown in Fig. 13 (a).

$$3\ KCl + H_3PO_4 \rightarrow K_3PO_4 + 3\ HCl\uparrow \quad (35)$$

$$2\ KCl + H_3PO_4 \rightarrow K_2HPO_4 + 2\ HCl\uparrow \quad (36)$$

$$KCl + H_3PO_4 \rightarrow KH_2PO_4 + HCl\uparrow \quad (37)$$



a **b**

Fig. 13 – Gibbs energy change in the range from 293 to 573 K for the reactions of interaction of potassium chloride with orthophosphoric acid (a) and compressive strength of samples (b)

The most probable from a thermodynamic point of view is the formation of monosubstituted potassium orthophosphate by reaction (37), which can occur starting from a temperature of 473 K. Potassium chloride is not prone to hydrolysis, so we do not consider this possibility. Only direct chemical interaction in this system is possible. Analysis of the mass ratios of the reagents showed that in the first sample (acid + potassium chloride) due to excess acid should be formed acid phosphates by reactions (36) and (37). In the second sample (binder composition) with an excess of potassium chloride, the formation of phosphates is incomplete, and a maximum of 39% of the total amount of KCl reacts.

It has been experimentally confirmed that samples with H_3PO_4 and potassium chloride at a temperature of 473 K have high mechanical properties (Fig. 13, b). In the second sample, the strength is about twice as low due to excess potassium chloride, although it also reaches a minimum sufficient level of 1 MPa. Analysis of the data in Fig. 13 (a) showed that a temperature of 473 K is obviously sufficient for the formation of monosubstituted potassium phosphate. This temperature is not enough for the synthesis of other types of potassium phosphates. This position is confirmed by the results obtained in an additional experiment. The strength of the samples in the experiment was determined at temperatures exceeding 473 K (Fig. 14). The highest strength of the samples is observed in the temperature range 513…543 K.

Thus, a scientific conclusion is formulated: **In the system of potassium chloride and a number of other halogen salts (as confirmed below) with orthophosphoric acid, phosphate synthesis occurs by simple metabolic reactions, the possibility of which is determined solely by thermodynamic factor and heating temperature.** This result has not previously been achieved in orthophosphoric acid systems with compounds of group I metals due to their very high chemical activity.

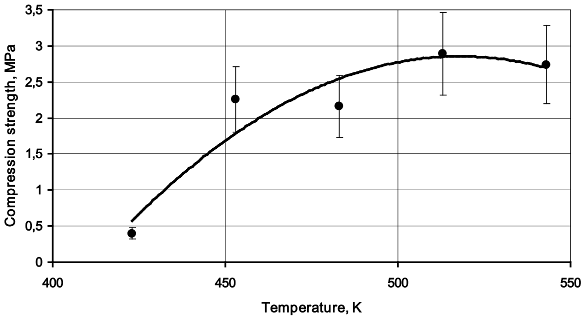
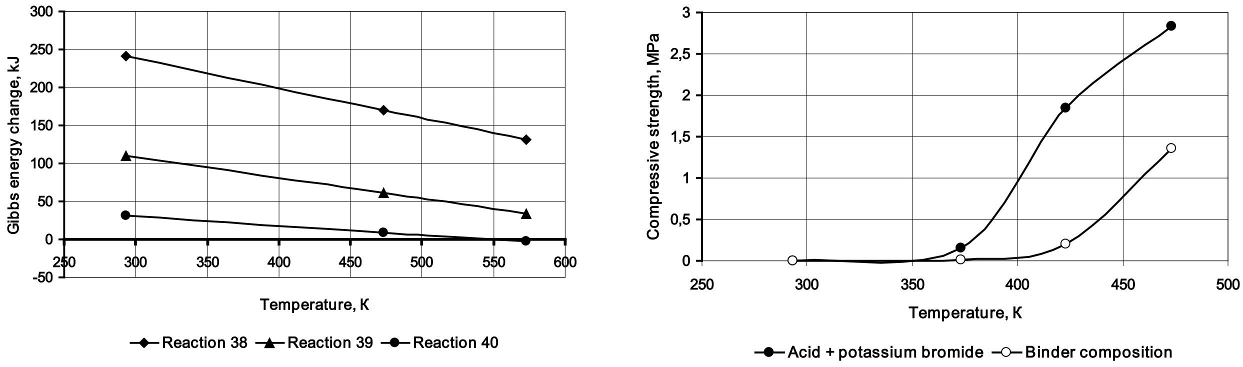


Fig. 14 – The effect of temperature on the compressive strength of samples of a mixture with potassium chloride

Reactions (38)…(40) were analyzed for **potassium bromide KBr**. Thermodynamic analysis of reactions is shown in Fig. 15 (a).

$$3\ KBr + H_3PO_4 \rightarrow K_3PO_4 + 3\ HBr \uparrow \quad (38)$$
$$2\ KBr + H_3PO_4 \rightarrow K_2HPO_4 + 2\ HBr \uparrow \quad (39)$$
$$KBr + H_3PO_4 \rightarrow KH_2PO_4 + HBr \uparrow \quad (40)$$

Potassium bromide in combination with acid behaves like potassium chloride. Thermodynamically, the formation of monosubstituted potassium phosphate is most likely. However, taking into account the mass ratios, it was found that in the first sample (acid + potassium bromide) there is an excess of acid, which should lead to the formation of acidic potassium phosphates by reactions (39) and (40). In the second sample (binder composition), taking into account the excess potassium bromide, 62% of this salt may react and 38% remains.



a **b**

Fig. 15 – Gibbs energy change in the range from 293 to 573 K for the reactions of interaction of potassium bromide with orthophosphoric acid (a) and compressive strength of samples (b)

The interaction of potassium bromide with orthophosphoric acid leads to a significant strengthening of the samples of the mixture (Fig. 15, b). This is a confirmation of the implementation in the system of synthesis of phosphate binder component. The difference in the strength of the samples is explained by a more complete reaction and the formation of acid phosphates in the first sample and also the presence of residual potassium bromide and the formation of trisubstituted potassium phosphate in the second sample.

From the graphs in Fig. 15 it is also obvious that the formation of potassium phosphates occurs in the temperature range above 473 K, which is confirmed by additional research. Determined the strength of samples that were made at higher temperatures (Fig. 16). Thus, the conclusion about the chemical nature of the formation of the binder in this system due to exchange reactions was confirmed.

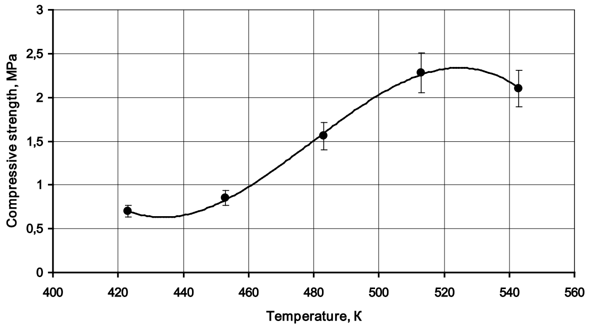


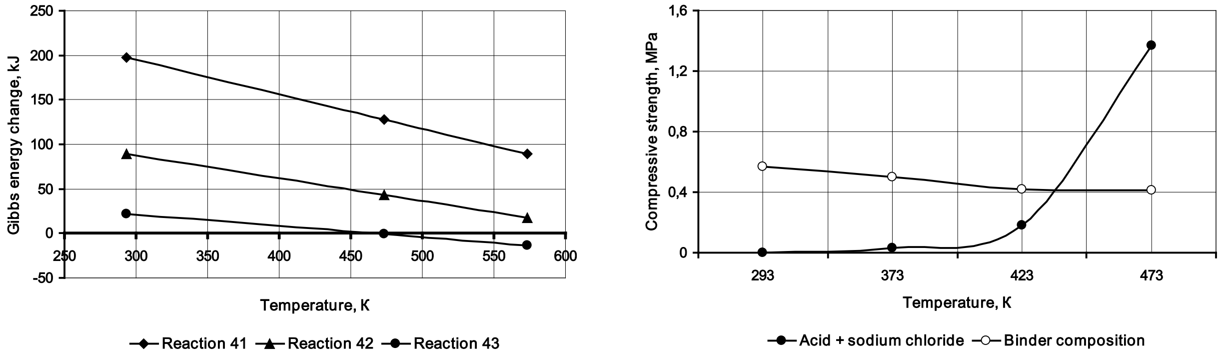
Fig. 16 – The effect of temperature on the compressive strength of samples of a mixture with potassium bromide

Chemical reactions (41)…(43) were analyzed for **sodium chloride NaCl**. Thermodynamic characteristics of the reactions are shown in Fig. 17 (a).

$$3NaCl + H_3PO_4 = Na_3PO_4 + 3HCl\uparrow \quad (41)$$

$$2NaCl + H_3PO_4 = Na_2HPO_4 + 2HCl\uparrow \quad (42)$$

$$NaCl + H_3PO_4 = NaH_2PO_4 + HCl\uparrow \quad (43)$$



a **b**

Fig. 17 – Gibbs energy change in the range from 293 to 573 K for the reactions of interaction of sodium chloride with orthophosphoric acid (a) and compressive strength of samples (b)

Reaction (43) is possible when heated to 473 K, for reactions (41) and (42) requires a higher temperature. The synthesis of sodium phosphates in this system is also possible. Their formation is indicated by the results of determining the strength of the samples (Fig. 17, b). In the first sample (acid + sodium chloride), according to the calculated mass ratios, the formation of all three sodium phosphates is possible. In the second sample (binder composition), the maximum amount of sodium chloride that can react is 30%. The low percentage of conversion of sodium chloride to phosphates leads to low strength of the samples.

Also, according to Fig. 17, it is obvious that temperatures above 473 K leads to

intensification of phosphate synthesis reactions. Confirmation of this fact was obtained after conducting research in this temperature range (Fig. 18). The maximum strength corresponds to a temperature of 573 K.

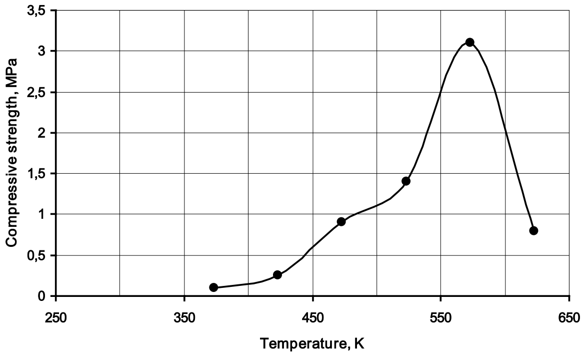


Fig. 18 – The effect of temperature on the compressive strength of samples of a mixture with sodium chloride

The formation of sodium phosphates in the system "sodium chloride – orthophosphoric acid" was confirmed by X-ray phase analysis (Fig. 19). It was found that none of the reactions (41)…(43) occurs.

Instead of sodium orthophosphates, sodium trimetaphosphate was formed. A chemical reaction led to its formation:

$$3NaCl + 3H_3PO_4 = Na_3P_3O_9 + 3HCl \uparrow + 3H_2O \uparrow \quad (44)$$

The formation of sodium trimetaphosphate is due to the fact that it occurs in the temperature range 523…573 K. It is known that at temperatures below 488 K the most stable is orthophosphoric acid H_3PO_4, from 488 to 573 K – pyrophosphoric acid $H_4P_2O_7$, and at 573 K and more – metaphosphoric acid HPO_3 [14]. Therefore, in a sample kept at 573 K, the formation of sodium metaphosphate is absolutely logical.

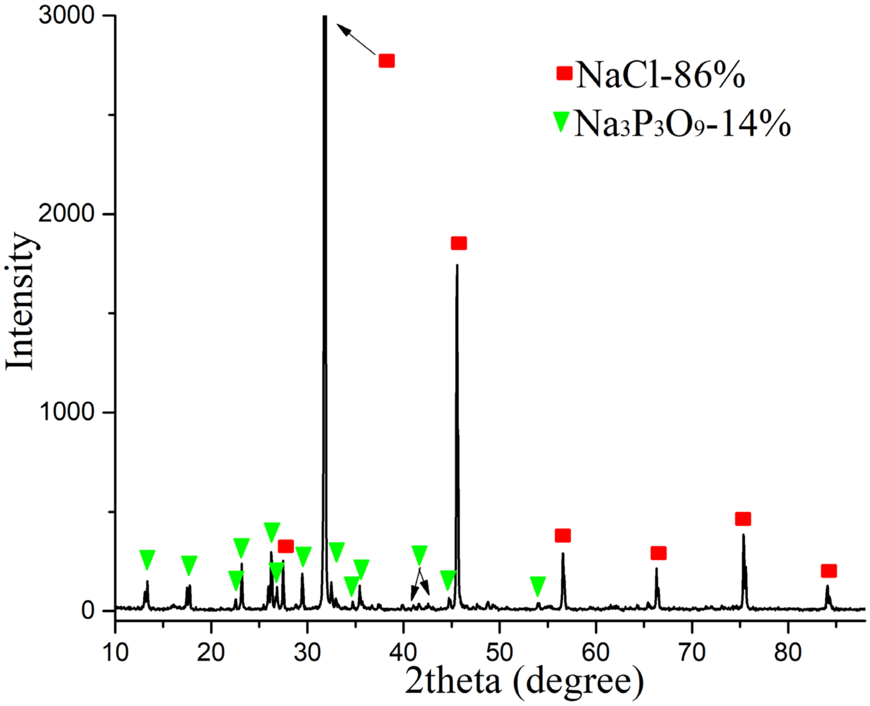


Fig. 19 – X-ray phase analysis of the composition of sodium chloride (8 mass parts) and orthophosphoric acid (3 mass parts) after exposure to 573 K

To pass reaction (44), the mass ratio of sodium chloride to acid should be 176 : 294, and taking into account the acid concentration – 176 : 346. In the experimental sample, the ratio is 8 : 3, or 176 : 66. Therefore, a significant portion of sodium chloride, which is in excess, does not react and remains in its original form. It is estimated that $176 \cdot \frac{66}{346} = 33$ mass parts of chloride should react. 143 mass parts of chloride (or 70%) should remain, and $309 \cdot \frac{66}{346} = 60$ mass parts (or 30%) of sodium trimetaphosphate should be formed. This calculated composition completely coincides with the result of the phase analysis.

Differential thermogravimetric analysis of this sample is presented in Fig. 20. The thermogram shows two endothermic effects of different intensity. The mass of the sample in the range up to 800 °C is practically unchanged.

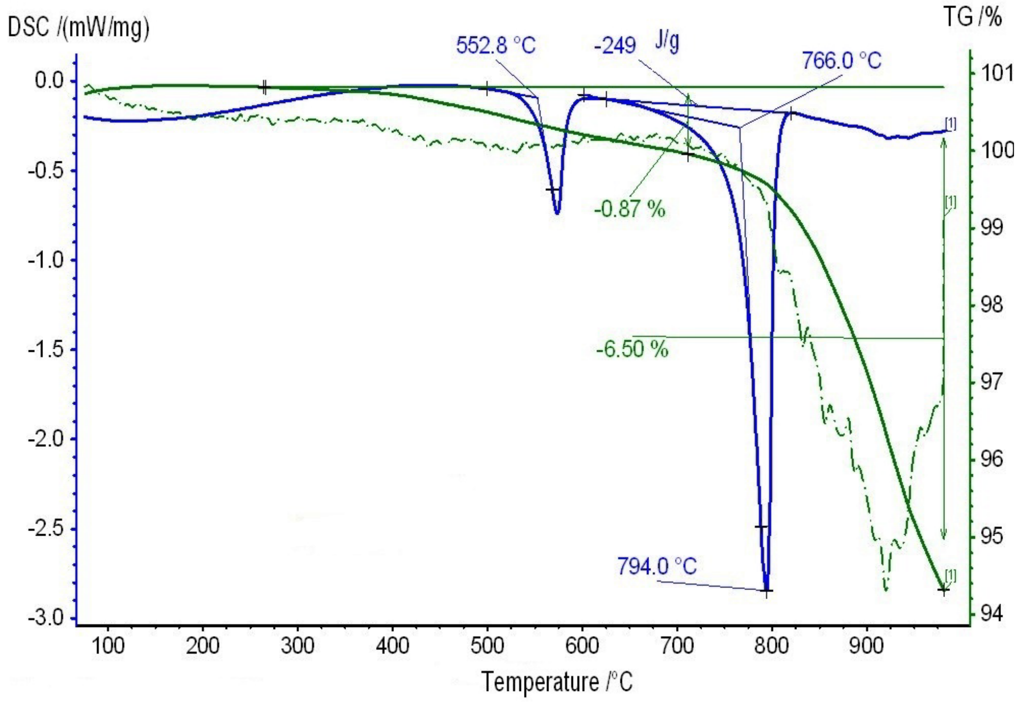


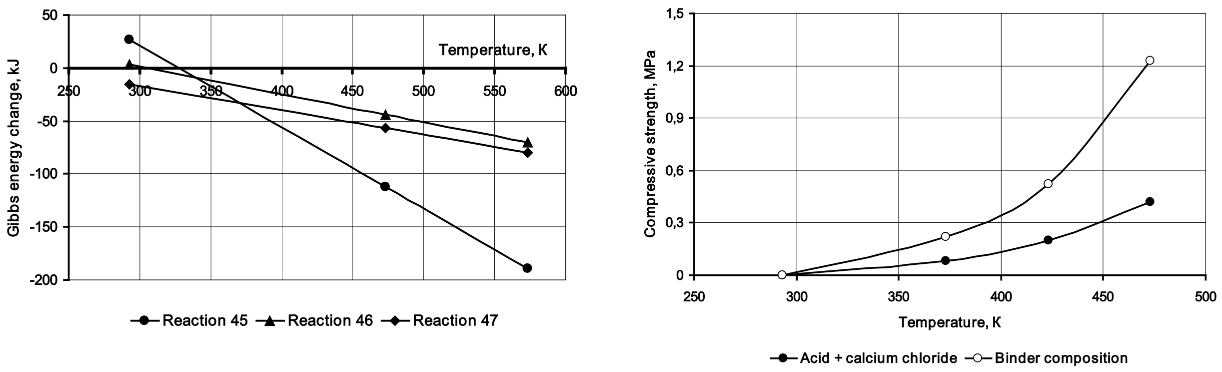
Fig. 20 – Differential thermogravimetric analysis of the composition of sodium chloride (8 mass parts) and orthophosphoric acid (3 mass parts) after exposure in the oven at a temperature of 573 K

The endothermic effect at 553 °C corresponds to the melting of sodium trimetaphosphate. The endothermic effect at 794 °C is associated with the melting of residual sodium chloride.

The researched system has low thermal stability. It has low-melting phases. However, this can be useful for some fields of application. For example, in foundry cores, the liquid phase formed by the melting of sodium phosphates can help protect the surface of cast parts from scorching, and the water solubility of sodium phosphates will ensure easy removal of cores from the internal cavities of cast parts.

The following reactions (45)…(47) were analyzed for **calcium chloride $CaCl_2$**. Thermodynamic characteristics of the reactions are shown in Fig. 21 (a).

$$3\,CaCl_2 + 2\,H_3PO_4 \rightarrow Ca_3(PO_4)_2 + 6\,HCl\uparrow \quad (45)$$
$$CaCl_2 + H_3PO_4 \rightarrow CaHPO_4 + 2\,HCl\uparrow \quad (46)$$
$$CaCl_2 + 2\,H_3PO_4 \rightarrow Ca(H_2PO_4)_2 + 2\,HCl\uparrow \quad (47)$$



a b

Fig. 21 – Gibbs energy change in the range from 293 to 573 K for the reactions of interaction of calcium chloride with orthophosphoric acid (a) and compressive strength of samples (b)

Thermodynamically, the reaction of the interaction of calcium chloride with orthophosphoric acid is possible even without heating. Table 2 shows that during the mixing of these reagents there is an active interaction with the release of gaseous substances that have a pungent odor. This confirms the passage of the reaction between them.

The mass ratios of the components in the studied samples are such that in the first (acid + calcium chloride) a mixture of acidic calcium phosphates should be formed. In the second sample (binder composition) due to excess calcium chloride, it reacted no more than 48%. The higher strength of the samples with the second test (Fig. 21, b) is due to the presence of residual calcium chloride, which obviously has a better binding capacity than the formed calcium phosphates. However, the overall strength in this system is low, so for practical use it can't be recommended.

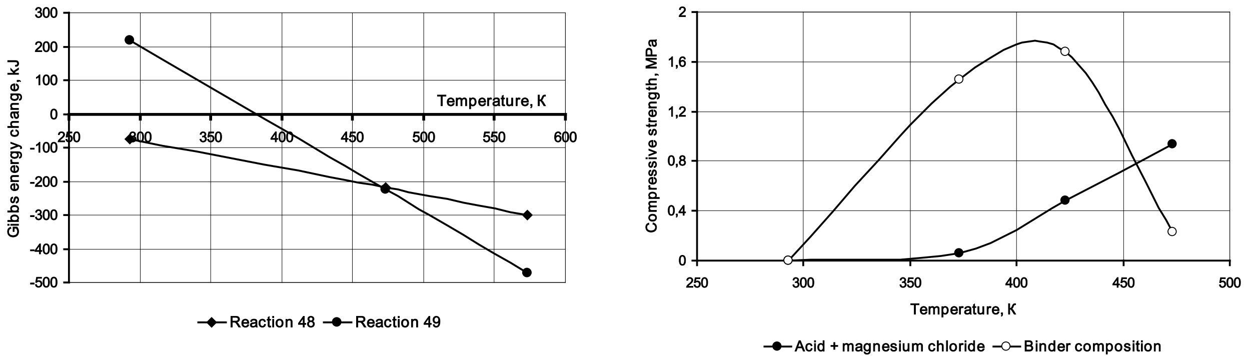
The following reactions (48)…(49) were analyzed for **magnesium chloride $MgCl_2$**. Thermodynamic characteristics of the reactions are shown in Fig. 22 (a).

The experiment used a crystal hydrate form – hexahydrous magnesium chloride. The analysis of transformations in this system confirmed the previously formulated scientific position that crystal hydrate salts are more active against orthophosphoric acid than conventional ones. The reaction of anhydrous chloride with acid requires heating above 423 K, and the crystal hydrate can interact when heated below 373 K (Fig. 22, a). It is possible to form not only trisubstituted, but also two acidic magnesium phosphates by chemical reactions:

$$MgCl_2 \cdot 6\,H_2O + H_3PO_4 \rightarrow MgHPO_4 + 6\,H_2O\uparrow + 2\,HCl\uparrow \quad (50)$$
$$MgCl_2 \cdot 6\,H_2O + 2\,H_3PO_4 \rightarrow Mg(H_2PO_4)_2 + 6\,H_2O\uparrow + 2\,HCl\uparrow \quad (51)$$

$$3\,MgCl_2 + 2\,H_3PO_4 \rightarrow Mg_3(PO_4)_2 + 6\,HCl\uparrow \quad (48)$$
$$3\,[MgCl_2 \cdot 6\,H_2O] + 2\,H_3PO_4 \rightarrow Mg_3(PO_4)_2 + 18\,H_2O\uparrow + 6\,HCl\uparrow \quad (49)$$

 ISBN 978-3-949059-44-5



a b

Fig. 22 – Gibbs energy change in the range from 293 to 573 K for the reactions of interaction of magnesium chloride with orthophosphoric acid (a) and compressive strength of samples (b)

The calculation of mass ratios for reactions (49), (50), (51) showed that in the first sample (acid + magnesium chloride) it is closest to the formation of monosubstituted phosphate or a mixture of acidic magnesium phosphates. These phosphates provide hardening of the sample after heating to 423…473 K and increasing strength, as shown in Fig. 22 (b). Such a temperature (instead of 323…373 K, as determined by the analysis of graphs in Fig. 22, a) is obviously required to intensify the removal of the reaction product H_2O.

In the second sample (binder composition), a maximum of 52% of magnesium chloride reacted, and the rest remains in its original form. After 389.7 K, magnesium chloride crystal hydrate loses chemically bound water [28, 29], which gives it binding properties. Upon further heating, the strength of the samples decreases. Thus, the binder in this system is represented by two compounds – magnesium phosphate and magnesium chloride crystalline. The magnesium chloride, in view of the data obtained in Fig. 22 (b), has a better binding capacity and can therefore be used as a stand-alone binding component. However, for use in compositions operating at temperatures above 423 K, it will be advisable to describe here the process of synthesis of magnesium phosphate, with adjustment of the mass ratio of components.

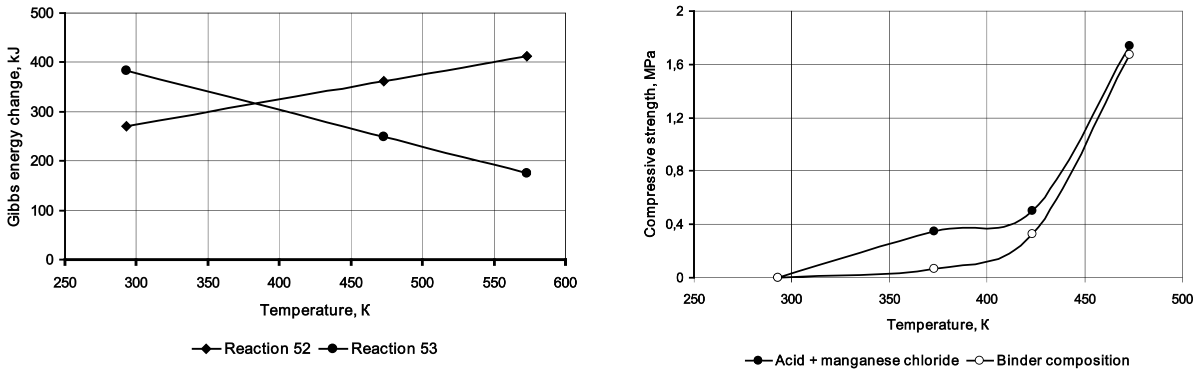
The chemical reactions (52)…(53) were analyzed for **manganese chloride $MnCl_2$**. Thermodynamic characteristics of the reactions are shown in Fig. 23 (a).

$$3\ MnCl_2 + 2\ H_3PO_4 \rightarrow Mn_3(PO_4)_2 + 6\ HCl\uparrow \quad (52)$$

$$3\ [MnCl_2 \cdot 4\ H_2O] + 2\ H_3PO_4 \rightarrow Mn_3(PO_4)_2 + 12\ H_2O + 6\ HCl\uparrow \quad (53)$$

Thermodynamic impossibility was established for both reactions. However, qualitative analysis of the composition (see Table 2) showed a fairly intense interaction with the release of gas, which has a pungent odor. Turning to the accumulated information about manganese chloride, we see that it is prone to active hydrolysis, especially during dehydration. Since manganese chloride tetrahydrate is used in the work, the transformation in the system should be explained by a two-stage process. In the first stage, the reaction is hydrolyzed:

$$MnCl_2 \cdot 4\ H_2O \rightarrow Mn(OH)_2 + 2\ HCl\uparrow + 2\ H_2O \quad (54)$$



a **b**

Fig. 23 – Gibbs energy change in the range from 293 to 573 K for the reactions of interaction of manganese chloride with orthophosphoric acid (a) and compressive strength of samples (b)

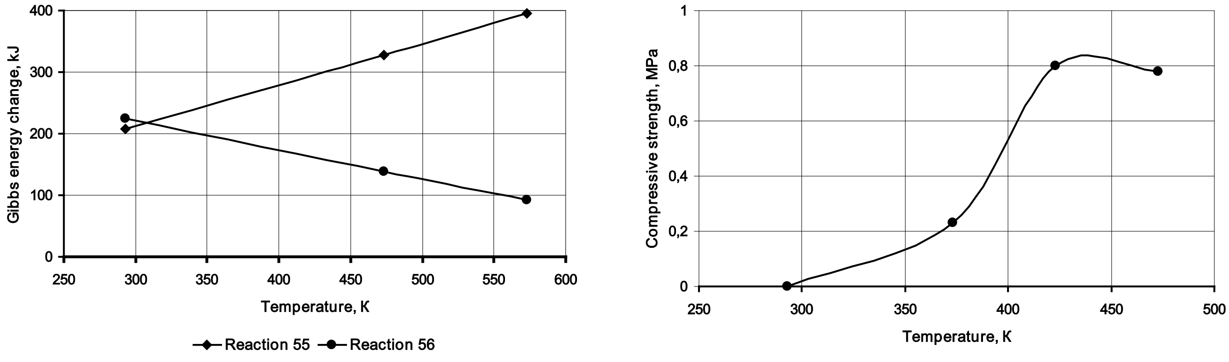
As a result of this process, a gas with a pungent odor is released. Subsequently, manganese hydroxide reacts with orthophosphoric acid in one of the above reactions (25), (26), (27).

The calculation of the mass ratios of reactions (25), (26), (27) and (54) showed that in the first sample (acid + manganese chloride) transformations can occur in full with the formation of acidic manganese phosphates. A significant increase in strength in the range of 423…473 K (Fig. 23, b) can be explained by intensive removal of by-products, especially H_2O. In the second sample (binder composition), a maximum of 50% manganese chloride may react, with the remaining in its original form or as a hydroxide. The strength of the sample provides the formed manganese phosphate, the absolute estimated amount of which is approximately the same as in the first sample. Therefore, the strength is at the same level.

The reactions (55), (56) were analyzed for **nickel chloride $NiCl_2$**. Thermodynamic characteristics of the reactions are shown in Fig. 24 (a).

$$NiCl_2 + 2\ H_3PO_4 \rightarrow Ni_3(PO_4)_2 + 6\ HCl \uparrow \quad (55)$$

$$3\ [NiCl_2 \cdot 6\ H_2O] + 2\ H_3PO_4 \rightarrow Ni_3(PO_4)_2 + 18H_2O \uparrow + 6\ HCl \uparrow \quad (56)$$



a **b**

Fig. 24 – Gibbs energy change in the range from 293 to 573 K for the reactions of interaction of nickel chloride with orthophosphoric acid (a) and compressive strength of samples (b)

ISBN 978-3-949059-44-5

Thermodynamic impossibility was established for both reactions. However, qualitative analysis of the composition (see Table 2) showed a fairly intense interaction with the release of gas, which has a pungent odor. The nature of the curves in Fig. 24 (b), and the results of the observation of the sample lead to similar conclusions about the interaction of manganese and nickel chlorides with orthophosphoric acid. The first transformation in a system with nickel chloride is hydrolysis by reaction:

$$NiCl_2 \cdot 6\,H_2O \rightarrow Ni(OH)_2 + 2\,HCl\uparrow + 4\,H_2O \quad (57)$$

Reaction (57) explains the reason for the release of the gaseous product.

This system is similar to "H_3PO_4 – manganese chloride", so the determination of the strength of the samples was performed on only one sample (acid + nickel chloride). Heating to 423…473 K promotes the formation of nickel phosphates, which act as a binder in this mixture. The formation of these phosphates occurs by chemical reactions:

$$3\,Ni(OH)_2 + 2\,H_3PO_4 \rightarrow Ni_3(PO_4)_2 + 6\,H_2O \quad (58)$$

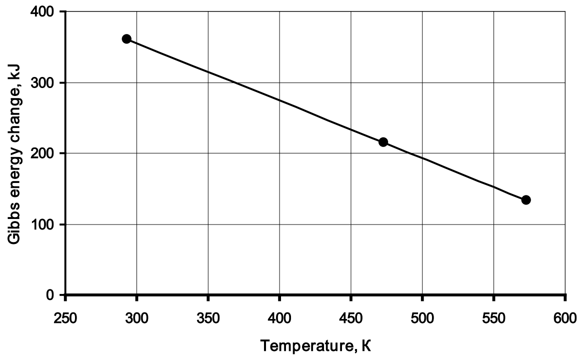
$$Ni(OH)_2 + H_3PO_4 \rightarrow NiHPO_4 + 2\,H_2O \quad (59)$$

$$Ni(OH)_2 + 2\,H_3PO_4 \rightarrow Ni(H_2PO_4)_2 + 2\,H_2O \quad (60)$$

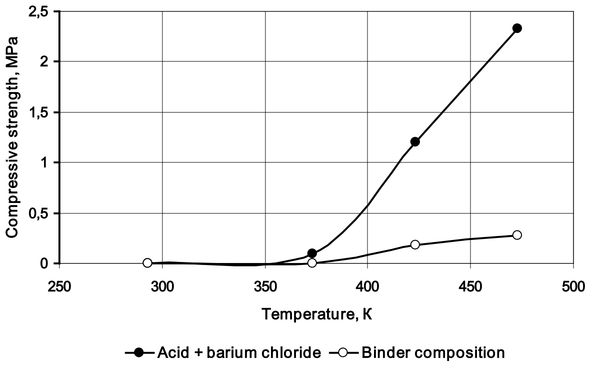
Analysis of the mass ratios of the components by reactions (57)…(60) shows that monosubstituted nickel phosphate should be formed in the sample by reaction (60), which determines the achievement of a certain level of strength (see Fig. 24, b). However, the binding capacity of nickel phosphates is obviously lower than that of elements of group I phosphates and phosphates of iron, manganese, magnesium, and aluminum. Therefore, they can't be considered perspective binders.

There are no data on the thermodynamic properties of acidic barium phosphates, so the analysis of the interaction of orthophosphoric acid with **barium chloride $BaCl_2$** was performed by only one chemical reaction (61). Thermodynamic analysis of the reaction is shown in Fig. 25 (a).

$$3\,BaCl_2 + 2\,H_3PO_4 \rightarrow Ba_3(PO_4)_2 + 6\,HCl\uparrow \quad (61)$$



a



b

Fig. 25 – Gibbs energy change in the range from 293 to 573 K for the reactions of interaction of barium chloride with orthophosphoric acid (a) and compressive strength of samples (b)

The value of Gibbs energy in the studied temperature range remains positive. Barium chloride is not hydrolyzed [28, 29], and therefore the formation of phosphates in this system seems completely impossible.

However, the interaction in this system, according to Fig. 25 (b), when heated above 423 K occurs. The result of this interaction is the achievement of high strength – more than 2 MPa. There is no explanation for this fact yet, but the formation of barium phosphates cannot be denied. Assuming that the chemical interaction did occur, the second sample (binder composition) contains residual barium chloride and barium phosphates, which are insoluble. Both of these salts do not have binding properties. This explains the low strength of the mixture with the second sample. This system has binding potential and requires further research.

1.7. Synthesis of phosphate binders using nitric acid salts

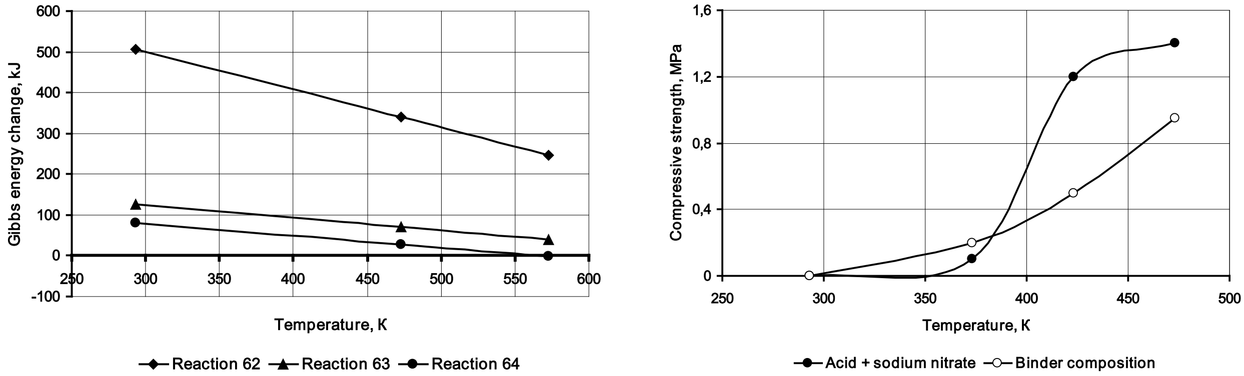
Nitric acid is stronger than orthophosphoric acid, so at normal temperatures most of its salts should not enter into chemical reactions. However, some nitrates undergo slight physicochemical transformation when slightly heated, which allows phosphates to be obtained from by-products.

The following reactions (62), (63), (64) were analyzed for **sodium nitrate $NaNO_3$**. The thermodynamic characteristics of the reactions are shown in Fig. 26 (a).

$$6\ NaNO_3 + 2\ H_3PO_4 \rightarrow 2\ Na_3PO_4 + 3\ H_2O \uparrow + 3\ N_2O_5 \uparrow \quad (62)$$

$$2\ NaNO_3 + H_3PO_4 \rightarrow Na_2HPO_4 + H_2O \uparrow + N_2O_5 \uparrow \quad (63)$$

$$2\ NaNO_3 + 2\ H_3PO_4 \rightarrow 2\ NaH_2PO_4 + H_2O \uparrow + N_2O_5 \uparrow \quad (64)$$



a **b**

Fig. 26 – Gibbs energy change in the range from 293 to 573 K for the reactions of interaction of sodium nitrate with orthophosphoric acid (a) and compressive strength of samples (b)

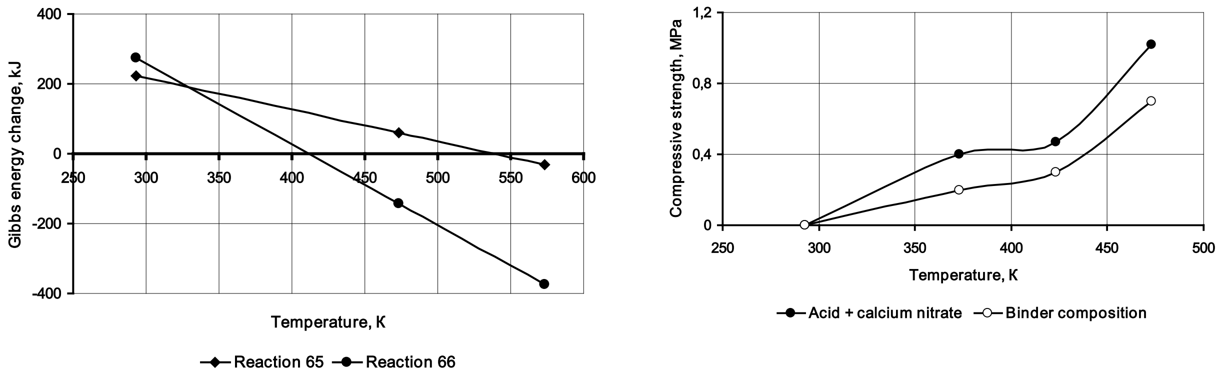
Sodium nitrate is characterized by high chemical and thermal resistance. Therefore, in the whole range of research temperatures it remains unchanged, and the strength of the samples in Fig. 26 (b), is determined mainly by sodium nitrate. As a water-soluble salt, it provides hardening of the samples at 423…473 K due to water removal. The binder composition is mainly sodium nitrate, because chemical reactions do not occur in the formation of sodium phosphates and in the second sample (Fig. 26, b) we observe its own binding potential. Thus, the synthesis of

phosphate binder component in the system of orthophosphoric acid and sodium nitrate is impossible.

The reactions (65), (66) were analyzed for **calcium nitrate $Ca(NO_3)_2$**. The thermodynamic characteristics of the reactions are shown in Fig. 27 (a).

$$3\ Ca(NO_3)_2 + 2\ H_3PO_4 \rightarrow Ca_3(PO_4)_2 + 3\ H_2O\uparrow + 3\ N_2O_5\uparrow \quad (65)$$

$$3\ [Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O] + 2H_3PO_4 \rightarrow Ca_3(PO_4)_2 + 15H_2O\uparrow + 3N_2O_5\uparrow \quad (66)$$



a **b**

Fig. 27 – Gibbs energy change in the range from 293 to 573 K for the reactions of interaction of calcium nitrate with orthophosphoric acid (a) and compressive strength of samples (b)

Tetrahydrate calcium nitrate was used in the experiment. It was found that, as for other inorganic salts, calcium nitrate is more active, as can be seen from the graph in Fig. 27 (a), and when heated to 423…473 K can theoretically form calcium phosphates. It is also theoretically possible to form acidic phosphates by reactions:

$$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O + H_3PO_4 \rightarrow CaHPO_4 + 5H_2O\uparrow + N_2O_5\uparrow \quad (67)$$

$$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O + 2H_3PO_4 \rightarrow Ca(H_2PO_4)_2 + 5H_2O\uparrow + N_2O_5\uparrow \quad (68)$$

However, it is known that calcium nitrate at a temperature of 405 K (even before the possible reaction with H_3PO_4) loses chemically bound water [28, 29], and to interact with anhydrous nitrate acid requires heating above 523 K, as shown in Fig. 27 (a). Therefore, the strength of the mixture with both individual components and the binder composition is provided not by phosphate but by calcium nitrate, and the strength results are almost the same and low (Fig. 27, b). Therefore, the synthesis of the phosphate binder in this system also does not occur.

For **strontium nitrate $Sr(NO_3)_2$** the following reactions were analyzed:

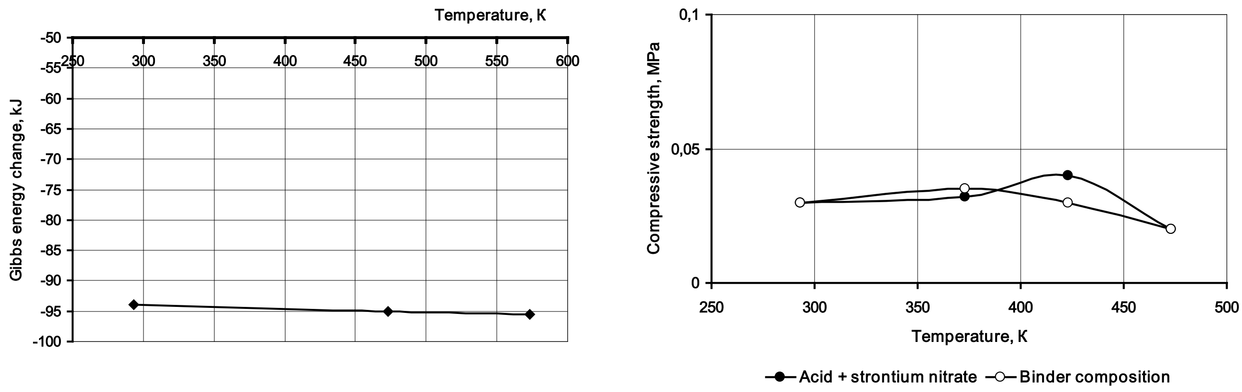
$$3\ Sr(NO_3)_2 + 2H_3PO_4 \rightarrow Sr_3(PO_4)_2 + 3\ N_2O_5\uparrow + 3\ H_2O\uparrow \quad (69)$$

$$Sr(NO_3)_2 + H_3PO_4 \rightarrow SrHPO_4 + N_2O_5\uparrow + H_2O\uparrow \quad (70)$$

$$Sr(NO_3)_2 + 2H_3PO_4 \rightarrow Sr(H_2PO_4)_2 + N_2O_5\uparrow + H_2O\uparrow \quad (71)$$

Fig. 28 shows as an example only the graph for reaction (69), because the change in free energy for these reactions is much less than zero. All reactions are possible under normal conditions.

 ISBN 978-3-949059-44-5



a b

Fig. 28 – Gibbs energy change in the range from 293 to 573 K for the reactions of interaction of strontium nitrate with orthophosphoric acid (a) and compressive strength of samples (b)

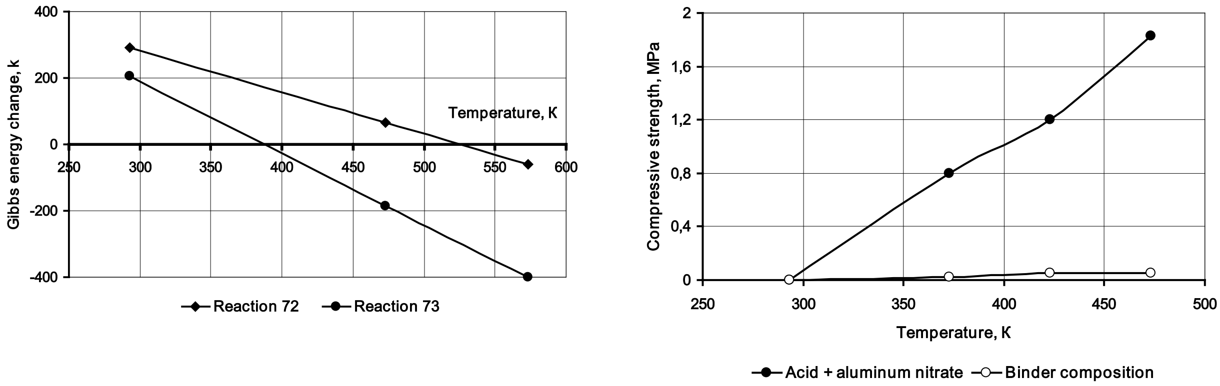
Chemical interaction in this system leads to the formation of strontium phosphates. The calculation of the mass ratios of the components for reactions (69)…(71) shows that in the first sample (acid + strontium nitrate) monosubstituted phosphate is mainly formed. In the second sample (binder composition) trisubstituted phosphate is formed, while no more than 55% of strontium nitrate can enter into reaction (69). It was found that strontium phosphates are completely devoid of binding capacity, because the samples do not have sufficient strength (Fig. 28, b).

Research has led to another scientific conclusion: **Guaranteed phosphate formation does not always ensure the strength of the system, as a number of phosphorus salts are devoid of binding capacity.**

Reactions (72), (73) were analyzed for **aluminum nitrate $Al(NO_3)_3$**. The thermodynamic characteristics of the reactions are shown in Fig. 29 (a).

$$2\ Al(NO_3)_3 + 2\ H_3PO_4 \rightarrow 2\ AlPO_4 + 3\ H_2O \uparrow + 3\ N_2O_5 \uparrow \quad (72)$$

$$2\ [Al(NO_3)_3 \cdot 6H_2O] + 2\ H_3PO_4 \rightarrow 2AlPO_4 + 15H_2O \uparrow + 3\ N_2O_5 \uparrow \quad (73)$$



a b

Fig. 29 – Gibbs energy change in the range from 293 to 573 K for the reactions of interaction of aluminum nitrate with orthophosphoric acid (a) and compressive strength of samples (b)

Aluminum nonahydrate $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ was used in the experiments. When

heated slightly above the melting point (346.6 K), it loses first one and then two more water molecules, turning into hexahydrate $Al(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$, so the reaction (73) was subjected to thermodynamic analysis. It was found that for interaction with orthophosphoric acid of anhydrous aluminum nitrate it is necessary to heat about 523 K, for hexahydrous – more than 373 K (see Fig. 29, a).

In the composition, hydrolysis processes are also possible with the formation of aluminum hydroxynitrate $Al(OH)_2(NO_3)$ or aluminum hydroxide $Al(OH)_3$:

$$2\,Al(NO_3)_3 \cdot 6H_2O \rightarrow 2\,Al(OH)_3 + 3\,N_2O_5 + 3\,H_2O \qquad (74)$$

Thermal decomposition of anhydrous aluminum nitrate at 473 K leads to the formation of amorphous aluminum oxide [34]. Therefore, reaction (72) is also impossible, because before its beginning, aluminum nitrate decomposes by the reaction:

$$4\,Al(NO_3)_3 \rightarrow 2\,Al_2O_3 + 12\,NO_2\uparrow + 3\,O_2\uparrow \qquad (75)$$

The interaction of alumina with orthophosphoric acid requires a temperature of about 573 K [4, 13, 14], so in our experiment the formation of phosphate binder occurs through the hydrolysis of aluminum nitrate by reaction (74) with subsequent interaction of aluminum hydroxide with orthophosphoric acid. The formation of the binder begins at 373 K, and further heating contributes to the intensification of processes and increase the strength of the samples (Fig. 29, b).

The mass ratios were calculated for the reactions:

$$Al(OH)_3 + H_3PO_4 \rightarrow AlPO_4 + 3H_2O \qquad (76)$$

$$2\,Al(OH)_3 + 3\,H_3PO_4 \rightarrow Al_2(HPO_4)_3 + 6H_2O \qquad (77)$$

$$Al(OH)_3 + 3\,H_3PO_4 \rightarrow Al(H_2PO_4)_3 + 3H_2O \qquad (78)$$

It is taken into account that aluminum hydroxide was formed by reaction (74). It has been established that in the first sample (acid + aluminum nitrate) with equal mass fractions of aluminum nitrate and orthophosphoric acid, monosubstituted aluminum phosphate should be formed. In the second sample (binder composition) no more than 65% of aluminum nitrate can react, and the reaction produces tri-substituted aluminum phosphate. This explains the significant difference in the strength of the samples (see Fig. 29, b). Insoluble aluminum phosphate cannot be used as a ready-to-use binder. The combination of aluminum nitrate with orthophosphoric acid leads to the synthesis of aluminum phosphates directly in the mixture during heating and provides high strength samples.

To establish the fact of phosphate binder synthesis in this system, X-ray phase analysis was performed. The results of the analysis are shown in Fig. 30.

Only the products of the interaction were identified in the composition: complex aluminum phosphate (92.8%), aluminum orthophosphate in the form of berlinite (6.2%) and residual nitrogen-containing phase (0.9%). Aluminum nitrate was not detected in the sample, so it completely decomposed and reacted with the acid.

Complex aluminum phosphate is a combination of orthophosphate $AlPO_4$ and hydrophosphate $Al(H_2PO_4)_3$. Six moles of crystal hydrate water remained from aluminum nitrate hexahydrate.

The graph of differential thermogravimetric analysis (Fig. 31) has a number of

thermal effects: at 148 °C, 222 °C, 386 °C and 490 °C. The first two effects are associated with the decomposition of crystal hydrates, and the last two – with the decomposition of nitrogen-containing phase and conversion of acid phosphate aluminum on trisubstituted (berlinite). In the future, the binding component consists of one phase – $AlPO_4$. The phase is stable at high temperatures, so when heated above 500 °C there are no transformations.

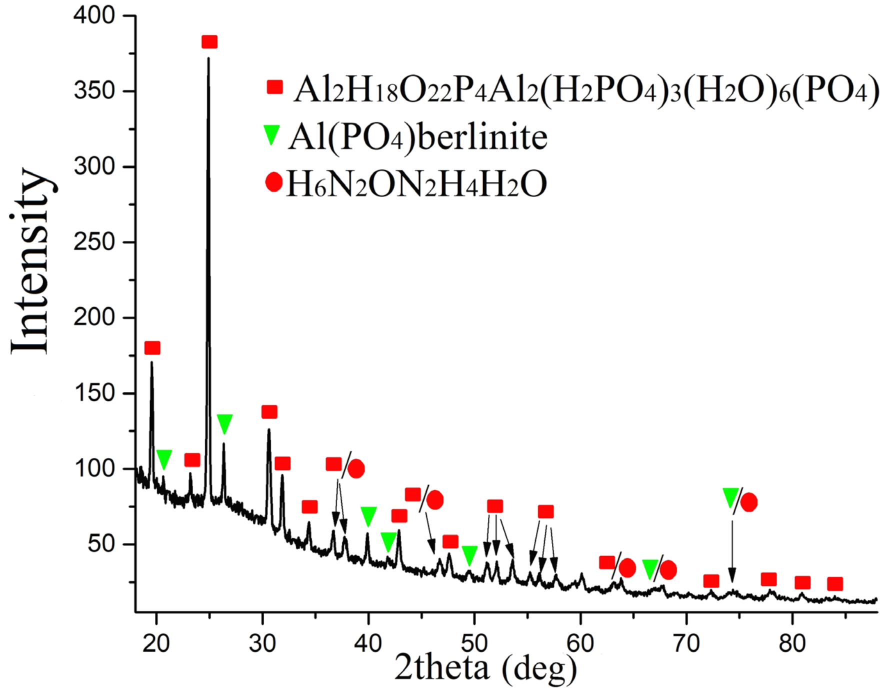


Fig. 30 – X-ray phase analysis of the composition of aluminum nitrate (5 mass parts) with orthophosphoric acid (3 mass parts) after treatment at 473 K

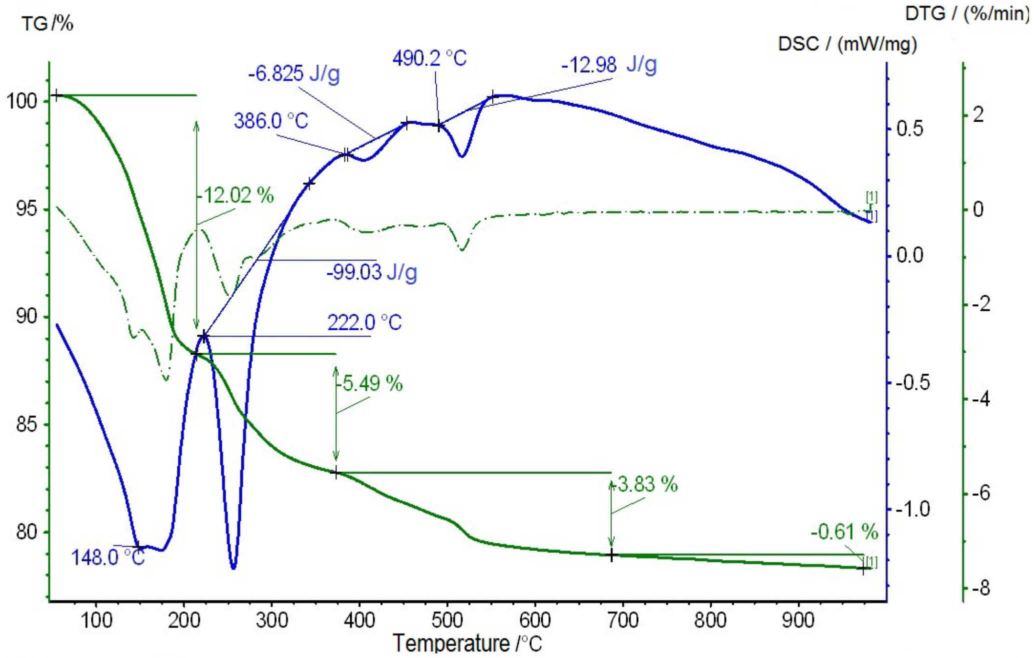
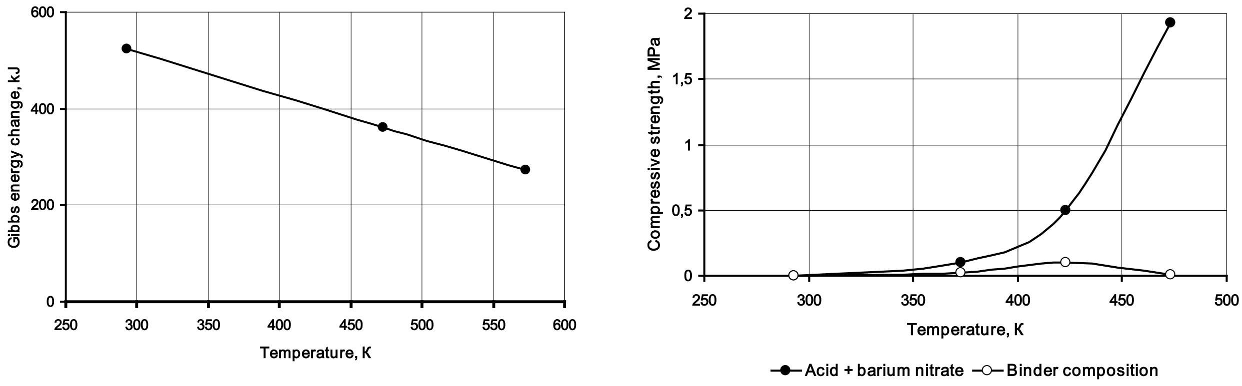


Fig. 31 – Differential thermogravimetric analysis of the composition of aluminum nitrate (5 mass parts) with orthophosphoric acid (3 mass parts) after heat treatment at 473 K

The analysis of chemical reactions of **barium nitrate $Ba(NO_3)_2$** is not fully carried out because there are no data on the thermodynamic characteristics of acidic barium phosphates. Therefore, the change in free energy was determined only for the following reaction:

$$3\ Ba(NO_3)_2 + 2\ H_3PO_4 \rightarrow Ba_3(PO_4)_2 + 3\ N_2O_5\uparrow + 3\ H_2O\uparrow \quad (79)$$

The results of thermodynamic analysis (Fig. 32, a) indicate the impossibility of this chemical reaction. However, the results of determining the strength of the samples (Fig. 32, b) confirm the assumption of the formation of a phosphate binder, because after heating to 473 K the samples have high strength. Apart from reaction (79), there is no other mechanism of interaction in the system, because barium nitrate is not subject to hydrolysis or thermal decomposition. Therefore, this question remains open.



a b

Fig. 32 – Gibbs energy change in the range from 293 to 573 K for the reaction of barium nitrate with orthophosphoric acid (a) and compressive strength of samples (b)

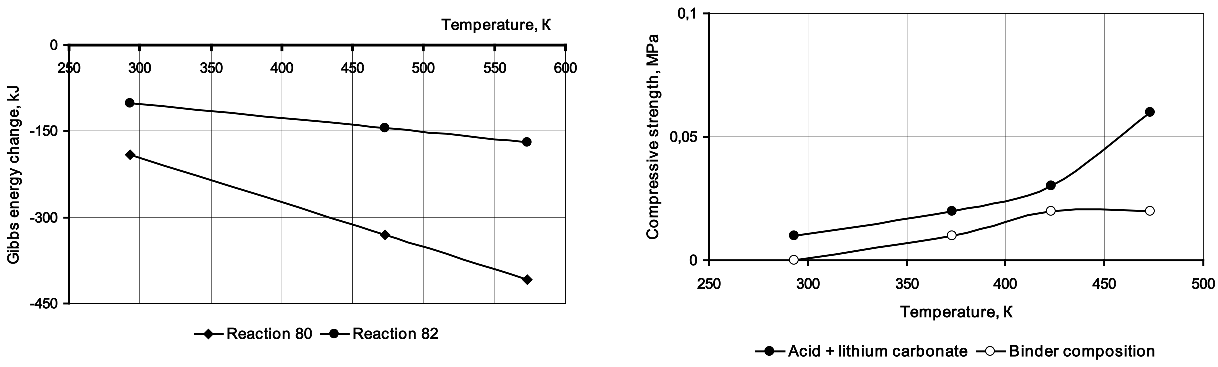
In the second sample (binder composition), no more than 68% of barium nitrate may react by mass ratio of components. The strength of the samples of this sample is close to zero, because barium nitrate has no binding properties and barium phosphates are insoluble. However, there are no confirmed data on the formation of barium phosphates today.

1.8. Synthesis of phosphate binders using carbonates

Carbonates are salts of weak carbonic acid. Therefore, their reactions with orthophosphoric acid according to chemical ideas can occur under normal conditions.

Reactions (80), (81), (82) were analyzed for lithium carbonate Li_2CO_3. The thermodynamic characteristics of the reactions are shown in Fig. 33 (a):

$$3\ Li_2CO_3 + 2\ H_3PO_4 \rightarrow 2\ Li_3PO_4 + H_2O\uparrow + CO_2\uparrow \quad (80)$$
$$Li_2CO_3 + H_3PO_4 \rightarrow Li_2HPO_4 + H_2O\uparrow + CO_2\uparrow \quad (81)$$
$$Li_2CO_3 + 2H_3PO_4 \rightarrow 2LiH_2PO_4 + H_2O\uparrow + CO_2\uparrow \quad (82)$$



a b

Fig. 33 – Gibbs energy change in the range from 293 to 573 K for the reaction of interactions of lithium carbonate with orthophosphoric acid (a) and compressive strength of samples (b)

In the system with lithium carbonate, lithium phosphates are formed at normal temperature. This is established by thermodynamic analysis in Fig. 33 (a). The mass ratios of lithium carbonate to acid are as follows: for reaction (82) – 0.95 : 1, for reaction (83) – 0.65 : 1, for reaction (84) – 0.3 : 1. Therefore, in the first sample (acid + lithium carbonate) trisubstituted lithium orthophosphate is formed. It is practically devoid of binding capacity, and therefore is expressed in unsatisfactory strength of the samples (Fig. 33, b).

The amount of lithium carbonate that could react with the acid is not more than 20% in the mixture with the binder composition. The strength of the samples is even lower.

The results confirm once again that not all phosphates have binding capacity.

The reactions (83), (84), (85) were analyzed for **calcium carbonate $CaCO_3$**. Thermodynamic characteristics of the reactions are shown in Fig. 34 (a).

$$3\ CaCO_3 + 2\ H_3PO_4 \rightarrow Ca_3(PO_4)_2 + 3\ H_2O\uparrow + 3\ CO_2\uparrow \quad (83)$$

$$CaCO_3 + H_3PO_4 \rightarrow CaHPO_4 + H_2O\uparrow + CO_2\uparrow \quad (84)$$

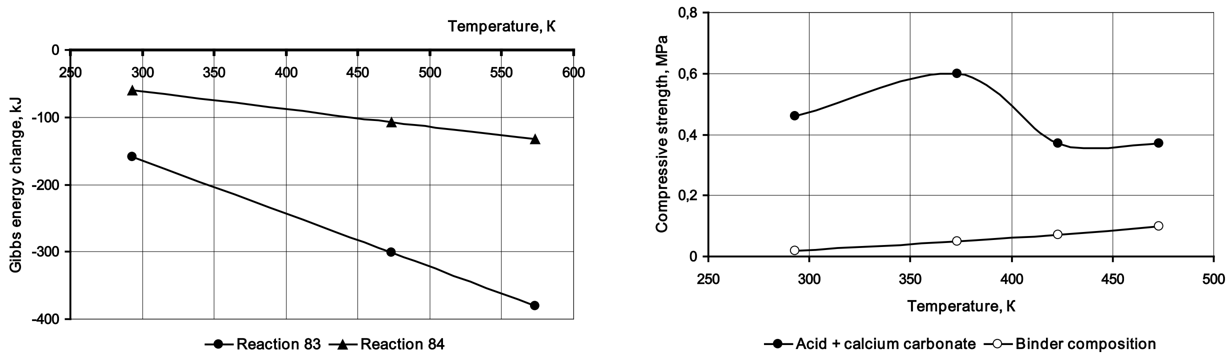
$$CaCO_3 + 2\ H_3PO_4 \rightarrow Ca(H_2PO_4)_2 + H_2O\uparrow + CO_2\uparrow \quad (85)$$

It is established that all reactions can occur at normal temperature. Since they are accompanied by a certain exothermic effect, which was found during the qualitative analysis (see Table 2), the removal of the by-product (H_2O) is possible without heating. Therefore, the samples have approximately the same strength regardless of temperature (Fig. 34, b).

The formation of insoluble calcium phosphates and their lower relative amounts are the reasons for the low strength of the samples with the second sample (binder composition). The calculation of the mass ratios for reactions (83)…(85) shows that in the first sample a mixture of all three calcium phosphates should be formed, and in the second – 26% of the initial amount of calcium carbonate can react.

For **barium carbonate $BaCO_3$**, there are no data on the thermodynamic properties of its acidic phosphates, analyzed only one chemical reaction:

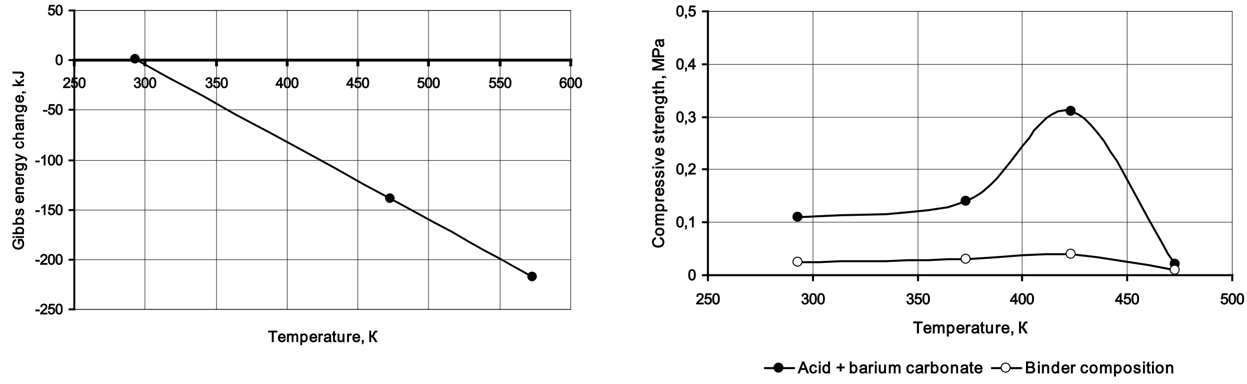
$$3\ BaCO_3 + 2\ H_3PO_4 \rightarrow Ba_3(PO_4)_2 + 3\ CO_2\uparrow + 3\ H_2O\uparrow \quad (86)$$



a b

Fig. 34 – Gibbs energy change in the range from 293 to 573 K for the reaction of interactions of calcium carbonate with orthophosphoric acid (a) and compressive strength of samples (b)

As can be seen from the graph of changes in free energy (Fig. 35, a), the reaction is possible both under normal conditions and when heated. Barium phosphate strengthens the mixture after heating to 423…473 K (Fig. 35, b), but as in the case of calcium carbonate, the insolubility of barium carbonate leads to a slowdown in its chemical interaction with the acid. The insolubility of barium phosphates does not allow to achieve a sufficiently high value of strength. In the first sample (acid + barium carbonate), taking into account the ratio of reagents, should be formed monosubstituted barium phosphate. In the second sample (binder composition), trisubstituted barium phosphate should be formed by reaction (86). No more than 51% of the initial amount of barium carbonate may react.



a b

Fig. 35 – Gibbs energy change in the range from 293 to 573 K for the reaction of interactions of barium carbonate with orthophosphoric acid (a) and compressive strength of samples (b)

A comparison of the results of determining the strength of samples in systems with barium chloride (Fig. 25, b), barium nitrate (Fig. 32, b) and barium carbonate (Fig. 35, b) leads to the conclusion that the synthesis of barium phosphates from its carbonate is not effective.

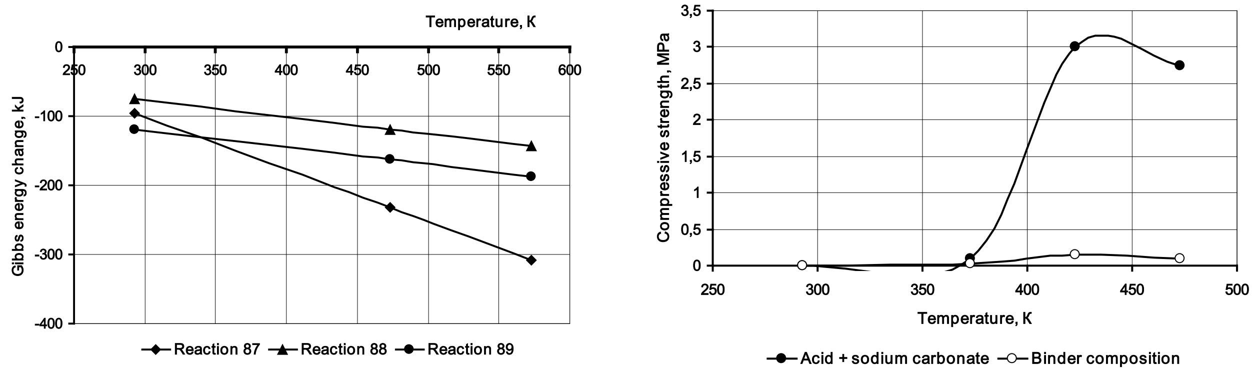
Two types of sodium carbonates are common in different fields of technology (**ordinary Na_2CO_3** and **acidic $NaHCO_3$**), so the reactions of both of these salts with

orthophosphoric acid are subjected to thermodynamic analysis:

$$3Na_2CO_3 + 2H_3PO_4 \rightarrow 2Na_3PO_4 + 3CO_2\uparrow + 3H_2O\uparrow \quad (87)$$
$$Na_2CO_3 + H_3PO_4 \rightarrow Na_2HPO_4 + CO_2\uparrow + H_2O\uparrow \quad (88)$$
$$Na_2CO_3 + 2H_3PO_4 \rightarrow 2NaH_2PO_4 + CO_2\uparrow + H_2O\uparrow \quad (89)$$

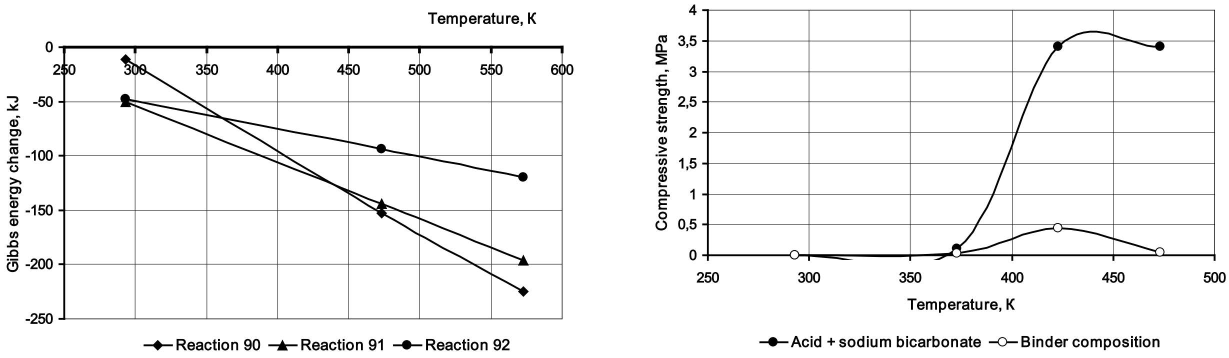
$$3NaHCO_3 + H_3PO_4 \rightarrow Na_3PO_4 + 3CO_2\uparrow + 3H_2O\uparrow \quad (90)$$
$$2NaHCO_3 + H_3PO_4 \rightarrow Na_2HPO_4 + 2CO_2\uparrow + 2H_2O\uparrow \quad (91)$$
$$NaHCO_3 + H_3PO_4 \rightarrow NaH_2PO_4 + CO_2\uparrow + H_2O\uparrow \quad (92)$$

The change in free energy for reactions (87)…(89) is shown in Fig. 36 (a), and for reactions (90)…(92) – in Fig. 37 (a). The strength of the samples using these salts is shown in Fig. 36 (b) and Fig. 37 (b).



a b

Fig. 36 – Gibbs energy change in the range from 293 to 573 K for the reaction of interactions of sodium carbonate with orthophosphoric acid (a) and compressive strength of samples (b)



a b

Fig. 37 – Gibbs energy change in the range from 293 to 573 K for the reaction of interactions of sodium hydrogen carbonate with orthophosphoric acid (a) and compressive strength of samples (b)

As expected, the chemical interaction of the components and its results are almost identical. Both forms of sodium carbonate react with orthophosphoric acid at normal temperature, but the presence of H_2O as a reaction product requires heating to ensure solidification of the samples. Analysis of the mass ratios for reactions (87)…(89) shows that in the first sample (acid + sodium carbonate) a mixture of sodium phosphates should be formed. In the second sample (binder composition), no

more than 28% of sodium carbonate may react, and the resulting product is trisubstituted sodium phosphate.

A similar analysis of reactions (90)…(92) showed that in the first sample (acid + sodium bicarbonate) the binder is represented mainly by acidic sodium phosphates. In the second sample (binder composition) almost 44% of sodium hydrogen carbonate can react, which provided higher strength of the samples – 0.44 MPa in Fig. 37 (b) against 0.15 MPa in Fig. 36 (b).

Theoretical conclusions made during the analysis of chemical transformations were confirmed by X-ray phase analysis of the composition of sodium carbonate with orthophosphoric acid (Fig. 38).

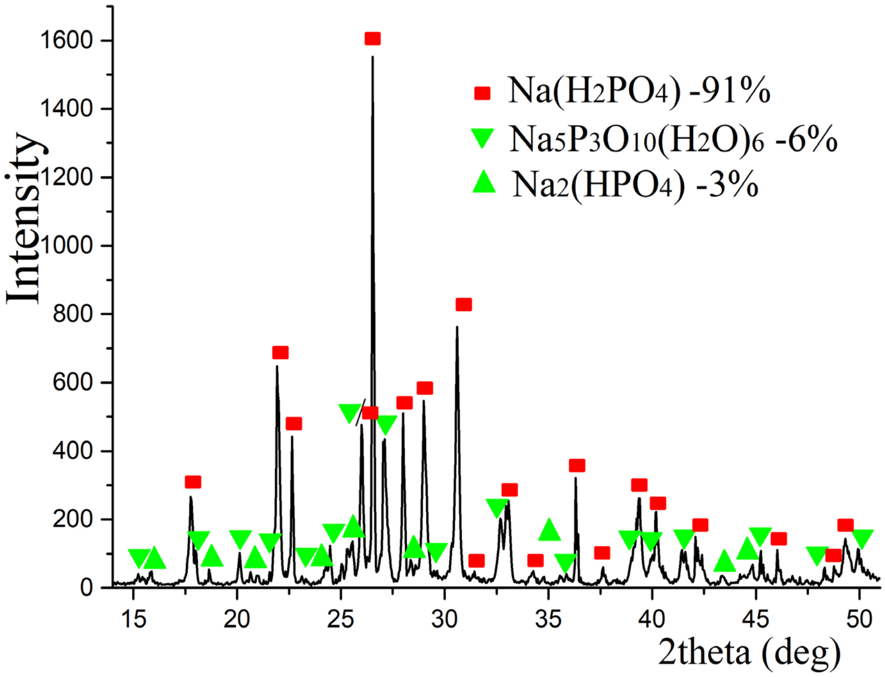


Fig. 38 – X-ray phase analysis of the composition of sodium carbonate (1 mass part) with orthophosphoric acid (1.5 mass parts) after heat treatment at 423 K

The sample revealed 91% monosubstituted phosphate NaH_2PO_4 and 3% disubstituted sodium phosphate Na_2HPO_4. Also identified 6% of the crystal hydrate sodium tripolyphosphate $Na_5P_3O_{10} \cdot 6H_2O$, which was formed by the reaction:

$$5Na_2CO_3 + 6H_3PO_4 \rightarrow 2\ Na_5P_3O_{10} \cdot 6H_2O + 5CO_2\uparrow \quad (93)$$

3 mol of H_2O are not enough for the formation of $Na_5P_3O_{10} \cdot 6H_2O$ in this reaction. The formation of this compound is logical given the water added to the mixture and the 15% content of H_2O in the orthophosphoric acid solution.

There are a number of transformations in the investigated sample during heating of the formed binder. They were detected by differential thermal analysis (Fig. 39).

The first endothermic effect, observed at 169 °C, was associated with dehydration of sodium hexahydrous tripolyphosphate. After dehydration, the sample consists of 92.5% dihydrogen phosphate, 4.5% anhydrous tripolyphosphate and 3% sodium hydrogen phosphate.

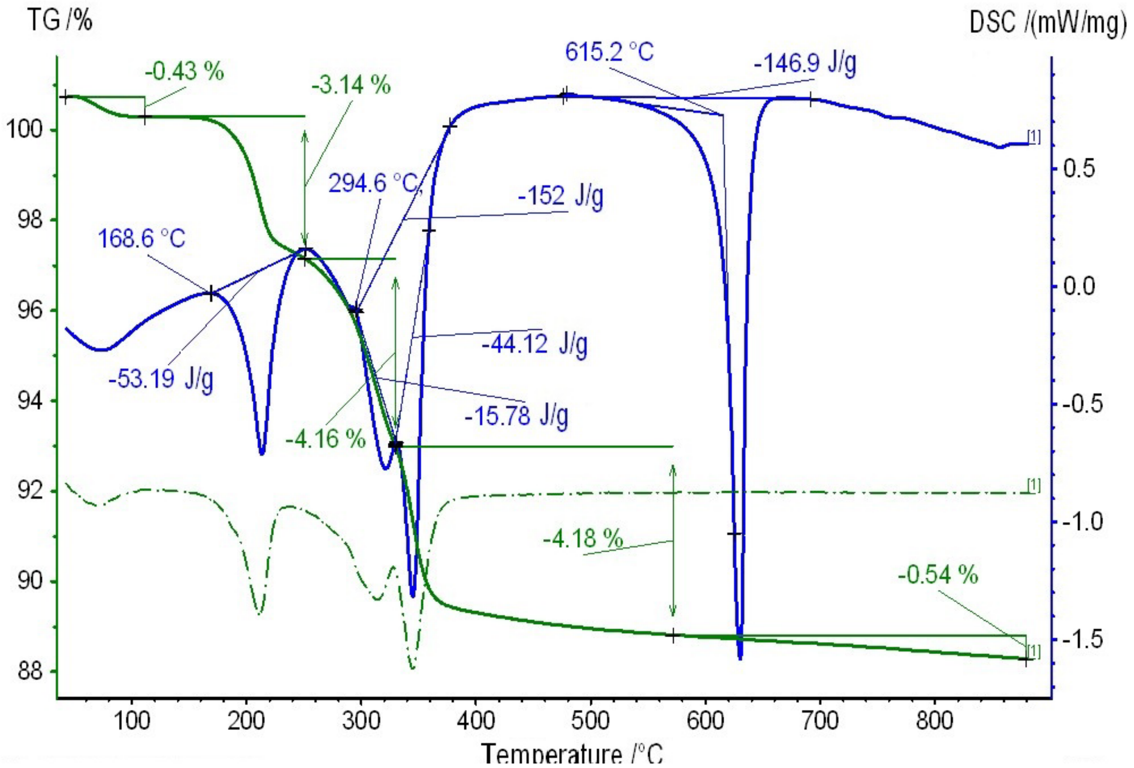


Fig. 39 – Differential thermogravimetric analysis of the composition of sodium carbonate (1 mass part) with orthophosphoric acid (1.5 mass parts) after heat treatment at 423 K

The double endothermic effect, which begins at 295 °C, corresponds to the conversion of acidic sodium phosphates. According to data [35-37], acidic sodium phosphates after decomposition are converted mainly into metaphosphate. Here are the following reactions:

$$NaH_2PO_4 \rightarrow NaPO_3 + H_2O \quad (94)$$

$$2\ Na_2HPO_4 \rightarrow NaPO_3 + Na_3PO_4 + H_2O \quad (95)$$

The weight loss by reaction (94) is 15%, which is 13.6% of the initial weight of the sample. By reaction (95), the weight loss is 6% and 0.2%, respectively. The total weight loss is estimated at about 14%, according to the experiment (see Fig. 39) – about 13%.

As a result of reaction (94) 1 mass part of sodium dihydrogen phosphate gives 0.85 mass parts of sodium metaphosphate. Accordingly, 92.5 mass parts of dihydrogen phosphate contained in the sample give 78.6 mass parts of metaphosphate.

As a result of reaction (95) 1 mass part of sodium hydrogen phosphate gives 0.36 mass parts of metaphosphate and 0.58 mass parts of orthophosphate. Then 3 mass parts of hydrophosphate contained in the sample give 1.1 mass parts of metaphosphate and 1.7 mass parts of orthophosphate.

After these transformations, the sample contains 79.7 mass parts of metaphosphate (92.8%), 1.7 mass parts of orthophosphate (2.0%) and 4.5 mass parts of sodium tripolyphosphate (5.2%).

The greatest thermal effect is observed at a temperature of 615 °C. It

corresponds to the melting of sodium metaphosphate $NaPO_3$, which is observed by various researchers in the temperature range from 480 to 620 °C. The thermal melting effect of this compound [38] is 17.3 kJ/mol, or 168 J/g. Given that in the sample of 92.8% sodium metaphosphate, the thermal effect should be 156 J/g. The thermal analysis curve revealed 147 J/g, which is within the error and clearly indicates a correct interpretation of the transformation.

The presence of a low-melting component limits the scope of the synthesized sodium phosphate binder component. However, there is a positive property: the water solubility of sodium metaphosphate. For example, such a set of properties can be useful for making foundry molds and cores.

These data open the possibility of synthesis of high-strength sodium phosphate binder in the process of direct interaction of orthophosphoric acid with sodium carbonate when heated to 423 K.

Conclusions

Theoretical and practical research of processes in orthophosphoric acid systems with different groups of inorganic metal salts allow us to formulate the most important conclusions:

1. In a number of orthophosphoric acid systems with inorganic metal salts formed by stronger acids, direct synthesis of phosphates by exchange reactions upon heating is possible. The results are confirmed by the negative values of the free energy of the reactions, the strength of the samples with the formed phosphates and the data of the phase analysis. This effect was observed for KCl, KBr and NaCl.

2. Replacement of anhydrous metal salts with crystal hydrates contributes to the intensification of chemical interactions with orthophosphoric acid. This is due to a significant decrease in the value of free energy of direct interaction reactions, which is confirmed for $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, $CoSO_4 \cdot 7H_2O$, $CaCl_2 \cdot 4H_2O$, $MgCl_2 \cdot 6H_2O$.

3. In orthophosphoric acid systems with crystal hydrate sulfates of transition metals, the interaction occurs when heated due to a two-stage process. In the first stage, a part of the crystal hydrate water is cleaved off to form a by-product, a hydroxide, which reacts directly with an orthophosphoric acid, leading to the formation of phosphates. This scheme is confirmed for the system with $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$. Similar transformations obviously occur in systems with $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ and $MnSO_4 \cdot 5H_2O$.

4. Phosphate synthesis in a number of orthophosphoric acid systems with salts of weaker acids or complex salts (Na_2CO_3, $NaHCO_3$, Li_2CO_3, $CaCO_3$, $BaCO_3$, Na_2SO_3, $Na_2S_2O_5$, $Na_2S_2O_8$) occurs at normal temperature, which is confirmed by both thermodynamic analysis and experimental analysis. However, for curing of all compositions it is necessary to heat above 373 K to remove the by-product of the reactions – H_2O.

5. Orthophosphoric acid does not chemically react with some inorganic salts ($NaNO_3$, Li_2SO_4, $Ca(NO_3)_2$, $MnCl_2$) in the studied temperature range. Phosphate synthesis does not occur in such systems. Reactions with these salts are thermodynamically impossible. Also, these salts are not subject to hydrolysis or other

transformations that lead to the formation of intermediates.

6. Not all metal phosphates have been shown to have binding properties. For example, with the guaranteed formation of phosphates in orthophosphoric acid systems with $NiCl_2 \cdot 6H_2O$, $Sr(NO_3)_2$, Li_2CO_3 low strength values are observed. This does not allow us to recommend these binding systems for technical use.

7. Phosphate synthesis in systems with sulfate or chloride salts Na_2SO_3, $Na_2S_2O_5$, $Na_2S_2O_8$, $CaCl_2$, $NiCl_2$, $MnCl_2$ is accompanied by the release of gaseous products with a pungent odor, which limits the possibility of direct synthesis of these phosphates in refractory compositions or other compositions. Priority is given to the use of ready-made (pre-synthesized) phosphates from $Na_2S_2O_8$ or $MnCl_2$, compounds. They can provide reversible hardening of mixtures in combination with water.

8. For the first time, the schemes of synthesis of phosphates of metals investigated in our work can be realized for refractory concretes, for inorganic compositions which are strengthened at insignificant heating, and also molding and core mixtures in foundry production. Depending on the inorganic metal salt used, the synthesized phosphates are endowed with a different set of properties: thermal and chemical resistance, hygroscopicity, water solubility, reusability.

KAPITEL 2 / *CHAPTER 2*
SAFETY AND HYGIENE IN THE CONDITIONS PANDEMIC COVID-19
БЕЗПЕКА ТА ГІГІЄНА ПРАЦІ В УМОВАХ ПАНДЕМІЇ COVID-19

DOI: 10.30890/2709-2313.2021-07-08-006

Вступ

Через пандемію COVID-19 Всесвітній день охорони праці у 2021 році був присвячений питанню зміцнення національних систем безпеки та здоров'я на роботі. У Конвенції 2006 року про основи, що сприяють безпеці та гігієні праці №187 зазначено, що кожна країна має сприяти постійному вдосконаленню безпеки та гігієни праці з метою попередження випадків виробничого травматизму, професійних захворювань і загибелі працівників на виробництві.

Головною метою державної політики України у сфері охорони праці є збереження життя, здоров'я і працездатності людини у процесі трудової діяльності.

Пандемія COVID-19 викликала значні зміни в організації безпеки та гігієни праці на підприємствах та організаціях. Практично всі люди схильні до ризику інфікування коронавірусом. Найбільше цього ризику схильні працівники системи охорони здоров'я, екстрених і соціальних служб.

Джерелами спалаху коронавірусної інфекції є робочі місця, засоби транспорту. Особливо складно дотримуватись правил дистанціювання в метро, де вентиляційна система не завжди забезпечує необхідну кратність повітрообміну.

Крім ризику зараження новою коронавірусною інфекцією, працівники схильні до інших потенційних ризиків, наприклад, посиленням стресу, пов'язаного з новим режимом роботи. Припинення діяльності підприємств, масштабна втрата робочих місць, обмеження пересування та авіаперельотів, режим карантину та самоізоляції призвели до втрати робочого часу та закриття підприємств, високого рівня безробіття, а також нестабільності зайнятості багатьох працівників. У цей період кризи працівники підприємств виявилися особливо схильні до ризиків, пов'язаних з безпекою та гігієною праці.

2.1. Ризики зараження COVID-19

Нові методи роботи в умовах пандемії можуть створювати нові ризики у сфері безпеки та гігієни праці, у тому числі ризики, пов'язані з впливом хімічних речовин, психосоціальні та ергономічні ризики.

У зв'язку з безпрецедентною надзвичайною ситуацією в галузі охорони здоров'я урядам довелося вжити невідкладних заходів для стримування поширення вірусу, встановлюючи нові правила, керуючи інформацією про пандемію та заходи захисту та організуючи термінові дії на основі соціального діалогу з роботодавцями та працівниками.

Хоча основна відповідальність за запобігання розповсюдженню інфекції COVID-19 та інших криз у галузі охорони здоров'я лежить у широкому

розумінні на системі охорони здоров'я, дії суб'єктів сфери праці, особливо в галузі охорони праці, мають вкрай важливе значення у реагуванні на надзвичайні ситуації. Ця криза наголосила на необхідності існування надійної та стійкої системи охорони праці, яка може створити потенціал для подолання майбутніх надзвичайних ситуацій та пов'язаних з ними проблем, а також захисту безпеки та здоров'я трудящих, підтримуючи при цьому життєздатність підприємств та безперервність їхньої діяльності.

Нещодавні кризи - вибух нітрату амонію в Бейруті в 2020 році, численні стихійні лиха та загрози громадській охороні здоров'я, такі як епідемія лихоманки Ебола, виявились перевіркою на міцність системи реагування на надзвичайні ситуації та мали серйозні наслідки для безпеки та здоров'я трудящих. Криза COVID-19 ясно продемонструвала необхідність у міцній організаційній структурі охорони праці.

Ключові компоненти національної системи охорони праці, що націлені на запобігання ризикам у галузі безпеки та гігієни праці та реагування на них, згруповані у шість основних напрямків: національна нормативно-правова база у галузі безпеки та гігієни праці; національна організаційна структура безпеки та гігієни праці; служби гігієни праці; інформаційні та консультаційні послуги та професійна підготовка у галузі безпеки та гігієни праці; збір та аналіз даних та науково-дослідна робота в галузі безпеки та гігієни праці; механізми зміцнення системи управління охороною праці лише на рівні підприємств.

2.2. Нормативно-правова база в галузі безпеки та гігієни праці

У кожній компанії, підприємстві чи організації відповідно до ст. 10 Закону України від 6 квітня 2000 р. № 1645-ІІІ «Про захист населення від інфекційних хворіб», необхідно дотримуватись санітарно-гігієнічних та санітарно-протиепідемічних правил і норм при здійсненні будь-яких видів діяльності. Відповідно до ст. 7 Закону України від 24 лютого 1994 року № 4004-ХІІ «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення», підприємства, установи та організації зобов’язані розробляти й здійснювати санітарні та протиепідемічні заходи.

Відповідно до вимог «Директиви 89/391/ЄЕС Ради про введення заходів, що сприяють поліпшенню безпеки і гігієни праці працівників на виробництві» та ДСТУ OHSAS 18001:2010 «Системи управління гігієною та безпекою праці», розроблені заходи мають включати оцінку ризику на робочому місці, яка охоплює всі біологічні небезпеки, визначені як вітчизняним, так і міжнародним законодавством.

Пандемія COVID-19 наголосила на необхідності в нормативно-правовій базі в галузі безпеки та гігієни праці, яка має бути всеосяжною, визначати основні права та обов'язки, охоплювати всіх працівників та враховувати всі ризики, пов'язані з безпекою та гігієною праці. Вона також має бути функціональною та гнучкою, що дасть можливість в терміновому порядку вживати належних заходів для того, щоб протистояти непередбаченим обставинам та знижувати схильність до нових, виникаючих та існуючих

ризиків, пов'язаних з безпекою та гігієною праці.

У багатьох країнах з метою скорочення поширення вірусу на робочому місці були прийняті нові нормативні положення, що враховують конкретні потреби та умови в різних секторах, з докладними процедурами та протоколами щодо профілактики поширення та боротьби з COVID-19 на робочому місці, включаючи тимчасове закриття робочих місць, вимоги щодо фізичного дистанціювання, організації віддаленої роботи, безпечного користування громадським транспортом, використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) та ін.

Можливість визнання захворювання на COVID-19 виробничою травмою (професійним захворюванням або нещасним випадком на виробництві) та способи доказу визначаються національною нормативно-правовою базою.

В даний час у ряді країн допускається визнання захворювання COVID-19 нещасним випадком на виробництві або професійним захворюванням щодо працівників системи охорони здоров'я та персоналу екстрених служб, працівників служб, пов'язаних із життєзабезпеченням.

У більшості країн реєстрація та повідомлення про випадки виробничого травматизму та професійних захворювань є обов'язком підприємств. У країнах, де COVID-19 був визнаний виробничою травмою (нещасним випадком на виробництві або професійним захворюванням), випадок інфікування має бути зареєстрований відповідно до існуючих вимог. Тому очевидно, що ефективна система реєстрації та повідомлення особливо важлива та корисна в таких надзвичайних ситуаціях, оскільки вона дозволяє забезпечити збирання точних даних та оперативно виявити спалахи вірусу.

З метою сприяння таким вимогам щодо реєстрації органи охорони праці та інші відповідальні органи у співпраці з соціальними партнерами повинні інформувати роботодавців та працівників про їх обов'язки щодо реєстрації та повідомлення. Наприклад, у Північній Ірландії (Сполучене Королівство) виконавчий орган з питань охорони праці надає перелік критеріїв, керуючись яким роботодавці можуть визначити, коли вони повинні повідомляти уряд про випадок COVID-19 або про небезпечну подію.

Статистика інспекції праці також може надавати достовірні дані про виробничі травми та професійні захворювання, дотримання вимог щодо безпеки та гігієни праці та інших аспектів охорони праці.

2.3. Небезпека роботи медичного персоналу

Професійна захворюваність медичного персоналу пов’язана з виконанням професійних обов’язків в умовах підвищеного ризику зараження на COVID-19. Апріорна оцінка небезпеки лікарняного середовища в інфекційних стаціонарах без проведення лабораторно-інструментальних досліджень доцільна і можлива під час роботи закладів у штатному режимі. У випадку епідемічних ситуацій виникає необхідність у перевірці принаймні таких питань, як ефективність роботи вентиляції, виробничого освітлення, умов для відпочинку під час регламентованих перерв, дотримання медичним персоналом вимог і правил

особистої гігієни.

ВООЗ для забезпечення безпечного і комфортного перебування медичного персоналу у реанімаційних відділеннях з хворими на COVID-19 рекомендує подачу чистого повітря у приміщення не менше 160 л/с на одного пацієнта. В обстежених закладів не виконуються державні вимоги з безпеки і гігієни праці (охорони праці) щодо забезпечення адекватними засобами індивідуального захисту (ЗІЗ), що, безумовно, збільшує ризик зараження медичних працівників вірусом SARS-CoV-2.

Роботу представників охорони здоров’я, зайнятих подоланням пандемії COVID19, за критеріями Гігієнічної класифікації праці, через загрозу зараження високопатогенним коронавірусом SARS-CoV-2 віднесено до небезпечної (екстремальної). Небезпеку роботи медичного персоналу підсилюють високе нервово-емоційне напруження, супутні фізичні і хімічні чинники. Небезпеку зараження медичних працівників вірусом SARS-CoV-2 підвищує дефіцит ЗІЗ, неправильне їх використання, неефективна робота загальнообмінної вентиляції. Виникненню травм (падінь) і аварій (уколів, подряпин голкою, порізів склом під час відкриття ампул) великою мірою сприяє, можливо, недостатнє та нераціональне виробниче освітлення. Робота у небезпечних умовах праці, які формуються у закладах, зокрема в інфекційних стаціонарах, призводить до високих рівнів захворюваності медичних працівників на коронавірусну хворобу COVID-19. За питомою вагою медичних працівників, які захворіли (близько 20%), Україна випереджає інші країни Європи і світу. Серед медичних працівників, яким поставлено діагноз гострого професійного захворювання COVID-19, переважають медичні сестри (38 %), молодші медичні сестри (22,7 %), лікарі-анестезіологи (5,8 %), лікарі загальної практики – сімейної медицини (4,18%), терапевти (4,09%). Заходи з попередження захворюваності медичних працівників на коронавірусну хворобу COVID-19 і підвищення безпеки лікарняного середовища мають бути спрямованими на більш жорстке дотримання вітчизняного законодавства і нормативнометодичних вимог щодо охорони праці медичного персоналу та інфекційного контролю у закладах у частині протиепідемічних і санітарно-гігієнічних заходів.

Кабінетом міністрів України (Постанова від 17 квітня 2019 р. № 337) затверджений Порядок розслідування та обліку нещасних випадків, професійних захворювань та аварій на виробництві (із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 1 від 05.01.2021).

Встановлена процедура розслідування випадків смерті медичних працівників державних і комунальних закладів охорони здоров’я, що надають первинну, екстрену, а також в стаціонарних умовах вторинну (спеціалізовану) і третинну (високоспеціалізовану) медичну допомогу пацієнтам з гострою респіраторною хворобою COVID-19, спричиненою коронавірусом SARS-CoV-2, внаслідок інфікування коронавірусом SARS-CoV-2.

Розслідування випадків смерті медичних працівників державних і комунальних закладів охорони здоров’я, що надають первинну, екстрену, а також в стаціонарних умовах вторинну і третинну медичну допомогу

пацієнтам з гострою респіраторною хворобою COVID-19, спричиненою коронавірусом SARS-CoV-2, внаслідок інфікування коронавірусом SARS-CoV-2 під час виконання професійних обов’язків в умовах підвищеного ризику зараження збудниками інфекційних хвороб проводиться комісією з розслідування гострого професійного захворювання COVID-19, спричиненого коронавірусом SARS-CoV-2, що призвело до смертельного наслідку, утвореною керівником закладу охорони здоров’я, в якому працював медичний працівник.

Перелік державних і комунальних закладів охорони здоров’я, що надають первинну, екстрену, а також в стаціонарних умовах вторинну і третинну медичну допомогу пацієнтам з гострою респіраторною хворобою COVID-19, спричиненою коронавірусом SARS-CoV-2, визначається керівником робіт з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації медико-біологічного характеру державного рівня, пов’язаної із поширенням COVID-19.

Керівник закладу охорони здоров’я, в якому працював медичний працівник, смерть якого настала внаслідок інфікування коронавірусом SARS-CoV-2 під час виконання професійних обов’язків в умовах підвищеного ризику зараження збудниками інфекційних хвороб, зобов’язаний не пізніше наступного робочого дня з моменту отримання інформації про випадок смерті медичного працівника надати повідомлення у паперовій формі територіальному органу Держпраці; робочому органу Фонду; уповноваженому органу управління або наглядовій раді закладу охорони здоров’я.

Комісія утворюється у складі голови та членів комісії наказом керівника закладу охорони здоров’я не пізніше наступного робочого дня з дня надсилання повідомлення про настання нещасного випадку.

Розслідування гострого професійного захворювання COVID-19, що призвело до смертельного наслідку, проводиться комісією протягом п’яти робочих днів з дня її утворення. Комісія з’ясовує обставини та причини настання гострого професійного захворювання COVID-19, що призвело до смертельного наслідку, визначає пов’язане чи не пов’язане гостре професійне захворювання COVID-19, що призвело до смертельного наслідку, з виробництвом.

Керівник закладу охорони здоров’я повинен надіслати оригінали актів за формою Н-1 протягом двох робочих днів після їх затвердження: територіальному органу Держпраці за місцем настання випадку гострого професійного захворювання COVID-19, що призвело до смертельного наслідку; робочому органу Фонду за місцем настання випадку гострого професійного захворювання COVID-19; членам сім’ї медичного працівника, що помер внаслідок інфікування, або уповноваженим ними особам.

2.4. Вимоги до організації робочих міст

Оскільки робочі місця можуть стати джерелом спалаху вірусної інфекції, проблеми, пов'язані з охороною праці, слід вирішувати в рамках заходів у відповідь на кризу, що вживаються на національному рівні, і отже, в обговоренні таких заходів повинні брати активну участь компетентні органи

охорони праці.

Міжнародна організація із стандартизації (ISO) розробила новий стандарт ISO/PAS 45005:2020 «Система менеджменту охорони здоров'я та безпеки праці. Загальні рекомендації щодо безпеки праці під час пандемії COVID-19». Цей документ підготовлено Технічним комітетом ISO/TC 283, Управлінням охороною праці та безпекою. Зазначений стандарт розроблено з метою надання допомоги роботодавцям щодо здійснення заходів щодо охорони праці в умовах пандемії, захисту працівників у процесі трудової діяльності.

Організація повинна гарантувати, що робочі місця (включаючи всі приміщення, майданчики та інші місця, де виконується робота, у тому числі за межами будівлі) та приміщення на цих робочих місцях чисті та безпечні для використання.

Щоб підготуватися до безпечної експлуатації, організація має як мінімум:

а) оцінити всі приміщення, ділянки або частини ділянок, у тому числі ті, що були закриті або частково функціонують;

б) розробити заходи щодо запобігання проникненню потенційно заразних людей на робоче місце (наприклад, шляхом надання інформації до відвідування або плакатів із зазначенням, що люди не повинні входити на робоче місце із симптомами COVID-19);

в) виконувати перевірки технічного обслуговування та роботи з обладнанням та системами;

г) оцінювати та контролювати ризики, пов'язані з легіонелою та іншими захворюваннями, пов'язаними з водою, щоб не створювати інших ризиків для здоров'я, особливо якщо водні системи (включаючи деякі типи кондиціювання повітря) не використовувалися протягом певного періоду часу або якщо використання було зменшено;

д) встановити розширені та/або частіші графіки чищення та дезінфекції (наприклад, шляхом збільшення робочого часу та/або кількості робітників, що виконують прибирання, та заохочення інших робітників до регулярного чищення та дезінфекції своїх робочих зон та обладнання);

е) забезпечити покращені засоби особистої гігієни, включаючи додаткові місця для миття рук, де це можливо, та точки дезінфекції рук, де це неможливо (включаючи відкриті майданчики, що використовуються для роботи або перерв), забезпечуючи доступ до цих засобів для працівників з обмеженими можливостями;

ж) координувати та співпрацювати з іншими організаціями на загальних майданчиках, у тому числі з підрядниками, керуючими агентами, орендодавцями та іншими орендарями, забезпечуючи облік як звичайних операцій, так і планів дій у надзвичайних ситуаціях.

Організація повинна також вжити подальших дій, якщо це застосовно, включаючи:

а) глибоке прибирання та дезінфекція робочих місць та обладнання;

б) дезінфекція кранів, душових та інших джерел води за допомогою продуктів, що відповідають офіційним вимогам для використання проти COVID-19, та промивання перед використанням;

в) максимальне збільшення кількості зовнішнього повітря та змін повітря в приміщенні за допомогою систем вентиляції (з відповідною фільтрацією та тривалістю роботи), відключення систем рециркуляції повітря та максимально можливе утримання дверей та вікон відчиненими;

г) забезпечення того, щоб туалетні приміщення керувалися для забезпечення безпечного використання;

д) перезапуск та перевірка спеціального обладнання, яке не використовувалося довше звичайного;

е) випробування систем пожежної безпеки, включаючи блоки з батарейним живленням, такі як аварійне освітлення та сигналізація;

ж) встановлення знаків та розмітки на підлозі та/або стінах для позначення рекомендованої фізичної відстані, забезпечення того, щоб розмітка була простою, чіткою та достатньо великою, щоб її могли бачити люди з ослабленим зором;

з) створення фізичних бар'єрів для примусового фізичного дистанціювання максимально можливо там, де це безпечно, без введення нових інших ризиків або негативного впливу на людей з обмеженими можливостями;

и) створення робочих зон для обмеження кількості людей у будь-якій області;

к) обмеження кількості людей, які використовують устаткування, що спільно використовується, шляхом створення робочих груп або пар і закріплення їх за призначеним спільно використовуваним обладнанням;

л) створення точок очищення та дезінфекції, щоб робітники могли протирати поверхні та обладнання протягом робочого дня;

м) реорганізація пересувного обладнання, столів та робочих місць для забезпечення фізичного дистанціювання;

н) фіксація дверей у відкритому стані для зменшення торкання дверних ручок (за виключення дверей, необхідних для забезпечення пожежної безпеки, безпеки або конфіденційності);

о) створення процесів для безпечного входу та виходу з робочих місць;

п) встановлення систем з одностороннім рухом у коридорах, сходах та інших місцях загального користування, встановлення знаків та розмітки на підлозі або стінах, а також вживання інших заходів щодо зниження ризиків там, де це неможливо;

р) визначення безпечних способів використання ліфтів, включаючи обмеження потужності, та забезпечення передачі інструкцій щодо безпечного використання як усередині, так і зовні ліфтів;

с) надання робочих додаткових зовнішніх просторів для повсякденної роботи, зустрічей та перерв, де це можливо.

Організації слід розробити та передати процеси для управління передбачуваними та підтвердженими випадками COVID-19.

Щоб обмежити можливе проникнення COVID-19 на робоче місце, організація повинна вжити заходів для оцінки людей, що входять до будівлі, і запобігання входу тих, хто має симптоми, які нещодавно приїхали в райони зі значним поширенням хвороби серед населення або з них, або хто контактували

ISBN 978-3-949059-44-5

із людьми, інфікованими COVID-19.

Керівництво та менеджери на всіх рівнях повинні підтримувати співробітників у вжитті негайних заходів із самоізоляції у разі появи у них симптомів COVID-19 або поміщати їх у карантин, якщо це необхідно, а також розуміти існуючі процеси та те, що від них очікується щодо повідомлення, самоізоляція або карантин та повернення до роботи.

Про спалахи COVID-19 в організації слід повідомляти відповідні регулюючі органи та органи охорони здоров'я

2.5. Управління захворюванням на робочому місці

Щоб звести до мінімуму передачу COVID-19 та захистити осіб, які надають першу допомогу, включаючи осіб, які надають першу допомогу, та людину, яку вони лікують, до будь-якої людини, яка захворіла на робочому місці, слід ставитися як до потенційного випадку COVID-19.

Організація повинна проконсультуватися з працівниками, які відповідають за надання першої допомоги, щоб визначити, чи хочуть вони і можуть продовжувати виконувати цю роль, беручи до уваги індивідуальні обставини (наприклад, чи вважається працівник більш схильним до ризику зараження COVID-19 або серйозного захворювання. від COVID- 19, живе в сім'ї з кимось із групи підвищеного ризику або якщо працівник переймається підвищеним ризиком зараження).

Організація повинна:

а) надати відповідні ЗІЗ (наприклад, захисні маски, рукавички, халати) та маски та дати вказівки, як їх слід використовувати особам, які надають першу допомогу (слід приділити увагу людям, яким необхідно читати по губах, а в такій ситуації – прозоре обличчя екрани) слід використовувати разом із фізичним дистанціюванням;

слід використовувати інші форми комунікації, такі як лист, якщо використання прозорих лицьових щитків та фізичне дистанціювання неможливе);

б) ізолювати хворого на час надання першої допомоги або, якщо необхідно, організувати транспортування з робочого місця (наприклад, транспорт може бути наданий членом тієї ж сім'ї);

в) надати потерпілому маску (слід приділити увагу людям з основними захворюваннями, що впливають на дихання) і попросити їх вимити або продезінфікувати руки;

г) вимагати від постраждалого залишити робоче місце, використовуючи безпечний спосіб транспортування (наприклад, уникаючи громадського транспорту, якщо це можливо), у відповідне безпечне місце (наприклад, додому або до медичного закладу);

д) порадити постраждалому запросити тест на COVID-19, якщо у нього розпізнані симптоми, та поінформувати організацію про результат;

е) встановити, чи торкнувся працівник у тісному контакті з іншими працівниками або клієнтами (наприклад, виконуючи робочу діяльність без

фізичного дистанціювання в команді або парі, надаючи послуги тісного контакту), та проінформувати цих працівників або клієнтів про можливий контакт з COVID-19, збереження конфіденційності щодо джерела потенційного впливу та надання підтримки постраждалим працівникам для негайної самоізоляції або карантину;

ж) зберігати дані про інших працівників, які контактували з постраждалими працівниками, у разі підтвердження COVID-19 та наявності ширшої вимоги щодо самоізоляції;

з) забезпечити ізоляцію ділянок, у яких перебував потерпілий, або їх очищення та дезінфекцію якнайшвидше, приділяючи особливу увагу обладнанню, яке часто стосується поверхонь (наприклад, дверних ручок, кнопок ліфтів) та місць загального користування, таких як туалети;

и) гарантувати, що робітники, які виконують очищення або дезінфекцію уражених ділянок, використовують відповідні ЗІЗ та дотримуються узгоджених безпечних методів роботи на основі оцінки ризиків;

к) інформувати органи охорони здоров'я, наприклад, якщо два або більше підтверджених випадків COVID-19 пов'язані з робочим місцем;

л) дати чітке керівництво про те, коли працівникові, який перехворів на COVID-19, можна безпечно повернутися на робоче місце;

м) надати інформацію про заходи, які можуть бути здійснені для полегшення повернення до роботи, постійної підтримки та реабілітації, залежно від ситуації.

2.6. Психологічне здоров'я та благополуччя працівників

Організація повинна встановити процеси для управління впливом пандемії на психологічне здоров'я та добробут працівників.

На психологічне здоров'я та благополуччя можуть впливати психосоціальні небезпеки, такі як:

а) невизначеність (наприклад, щодо того, що очікується, як довго можуть тривати домовленості, вплив на заробітну плату або робочий час);

б) робоче навантаження та темп роботи (наприклад, занадто багато або занадто мало роботи, очікування дотримання коротких термінів, навіть якщо діяльність займає більше часу через змінені способи роботи);

в) робочий час (наприклад, непередбачуваний годинник, скорочений або збільшений годинник, нові режими змін);

г) неоднозначність ролей (наприклад, зміна того, що очікується від ролі, нові ролі, відсутність ясності);

д) відсутність контролю (наприклад, швидкі зміни рівнів ризику, що ведуть до раптового введення в дію або послаблення обмежень або змінених способів роботи);

е) відсутність соціальної підтримки (наприклад, самотність, фізична ізоляція, проблеми зі спілкуванням);

ж) наслідки тривалої ізоляції та віддаленої роботи (наприклад, надмірна дія екранів, втома, нудьга, відсутність концентрації, безсоння);

 ISBN 978-3-949059-44-5

з) незахищеність роботи (наприклад, занепокоєння щодо можливої втрати роботи, внутрішні фінансові проблеми);

и) труднощі поєднання роботи та сімейного життя (наприклад, обов'язки з догляду, надзвичайні сімейні обставини, необхідність працювати у неробочий час);

к) особливі ролі, пов'язані з підвищеним ризиком через часті, тісні або тривалі взаємодії з іншими людьми (наприклад, на передньому плані, на публіці, мобільна робота);

л) особливі обставини працівника (наприклад, приналежність до вразливої групи, важка втрата чи серйозне захворювання у ній).

Для управління ризиками для психологічного здоров'я та благополуччя, пов'язаними з COVID-19, організація повинна:

м) просувати культуру довіри, турботи та підтримки, визнаючи, що окремі працівники стикаються з різними проблемами і що занепокоєння чи труднощі дійсні;

н) дозволяти проводити регулярні конфіденційні зустрічі (віддалені чи фізичні, залежно від ситуації) для обговорення проблем та узгодження способів підтримки працівника;

о) проводити регулярні віддалені чи очні зустрічі з командами працівників;

п) дозволити гнучкий графік роботи та вільний час;

р) допомагати працівникам встановлювати здорові кордони між робочим та неробочим часом, повідомляючи, коли вони, як очікується, будуть працювати та доступні, беручи до уваги необхідність гнучкості;

с) дозволяти працівникам більше контролювати темп роботи та терміни, якщо це можливо;

т) надавати регулярну, ясну та точну інформацію про поточну ситуацію в організації та заплановані зміни, які можуть вплинути на працівників;

у) розглянути можливість надання відповідних ЗІЗ, масок, маскувальних покриттів та інших заходів контролю для працівників, які стурбовані перебуванням на фізичному робочому місці, навіть якщо цього не вимагає організація;

ф) пропонувати додаткові ресурси для допомоги працівникам в управлінні власним психологічним здоров'ям і благополуччям (наприклад, онлайн-програми, веб-сайти, доступ до фахівців, які пропонують консультації з приводу важкої втрати та травм, фінансові консультації).

2.7. Гігієна праці на робочому місті

Організація повинна впроваджувати процеси для підтримки чистоти на робочому місці, зниження ризику передачі COVID-19 із забруднених поверхонь та забезпечення гарної гігієни протягом робочого часу та наприкінці кожної робочої зміни.

Організація повинна переконатися, що працівники обізнані про важливість частого та ефективного миття рук для обмеження передачі COVID-19. Організація повинна повідомити працівників, що:

- руки слід мити чистою (бажано гарячою) водою з милом протягом 20-40 секунд;

- руки повинні бути продезінфіковані дезінфікуючим засобом для рук, що підходить для безпечного та ефективного використання проти COVID-19 (наприклад, що містить мінімум 60% етанолу або 70% ізопропілового спирту), якщо миття рук неможливе;

- руки з видимими забрудненнями слід вимити перед використанням дезінфікуючого засобу для рук, якщо це можливо.

Організація повинна забезпечити відповідність дезінфікуючих засобів для рук відповідним стандартам (наприклад, перевірка типу та концентрації алкоголю на етикетках) та знати про можливість появи на ринку підроблених, низькоякісних чи неправильно складених продуктів.

Організація має впровадити процеси, щоб гарантувати безпеку:

а) працівникам рекомендується мити руки (або продезінфікувати, якщо це неможливо) через часті проміжки часу та повідомляти, коли це слід робити (наприклад, перед входом або виходом на робоче місце, до та після перерв, до та після роботи загальні ресурси, такі як телефони, комп'ютери, інструменти, автомати для напоїв, до та після використання місць загального користування);

б) додаткові засоби для миття рук та/або дезінфекції рук у місцях, де робітники присутні або проходять через них (наприклад, входи, виходи, біля ліфтів, місця загального користування, робочі зони);

в) у розпорядженні робітників є додаткові матеріали для частого очищення та дезінфекції робочих місць та обладнання, у тому числі між їх використанням різними робітниками;

г) часте очищення та дезінфекція поверхонь, до яких регулярно торкаються (наприклад, дверних ручок, вимикачів світла, лічильників, пунктів оплати, поверхонь для тестування, управління ліфтом, загальних ресурсів);

д) ефективне, адекватне та часте видалення відходів, включаючи окреме безпечне видалення відходів одноразових ЗІЗ, одноразових масок та маскувальних покриттів для обличчя;

е) пропагування належної гігієни, включаючи плакати та знаки, що нагадують працівникам про необхідні методи та частоту миття рук, про необхідність уникати дотику до осіб, а також кашляти чи чхати в одноразову серветку чи лікоть;

ж) безпечне використання туалетів, включаючи посилену вентиляцію, посилене та частіше прибирання та дезінфекцію, заохочення використання паперових рушників та керування їх використанням для зменшення скупчення людей;

з) безпечне користування душовими та роздягальнями з виділенням спеціальних приміщень для невеликих груп, де це можливо.

Щоб уникнути передачі інфекції від забруднення поверхонь, організації слід запровадити стаціонарні робочі станції, зони, столи та/або обладнання, а також вимагати від робітників зберігати особисті речі в особистих просторах, таких як шафки чи сумки, забезпечуючи видалення речей з робочого місця.

Організація повинна вжити заходів для зниження ризику передачі COVID-

19 через контакт із предметами, що потрапляють на робоче місце, та транспортними засобами, що використовуються організацією. Організація повинна:

и) обмежувати несуттєві поставки, включаючи особисті поставки працівникам;

к) очищати та дезінфікувати матеріали, обладнання та інші предмети, що надходять на робоче місце;

л) чистити та дезінфікувати точки дотику із загальним обладнанням після кожного використання;

м) регулярно чистити та дезінфікувати транспортні засоби, що використовуються для роботи, у тому числі автомобілі, на яких робітники їдуть додому;

н) збільшити частоту миття рук для працівників, які займаються доставкою, або надати дезінфікуючий засіб для рук, якщо це недоцільно.

2.8. Робочі зони та робочі місця

Організації слід забезпечити дотримання правил фізичного дистанціювання між окремими працівниками у робочих зонах та на робочих місцях, де це можливо.

Щоб сприяти безпечним методам роботи, організації слідує:

а) перевірити робочі зони та, по можливості, перемістіть робочі місця, щоб забезпечити фізичну відстань між ними, звертаючи увагу на простір, необхідний для безпечного переходу на робочі міста та від них, якщо це пов'язано з проходженням інших робітників;

б) розташовувати робочі місць так, щоб робітники розташовувалися пліч-о-пліч, спина до спини або діагонально один до одного, а не віч-на-віч;

в) заблокувати використання деяких робочих місць або використовувати екрани для поділу робітників, якщо робочі місця закріплені на відстані менше від рекомендованого;

г) призначати робочі місця та обладнання окремим працівникам, де це можливо, або командам/парам, де це неможливо (наприклад, центри обробки викликів, навчальні приміщення) та обмежувати «гарячі робочі столи» та інші форми гнучкої роботи основними видами діяльності;

д) використовувати маркери на підлозі або стінах, щоб вказати рекомендовані правила фізичного дистанціювання;

е) встановити фізичні бар'єри для примусового фізичного дистанціювання максимально можливо там, де це безпечно, без введення нових інших ризиків або негативного впливу на людей з обмеженими можливостями;

ж) зменшити кількість робітників у робочій зоні, щоб забезпечити фізичне дистанціювання в обмеженому просторі;

з) обмежити використання предметів, що викликають сильний дотик, та загального обладнання, а також дозволити часті чистки та дезінфекцію.

 ISBN 978-3-949059-44-5

2.9. Загальні заходи на підприємствах

Роботодавці є відповідальними за створення безпечних та здорових умов праці на підприємствах, в тому числі за розроблення конкретних заходів щодо попередження випадків захворювання внаслідок COVID-19. Серед основних рекомендацій, яких необхідно дотримуватися, є: носіння масок, дотримання соціальної дистанції щонайменше в один метр, уникнення великих скупчень людей та регулярне використання антисептиків.

Загальними заходами на підприємствах можуть бути: скорочення фізичних контактів між працівниками, дотримання необхідної дистанції, запровадження позмінної чи дистанційної роботи, ефективність вентиляції робочих приміщень, забезпечення чистоти і гігієни приміщень, організація необхідних умов для миття рук і дезінфекції. У необхідних випадках роботодавець має забезпечити: безкоштовне надання працівникам засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) та їх використання на робочих місцях.

Заходи безпеки та гігієни праці – індивідуальні для кожного підприємства і повинні розроблятися на основі оцінки ризику.

Закладам охорони здоров’я необхідно застосовувати профілактичні заходи, щоб запобігти інфікуванню медичних працівників: дотримання правил інфекційного контролю та використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) – вибір належного типу ЗІЗ та навчання, як його надягати, знімати та утилізувати.

Сучасна система управління охороною праці має враховувати ідентифікацію небезпек і оцінку ризику. На підприємствах необхідно створення безпечних та нешкідливих умов праці, дотримання санітарних норм та правил у виробничому процесі, забезпечення працівників спецодягом, іншими засобами індивідуального захисту, мийними та знешкоджувальними засобами.

Актуальним завданням у сфері охорони праці та промислової безпеки є управління ризиками виникнення нещасних випадків, аварій на виробництві та профілактика, які є обов'язковими складовими системи управління охороною праці на підприємстві.

Висновки

Через пандемію коронавірусу (COVID-19), яка охопила весь світ, у нас змінилося не тільки саме життя, але змін зазнала професійна діяльність. Особливо вплинула пандемія на працю медичних працівників, які безпосередньо надають медичну допомогу пацієнтам, хворим на COVID-19, контактують з пацієнтами під час їх прийому, не знаючи, чи є вони носіями такої інфекції. Це призвело до значної захворюваності медичних працівників на COVID-19.

Пандемія COVID-19 викликала значні зміни в організації безпеки та гігієни праці на підприємствах та організаціях. Практично всі люди схильні до ризику інфікування коронавірусом. Найбільше цього ризику схильні працівники системи охорони здоров'я, екстрених і соціальних служб.

Міжнародна організація із стандартизації (ISO) розробила новий стандарт ISO/PAS 45005:2020 «Система менеджменту охорони здоров'я та безпеки праці. Загальні рекомендації щодо безпеки праці під час пандемії COVID-19». Стандарт розроблено з метою надання допомоги роботодавцям щодо здійснення заходів щодо охорони праці в умовах пандемії, захисту працівників у процесі трудової діяльності. Стандарт встановлює вимоги до організації робочих місць, управління захворюванням на робочому місці, психологічного здоров‘я та добробуту працівників, гігієні праці на робочому місці та ін.

Роботодавці є відповідальними за створення безпечних та здорових умов праці на підприємствах, в тому числі за розроблення конкретних заходів щодо попередження випадків захворювання внаслідок COVID-19.

KAPITEL 3 / *CHAPTER 3*

STUDY ON THE INFLUENCE OF PULSED AND CONTINUOUS-WAVE GENERATION MODES OF LASER RADIATION ON THE RESULTS OF WELDING OF CORROSION- AND HEAT-RESISTANT AISI 321 STEEL IN DIFFERENT SPATIAL POSITIONS

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІМПУЛЬСНОГО ТА НЕПЕРЕРВНОГО РЕЖИМУ ГЕНЕРАЦІЇ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА РЕЗУЛЬТАТИ ЗВАРЮВАННЯ КОРОЗІЙНОСТІЙКОЇ ЖАРОМІЦНОЇ СТАЛІ AISI 321 У РІЗНИХ ПРОСТОРОВИХ ПОЛОЖЕННЯХ

DOI: 10.30890/2709-2313.2021-07-08-002

Вступ

Номенклатура виробів для приладобудівної, авіакосмічної, вагонобудівної, хімічної та інших галузей промисловості включає деталі як малого так і великого розміру, а їх конструкція часто має складну просторову форму із труднодоступними ділянками для зварювання або із криволінійними профілями поверхні [1-5]. Тому виникає потреба виконання різноманітних видів зварювальних з’єднань (стикових, напусткових, таврових, кутових тощо) у різних положеннях (вертикально, горизонтально, на стелі) або навіть у довільному складному просторовому положенні [6-8]. У таких умовах треба не тільки враховувати, але задіяти на користь фізичні ефекти, які супроводжують лазерне зварювання у таких умовах [9-11]. Наприклад, враховуючи сили гравітації та поверхневого натягу можливо впливати на ступінь розкриття каналу проплавлення при переміщенні зварювальної ванни у різних напрямках. За допомогою сканування, регулювання швидкості руху та імпульсного керування потужністю можливо впливати на тепловкладення у зону обробки. За допомогою керованого подавання газової суміші у зварювальну ванну можливо впливати на стабільність формування каналу проплавлення і ступінь поглинання випромінювання у при поверхневій плазмі. Врахування вищезгаданих особливостей може дозволити отримати сукупність технологічних карт процесу під час зварювання контрольних зразків у різних просторових положеннях. Застосування вищезгаданих технологічних прийомів може дозволити використати вищезгадані особливості для підбору таких параметрів процесу, які забезпечують найкращі показники якості і міцності отриманих зварних з’єднань.

3.1. Методика досліджень

У пласких зразках з нержавіючої аустенітної сталі AISI 321 товщиною 3 мм були зроблені провари, при різних варіантах кута нахилу до горизонтальної площини механізму переміщення лазерної головки та струбцини зі зразком, а саме: у вертикальному положенні під кутом 90°; під кутами 60°; 45°; 30° та у нижньому положенні.

За результатами візуального, радіографічного контролю та

металографічних досліджень одержаних зразків виконана оцінка параметрів, що передбачені стандартом ДСТУ EN ISO 13919-1:2015.

3.2. Аналіз результатів візуального контролю

За результатами візуального контролю одержаних проварів у зразках зі сталі AISI 321, встановлено, що на попередньо обраному режимі зварювання (P=4,4кВт, V=6000мм/хв, ΔF=-1мм, захисний газ Ar=30л/хв):

- в залежності від напрямку руху («на підйом» чи «на спуск»), спостерігаються значні зміни у впливі захисного газу на процеси, що відбуваються у зварювальній ванні, а саме, при захисті аргоном та зварюванні «на спуск» зафіксовано відсутність кольорів мінливості при формуванні зварного шва, а при зварюванні «на підйом» в захисному середовищі аргону, спостерігається наявність кольорів мінливості на зварному з'єднанні;
- бризки зафіксовані при використанні неперервного та імпульсного режиму в усіх просторових положеннях, їхня кількість мінімальна при нижньому положенні, дещо зростає при куті нахилу 60° та вертикальному положенні та найвища кількість бризок зафіксовано при лазерному зварюванні на кутах нахилу 30° та 45°;
- при зварюванні «на підйом» у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання при всіх кутах нахилу, верхній валік зварного з'єднання формується з незначним утонінням та з формуванням «гребінця», величина «гребінця» та утоніння збільшується зі збільшенням кута нахилу до горизонтальної площини;
- при зварюванні «на спуск» у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання, встановлено, що верхній валік зварного з'єднання формується з незначним утонінням та з формуванням «гребінця», лише при куті нахилу 30°.

3.3. Аналіз результатів радіографічного контролю

За результатами радіографічного контролю одержаних проварів у зразках зі сталі AISI 321, встановлено, що при зварюванні «на підйом» та «на спуск» у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання (на попередньо обраному режимі P=4,4кВт, V=6000мм/хв., ΔF=-1мм, захисний газ Ar=30л/хв), при всіх кутах нахилу (30-90°) та у нижньому положенні, не було виявлено внутрішніх дефектів у вигляді тріщин, пор, включень і непроварів.

За результатами радіографічного контролю одержаних проварів у зразках зі сталі AISI 321, встановлено, що при зварюванні «на підйом» та «на спуск» у імпульсному режимі генерації лазерного випромінювання (на попередньо обраному режимі P=4,4кВт, імпульс 60/40, 120Гц, V=6000мм/хв, ΔF=-1мм, захисний газ Ar=20л/хв), при всіх кутах нахилу (30-90°) та у нижньому положенні, було виявлено наступні внутрішні дефекти у вигляді одиночних пор або ланцюжків пор:

1. при зварюванні «на спуск» при куті нахилу 30°, виявлено ланцюжки пор

по всій довжині шва, з максимальним розміром пори ∅0,4 мм;

2. при зварюванні «на спуск» при куті нахилу 45°, виявлено одиночну пору розміром ∅0,3 мм;

3. при зварюванні «на спуск» при куті нахилу 60°, виявлено одиночні пори по всій довжині шва, з максимальним розміром пори ∅0,5 мм;

4. при зварюванні «на спуск» при куті нахилу 90°, виявлено 2 ланцюжки пор сумарною довжиною по 25 мм, з максимальним розміром пори ∅0,5 мм;

5. при зварюванні «на підйом» при куті нахилу 30°, виявлено ланцюжки пор по всій довжині шва, з максимальним розміром пори ∅0,3 мм;

6. при зварюванні «на підйом» при куті нахилу 45°, внутрішніх дефектів у вигляді тріщин, пор, включень і непроварів не виявлено;

7. при зварюванні «на підйом» при куті нахилу 60°, виявлено 2 ланцюжки пор сумарною довжиною по 8 мм, з максимальним розміром пори ∅0,3 мм;

8. при зварюванні «на підйом» при куті нахилу 90°, виявлено 3 одиночні пори, з максимальним розміром пори ∅0,3 мм;

9. при зварюванні у нижньому положенні, виявлено ланцюжки пор по всій довжині шва, з максимальним розміром пори ∅0,5 мм.

Аналіз рентгенограм (Таблиця 1) показує тенденцію збільшення як кількості так й розміру пор у зразках зі сталі AISI 321, при зменшенні кута нахилу з 90° до 0° при зварюванні «на спуск» та «на підйом» в імпульсному режимі генерації лазерного випромінювання. Треба відзначити екстремальне мале значення сумарної проекції пор при зварюванні під кутами 45° та 90°. У той же час, варто відзначити, що кількість та розмір одиночних пор (чи протяжність ланцюжків пор) менша при зварюванні «на підйом», у порівнянні з режимом зварювання «на спуск» при одному й тому ж куті при імпульсному режимі генерації лазерного випромінювання.

Таблиця 1 – Зміни сумарної площі проекцій пор, в залежності від зміни режимів параметрів режимів лазерного зварювання зразків зі сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних у різних просторових положеннях

Кут нахилу, °	Сумарна проекція пор, %		
	вгору неперервний режим	вгору імпульсний режим	вниз імпульсний режим
0	0	0,042	0,042
30	0	0,05	0,07
45	0	0,016	0,01
60	0	0,13	0,17
90	0	0,002	0,013

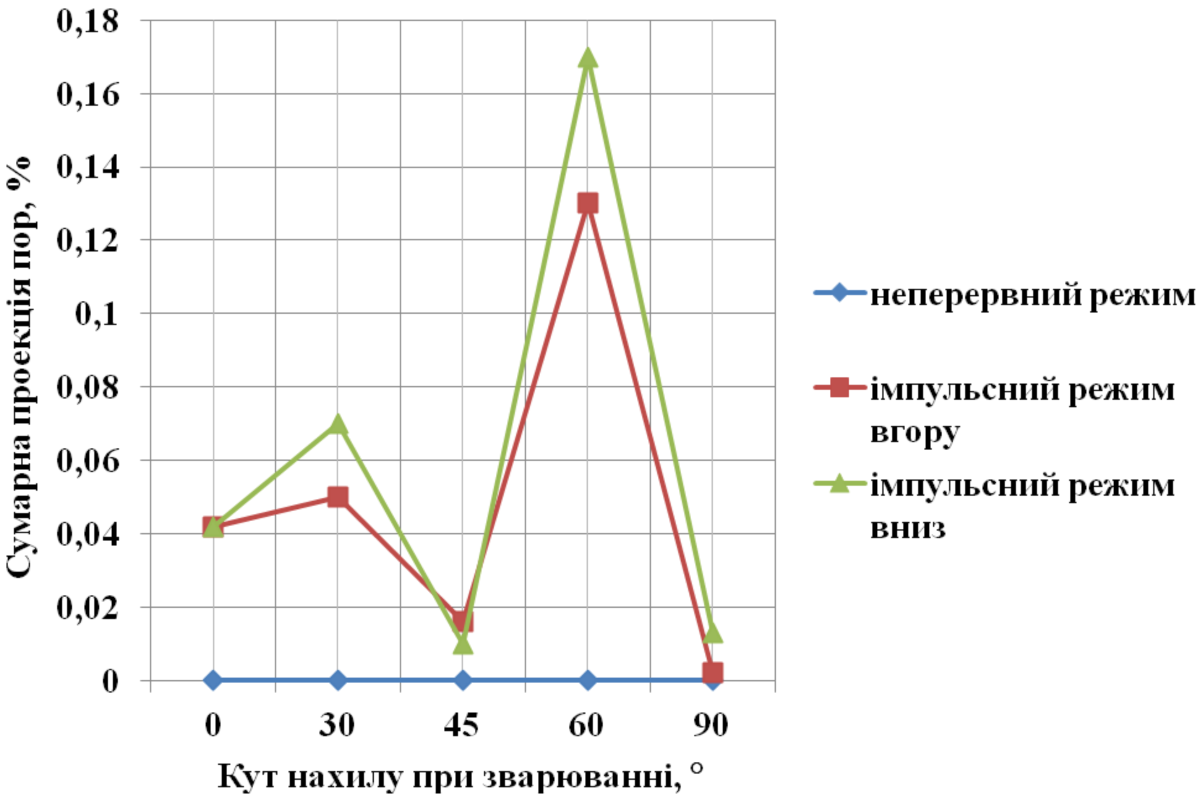


Рис. 1. Графічні залежності зміни сумарної площі проекцій пор, в залежності від зміни режимів параметрів режимів лазерного зварювання зразків зі сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних у різних просторових положеннях

3.4. Аналіз результатів металографічних досліджень

Металографічні дослідження зварних зразків виконувалися відповідно до стандарту ISO 17639: 2003 "Випробування з руйнуванням зразка зварних швів в металевих матеріалах. Макро- і мікроскопічне дослідження зварних швів».

Випробувальні зразки готували для оцінки за допомогою фрезерування, шліфування, полірування і травлення, згідно ISO 16060:2003.

За допомогою оптичної мікроскопії (використовували мікроскоп «Neophot-32») і мікродюрометрічного аналізу, досліджували зразки, які відрізнялися параметрами технологічних режимів.

За допомогою оптичної мікроскопії досліджені зразки, які відрізняються параметрами технологічних режимів. Дослідження проведені на різних ділянках кожного із зразків «зварений шов → зона термічного впливу (ЗТВ) → основний метал». Випробувальні зразки для металографічних досліджень готували, згідно ISO 16060:2003, за допомогою фрезерування, шліфування, полірування на високошвидкісних полірувальних колах з використанням алмазних паст різної дисперсності. Виявлення структури зварних з'єднань проводили шляхом електролітичного травлення в 20% водному розчині хромової кислоти. Дослідження мікроструктури проводилося на металографічному мікроскопі «Neophot-32» при різних збільшеннях. Кількість

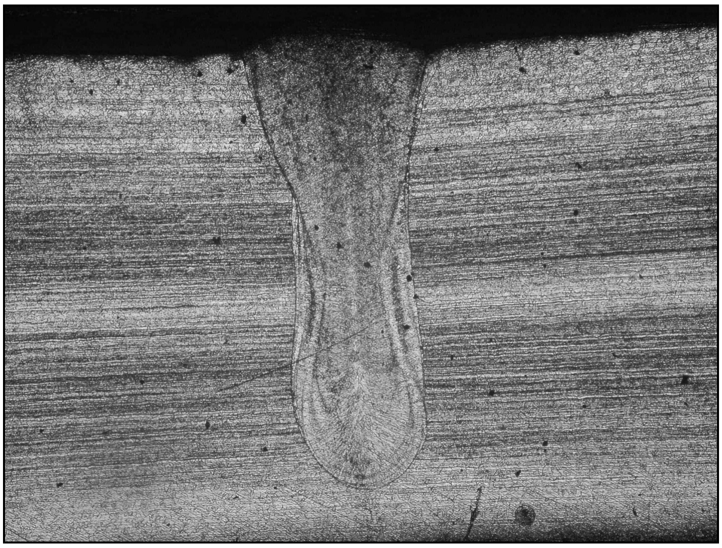
α-фази вимірювали на приладі «Ferritgehaltmessr 1.053». Твердість фазових складових вимірювали на мікротвердомірі «М-400» фірми «LECO». Навантаження становило 1 Н, час витримки 10 с. Розмір аустенітного зерна визначали шляхом порівняння з еталонним шкалами ГОСТ 5639-82. Зображення мікроструктур було отримано за допомогою цифрової фотокамери «Olympys».

На Рис. 2 наведено загальний вид, фотографії структури металу у центрі шва та у лінії сплавлення зварного з'єднання №1366.1, звареного у нижньому просторовому положенні. Структура металу шва зварного з'єднання №1366.1 дисперсна, лита.

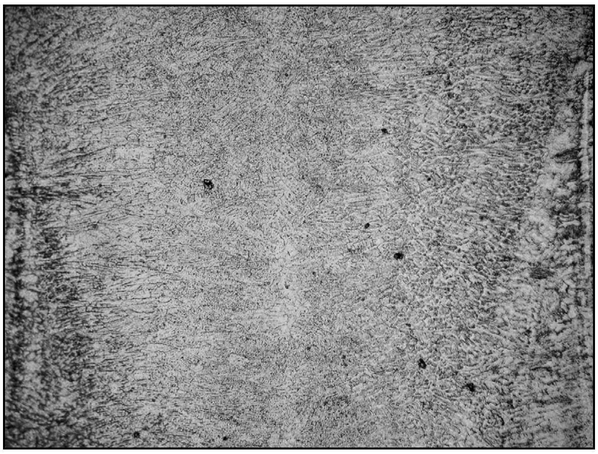
На Рис. 2 видно дві зони: в центральній частині шва по всій висоті комірчасто-дендритна структура, в середній частині шва ближче до лінії сплавлення спостерігається зона тонких стовпчастих кристалітів, що ростуть в напрямку відводу тепла. Зони розділені лінією більш дрібних кристалітів. Мікроструктура в центральній частині шва являє собою аустенітну матрицю і невелику кількість δ-фериту (1,5-1,7%). Розмір комірок становить, в основному, 12-13 мкм. Твердість металу шва зварного з'єднання №1366.1 у центральній частині складає HV1 2950-3090 МПа, є ділянки, де твердість підвищується до HV1 3200-3380 МПа. В нижній частині шва твердість підвищується до HV1 3320-3650 МПа. У лінії сплавлення зварного з'єднання №1366.1, мікроструктура також складається з аустеніту і δ-фериту, структура дрібніша ніж в центрі шва. Ширина кристалітів становить 2-9 мкм. Твердість металу у лінії сплавлення зварного з'єднання №1366.1 складає HV1 2990-3030 МПа, є окремі ділянки, де твердість підвищується до HV1 3160 МПа. У металі шва спостерігаються нітриди (в незначній кількості) і поодинокі шлакові включення. Зона термічного впливу не виражена, структура складається з аустеніту, бал зерна в ЗТВ зварного з'єднання №1366.1 − №6. Твердість ЗТВ зварного з'єднання №1366.1 становить HV1 2650-2840МПа.

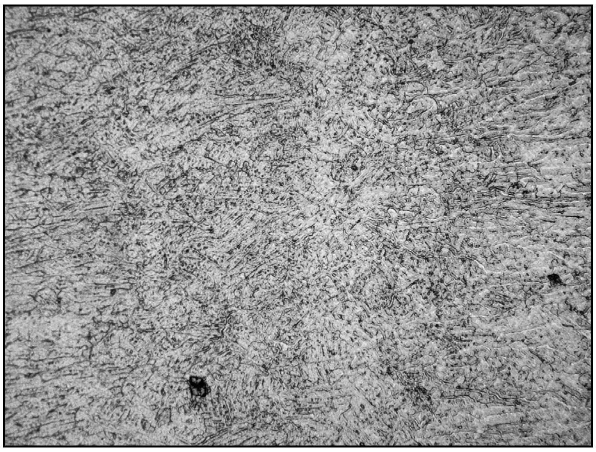
Як показали данні металографічних досліджень, у структурі зварних з‘єднань, одержаних у різних просторових положеннях у сталі AISI 321 товщиною 3 мм, суттєвих змін не відбувається. При різних значеннях кута нахилу площини у якій виконується зварювання, до горизонтальної площини, значення мікротвердості у відповідних зонах, розміри кристалітів, бал зерна у ЗТВ зварного з'єднання не зазнають значних змін. Натомість геометрія одержаних проварів змінюється досить суттєво.

За результатами дослідження зміни геометричних параметрів проварів у сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях, виконаний аналіз результатів дослідження геометрії, структури та характеристик якості зварних з’єднань на відповідність міжнародним стандартам (зокрема ДСТУ EN ISO 13919-1:2015). Одержані дані представлені у Таблицях 2-7. Побудовані графічні залежності (Рис. 3 – Рис. 8), які дозволяють виявити закономірності, характер та ступень впливу складових процесу на поведінку зварювальної ванни при лазерному зварюванні в різних просторових положеннях.

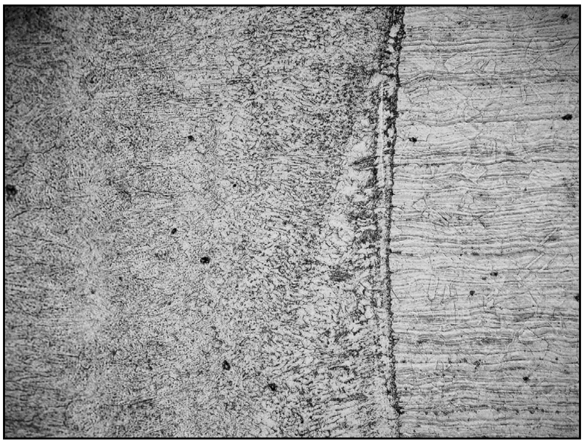


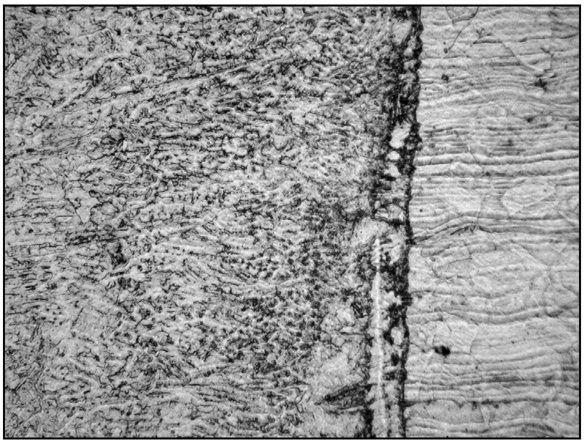
а





б в





г д

Рис. 2. Структура металу у зварному з'єднанні в зразку №1366.1, звареного у нижньому просторовому положенні: а - загальний вигляд ×30; б - центр шва ×200; в- центр шва ×400; г - у лінії сплавлення ×200; д - у лінії сплавлення ×400

При виготовленні контрольних стикових з'єднань товщиною 3,0 мм зі сталі AISI 321, встановлено, що залежність зміни площі провару при збільшенні кута нахилу з 0° до 90°, має нелінійних характер, як при зварюванні на спуск так й при зварюванні вгору, незалежно від режиму генерації лазерного

випромінювання (Рис. 3). Зафіксовано наявність екстремуму, якій на всіх варіантах режимів (окрім імпульсного зварювання вгору) проявляється при куті нахилу 45°. Дане явище можна пояснити як зміною параметрів течій у ванні розплаву так й зміною ступеню впливу газового захисту ванни розплаву. Однак для формулювання остаточних висновків, це явище потребує додаткового всебічного вивчення.

Таблиця 2 – Зміна площі поперечного перерізу зварних з'єднань з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях

Кут нахилу, °	Площа провару, мм^2			
	вгору неперервний режим	вниз неперервний режим	вгору імпульсний режим	вниз імпульсний режим
0	2,317	2,317	0,92	0,92
30	2,505	2,491	1,111	1,315
45	3,034	9,43	1,59	2,356
60	2,6	2,64	2,27	1,31
90	2,584	2,1	1,053	0,72

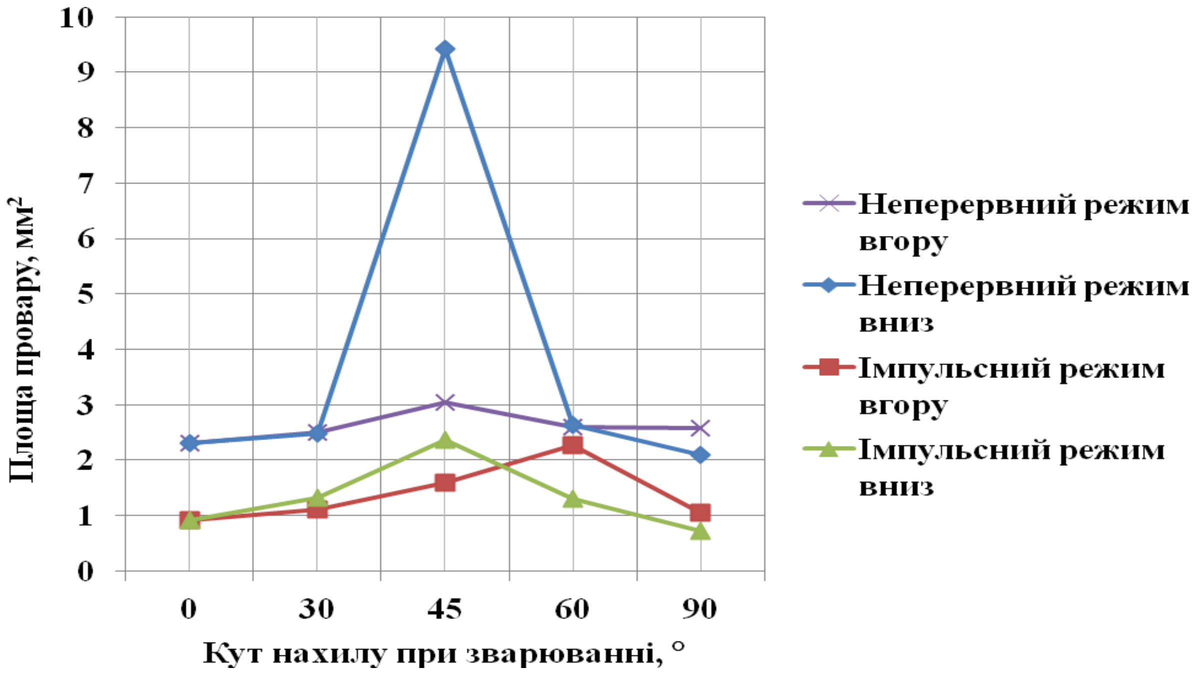


Рис. 3. Залежність зміни площі поперечного перерізу зварних з'єднань з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях

Як, видно, з даних Таблиці 2 та Рис. 3, при зварюванні на спуск у неперервному режимі при куті нахилу 45°, площа зварного з'єднання збільшилася у більш ніж 3 рази, порівняно зі зварюванням на цьому ж режимі

вгору. Вочевидь, це відбувається за рахунок більш тривалого перебування металу зварного з’єднання при температурах вищих за температуру плавлення, що призводить до збільшення об’єму ванни розплавленого металу, та як результат, - й площі зварного з’єднання.

Встановлено, що при зміні режиму генерації лазерного випромінювання з неперервного на імпульсний при куті нахилу зварювання 45°, зберігається та ж сама тенденція збільшення площі провару. Однак різниця у даних носить не такий екстремальний характер.

Треба відзначити, що для залежностей зміни площі поперечного перерізу зварних з’єднань з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях (Рис. 3), було характерним те, що при зміні кута нахилу при лазерному зварюванні на неперервному режимі вгору різниця екстремальних значень характерних максимумів та мінімумів вказаних залежностей не перевищує 24%, тобто відрізняється не більше ніж у 1,25 раз. У той час, коли при зварюванні на спуск у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання, характерні значення екстремумів відповідних залежностей відрізняються майже у 4,5 рази (Рис. 3). При цьому значення площі поперечного перерізу зварних з’єднань у екстремальних точках (при куті нахилу 45°), одержані при зварюванні на спуск та в гору при неперервному режимі генерації лазерного випромінювання, відрізняються більше ніж у 3 рази.

Варто відзначити, що при зварюванні у різних просторових положеннях з використанням імпульсного режиму генерації лазерного випромінювання, вказані данні значно відрізняються (Рис. 3). Так, при імпульсному зварюванні вгору, різниця екстремальних значень характерних максимумів та мінімумів вказаних залежностей не перевищує 60%, тобто вони між собою відрізняються не більше ніж у 2,5 рази. А при імпульсному зварюванні на спуск, характерні значення екстремумів відповідних залежностей відрізняються майже у 3,3 рази (Рис. 3). При цьому значення площі поперечного перерізу зварних з’єднань у екстремальних точках, одержані при зварюванні на спуск та в гору при імпульсному режимі генерації лазерного випромінювання (при куті нахилу 45° для зварювання на спуск та 60° при зварюванні вгору), відрізняються менше ніж на 5%.

У Таблиці 3 та на Рис. 4 показана зміна висоти шва у зварних з’єднаннях з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях. Як й для зміни площі провару, характер залежностей нелінійний та має екстремальні значення. Але різниця у даних, одержаних для зварювання угору та на спуск, для переважної більшості контрольних точок не перевищує 15 %, при одному й тому ж режимі генерації лазерного випромінювання.

Цікавим є той факт, що екстремально високі значення зафіксовані при зварюванні з кутом нахилу 45° у імпульсному режимі на спуск та неперервному режимі вгору (Рис. 4). У той час, коли при зварюванні у неперервному режимі на спуск та імпульсному режимі вгору, екстремум значень одержаний при куті

Таблиця 3 – Зміна висоти шва у зварних з'єднаннях з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях

Кут нахилу, °	Висота шва, мм			
	вгору неперервний режим	вниз неперервний режим	вгору імпульсний режим	вниз імпульсний режим
0	2,685	2,685	1,49	1,49
30	2,6	2,59	1,49	1,73
45	3,367	3,05	1,92	2,31
60	2,98	3,15	2,74	1,85
90	2,62	2,29	1,55	1,19

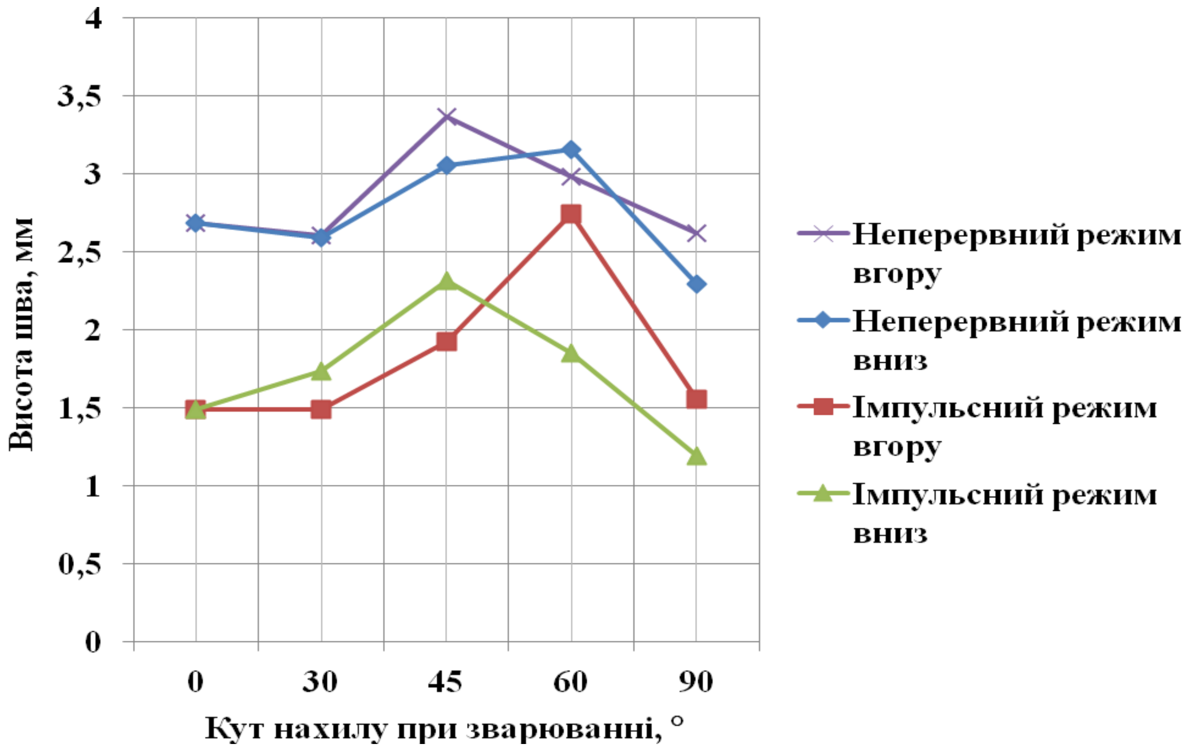


Рис. 4. Залежність зміни висоти шва у зварних з'єднаннях з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях

нахилу 60°. Значення, які перевищують товщину 3,0 мм пластин що зварювались, пояснюються утворенням верхнього та нижнього валіка зварного з'єднання. Варто відзначити, що зміна значення висоти шва у зварних з'єднаннях з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, при зміні кута нахилу при лазерному зварюванні на неперервному режимі вгору не перевищує 22%. У той час, коли при зварюванні на спуск у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання це значення складає 27%, а при зміні режиму генерації на імпульсний наближається до 100%.

Залежність зміни глибини провару у зварних з'єднаннях з нержавіючої

сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях наведена на Рис. 5 за даними Таблиці 4. Порівняння характеру графічних залежностей на Рис. 4 та Рис. 5, показує їх велику схожість та дозволяє робити тотожні (вищенаведеним) висновки для характеру зміни глибини провару в залежності від зміни кута нахилу при зварюванні.

Таблиця 4 – Зміна глибини провару у зварних з’єднаннях з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях

Кут нахилу, °	Глибина провару, мм			
	вгору неперервний режим	вниз неперервний режим	вгору імпульсний режим	вниз імпульсний режим
0	2,685	2,685	1,49	1,49
30	2,6	2,59	1,49	1,73
45	3,367	3,05	1,92	2,31
60	2,98	3,15	2,74	1,85
90	2,62	2,29	1,55	1,19

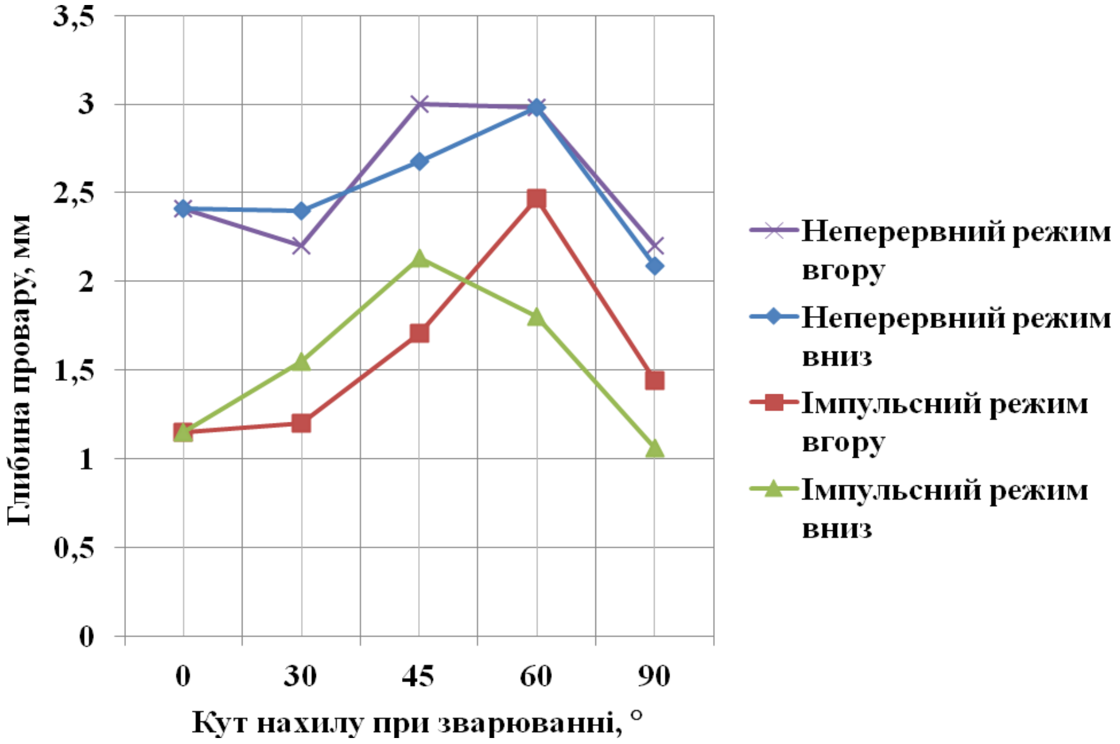


Рис. 5. Залежність зміни глибини провару у зварних з’єднаннях з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях

Згідно ДСТУ EN ISO 13919-1:2015, перевищення випуклості провару зварних з’єднань з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях, для одержання

найвищого рівня якості «B» не повинно перевищувати значення 0,65 мм. Аналіз даних наведених у Таблиці 5 та залежностей наведених на Рис. 6, дозволяють стверджувати про досягнення необхідних значень. У той же час, як видно з Рис. 6, при зварюванні на деяких режимах зафіксовані від'ємні значення, які свідчать про наявність заниження шва, яке, згідно ДСТУ EN ISO 13919-1:2015, для зварних з'єднань з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням, не повинно перевищувати 0,3 мм.

Таблиця 5 – Зміни перевищення випуклості провару зварних з'єднань з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях

Кут нахилу, °	Перевищення випуклості провару, мм			
	вгору неперервний режим	вниз неперервний режим	вгору імпульсний режим	вниз імпульсний режим
0	0,275	0,275	0,347	0,347
30	0,4	0,19	0,29	0,18
45	0,183	-0,16	0,21	0,18
60	-0,09	0,15	-0,18	0,05
90	0,42	0,2	0,11	0,13

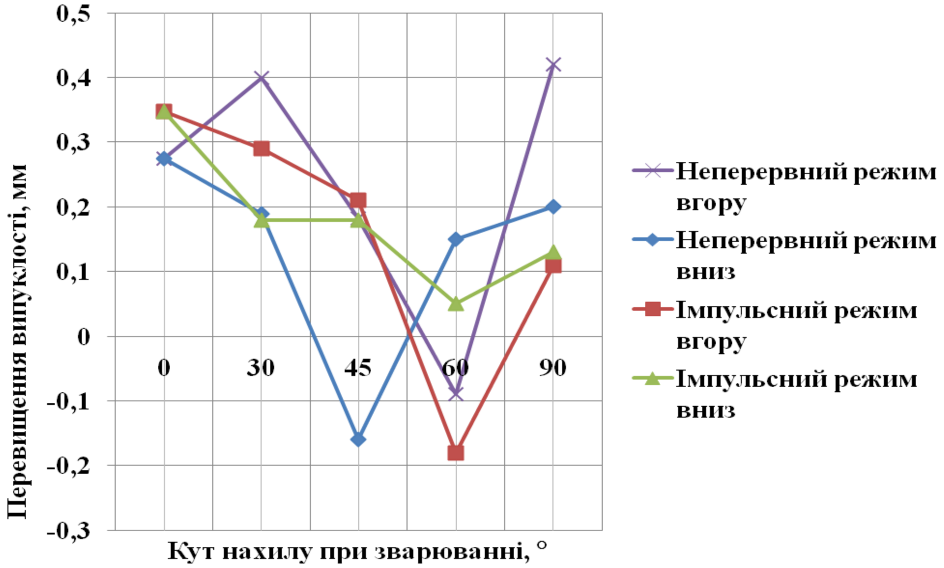


Рис. 6. Залежність зміни перевищення випуклості провару зварних з'єднань з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях

Залежність зміни ширини шва у зварних з'єднаннях з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях наведена на Рис. 7 за даними Таблиці 6.

Таблиця 6 – Зміни ширини шва у зварних з'єднаннях з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях

Кут нахилу, °	Ширина провару, мм			
	вгору неперервний режим	вниз неперервний режим	вгору імпульсний режим	вниз імпульсний режим
0	1,29	1,29	0,93	0,93
30	1,56	1,42	1,18	1,25
45	1,32	3,83	1,25	1,66
60	1,4	1,26	1,37	1,15
90	1,66	1,58	0,87	1,09

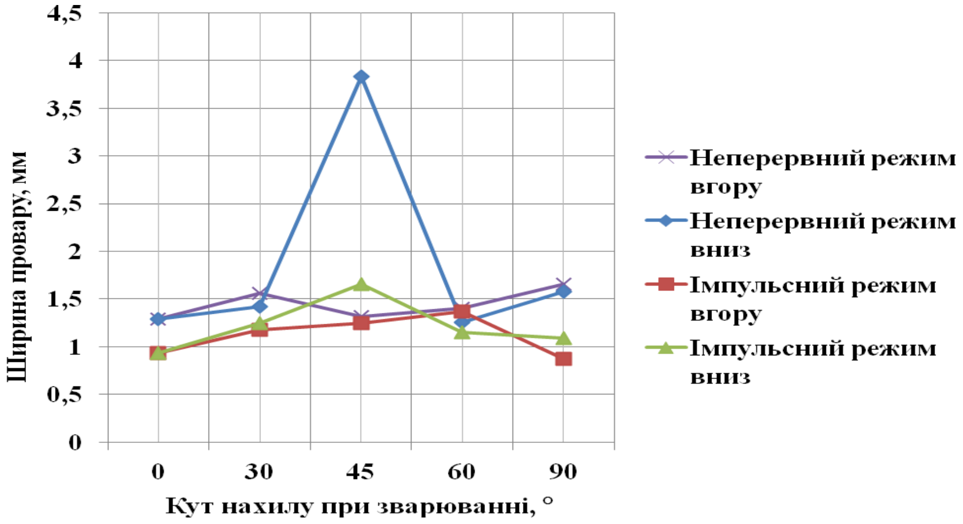


Рис. 7. Залежність зміни ширини шва у зварних з'єднаннях з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях

Порівняння характеру графічних залежностей на Рис. 3 та Рис. 7, показує їх велику схожість та дозволяє робити тотожні (вищенаведеним) висновки для характеру зміни ширини шва в залежності від зміни кута нахилу при зварюванні. Дійсно, для залежностей зміни ширини шва у зварних з'єднаннях з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях (Рис. 7), характерна таж сама картина зміни значень контрольних точок. Однак відносна різниця між абсолютними значеннями ширини шва (Таблиця 6) відрізняється від відносної різниці між абсолютними значеннями зміни площі поперечного перерізу зварних з'єднань (Таблиця 2). Так, наприклад, при зміні кута нахилу при лазерному зварюванні на неперервному режимі вгору різниця екстремальних значень характерних максимумів та мінімумів між абсолютними значеннями ширини шва, одержаних під різними кутами зварювання не перевищує 22%, тобто відрізняється не більше ніж у 1,25 раз. У той час, коли при зварюванні на спуск

у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання, характерні значення екстремумів відповідних залежностей відрізняються більш ніж у 3 рази (Таблиця 6 та Рис. 7). При цьому значення ширини шва у екстремальних точках, одержані при зварюванні на спуск та в гору при неперервному режимі генерації лазерного випромінювання, відрізняються майже у 3 рази.

Варто відзначити, що як для даних щодо зміни площі поперечного перерізу зварних з’єднань (Таблиця 2), дані щодо значень ширини шва, одержані при зварюванні у різних просторових положеннях з використанням імпульсного режиму генерації лазерного випромінювання, вказані данні значно відрізняються (Рис. 7). Так, при імпульсному зварюванні вгору, різниця екстремальних значень характерних максимумів та мінімумів вказаних залежностей не перевищує 40%, тобто вони між собою відрізняються не більше ніж у 1,6 раз. А при імпульсному зварюванні на спуск, характерні значення екстремумів залежностей значень зміни ширини шва відрізняються майже у 1,8 раз (Рис. 7). При цьому значення зміни ширини шва у екстремальних точках, одержані при зварюванні на спуск та в гору при імпульсному режимі генерації лазерного випромінювання (при куті нахилу 45° для зварювання на спуск та 60° при зварюванні вгору), відрізняються менше ніж на 18%.

Коефіцієнт форми зварного шва є важливим параметром, який характеризує зварне з’єднання, та який виражається відношенням ширини шва до його товщини. У Таблиці 7 наведені дані, одержані в результаті аналізу макрошліфів зварних з’єднань з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях. На Рис. 8 побудовані відповідні залежності зміни коефіцієнта форми зварних з’єднань.

Таблиця 7 − Зміна коефіцієнта форми зварних з’єднань з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях

Кут нахилу, °	Коефіцієнт форми провару			
	вгору неперервний режим	вниз неперервний режим	вгору імпульсний режим	вниз імпульсний режим
0	0,54	0,54	0,81	0,81
30	0,71	0,59	0,98	0,81
45	0,44	1,43	0,73	0,78
60	0,47	0,42	0,55	0,62
90	0,75	0,76	0,6	1,03

Аналіз одержаних даних показує велику розбіжність між значеннями, одержаними у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання при зварюванні на спуск. Так, з даних Таблиці 7 та Рис. 8 видно, що у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання при куті зварювання 45° коефіцієнт форми провару становить 1,43, у той час коли його значення складає 0,42 при зміні кута нахилу з 45° на 60°. Тобто відносна різниця ціх значень

становить майже 3,5 рази. У той час коли коливання значення коефіцієнта форми зварних з’єднань у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання при зварюванні угору не перевищують 40%. Це дозволяє стверджувати про одержання більш стабільного коефіцієнта форми зварних з’єднань при зварюванні угору у неперервному режимі генерації лазерного випромінювання при зварюванні, а ніж при зварюванні на спуск.

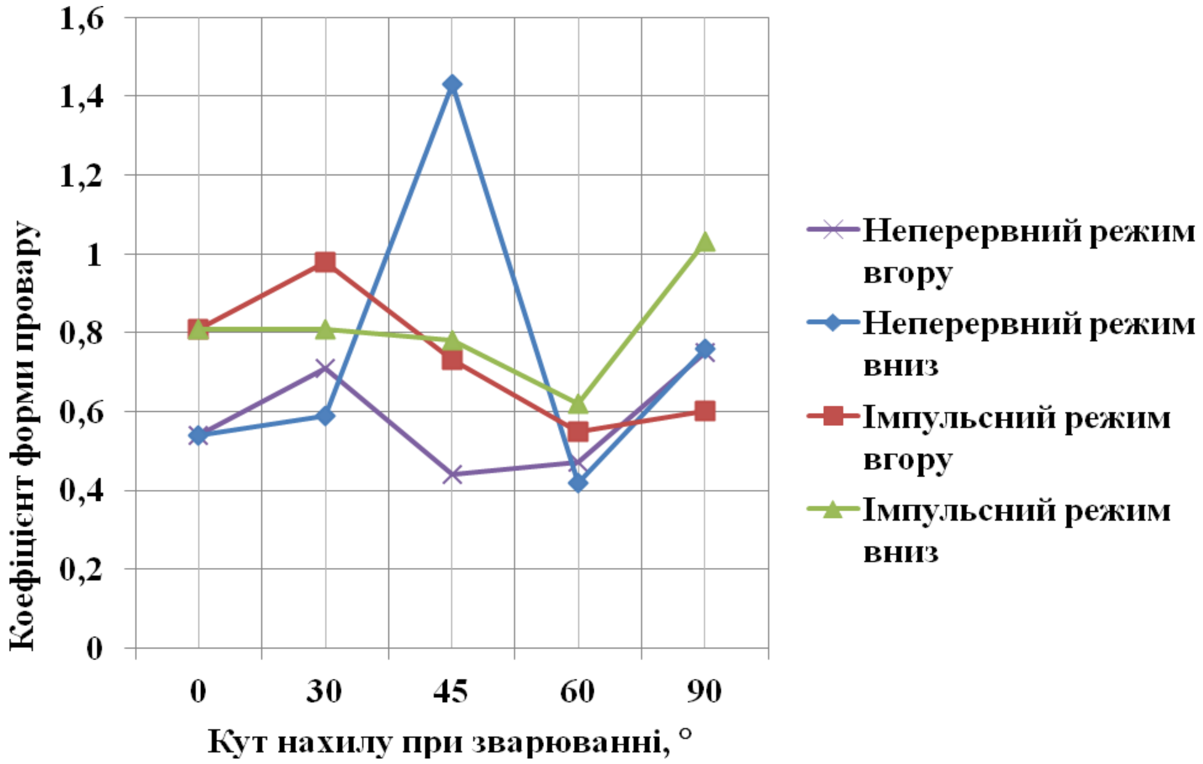


Рис. 8. Залежності зміни коефіцієнта форми зварних з’єднань з нержавіючої сталі AISI 321 товщиною 3 мм, одержаних лазерним зварюванням у різних просторових положеннях

Як показує аналіз даних Таблиці 7 та Рис. 8 коливання значення коефіцієнта форми зварних з’єднань у імпульсному режимі генерації лазерного випромінювання при зварюванні як угору, так й на спуск складають близько 40%. При цьому варто відзначити, що відносна різниця значень між значеннями коефіцієнта форми зварних з’єднань у імпульсному режимі генерації лазерного випромінювання при зварюванні як угору, так й на спуск для відповідних різних просторових положень становить близько 10%, майже для всіх значень кута нахилу, окрім 90°, коли це відношення наближається до 40%

Аналіз результатів досліджень виконаних на пласких зразках та описаних вище, дозволив виконати вибір просторових положень та підібрати параметри рекомендованих технологічних режимів, на яких були виготовлені контрольні стикові з’єднання зі сталі AISI 321 товщиною 3,0 мм. При виборі просторових положень керувалися наступними показниками: досягненням максимальної глибини провару; формуванням заданої геометрії зварного з’єднання; відсутності (або мінімальної кількості бризок); відсутності (або мінімальної

величини) утоніння; відсутності (або мінімальної величини) «гребінця» верхнього валика. Виходячи з цих даних, були обрані нижнє та вертикальне просторові положення, на яких, відповідно, було одержано якісні зварні з'єднання, що відповідають вище переліченим вимогам. Схожі за геометрією зварні з'єднання були одержані при наступних режимах: імпульсний режим генерації лазерного випромінювання, при максимальній потужності 4,4 кВт, частоті 250 Гц, імпульс 75/25 (для обох положень); розфокусуванні -1 мм; швидкості зварювання 3000 мм/хв (для нижнього положення) та 4500 мм/хв (для вертикального положення). У всіх випадках зварювання проводилося з подачею аргону в вигляді захисного газу з різними витратами в певні області: в область зварювальної ванни 30 л/хв; в «хвіст» зварювальної ванни, для захисту остигаючого металу – 20 л/хв.

Висновки

За результатами виконаних досліджень можна зробити висновок про перспективність застосування зміни просторового положення деталей при лазерному зварюванні. Так, при зміні з нижнього на вертикальне положення при зварюванні стикових з'єднань зі сталі AISI 321 товщиною 3,0 мм, можливо збільшення швидкості зварювання на у 1,5 рази зі збереженням необхідних показників якості зварних з'єднань. При цьому не збільшується пороутворення та забезпечується підвищення міцності зварних з'єднань до 15%, за рахунок подрібнення структури.

KAPITEL 4 / *CHAPTER 4*
USE OF VIBRO-CENTRIFUGAL METHOD FOR PROCESSING PARTS FROM SUPERHARD CERAMICS

ВИКОРИСТАННЯ ВІБРОВІДЦЕНТРОВОГО СПОСОБУ З МЕТОЮ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ З НАДТВЕРДОЇ КЕРАМІКИ

DOI: 10.30890/2709-2313.2021-07-08-012

Introduction

During the development of the country's economy, special attention should be paid to the technical re-equipment of all sectors of the national economy. In particular, it is recommended to pay special attention to the development and implementation of high-quality tools and the use of new progressive cutting materials for new technological processes.

The main task in the field of mechanical engineering is to increase productivity, efficiency, reliability and durability of manufactured parts, and to reduce labor intensity. But the machining of progressive super-hard cutting tools is difficult and costly.

4.1. Selection of tool materials for machining superhard ceramics

The development of modern mechanical engineering is associated with the development and implementation of the latest materials and progressive technological processes for their processing. The unique properties of ceramics make it possible to use it in various fields of technology, including as cutting tools and parts of machines, devices and electronic equipment. Due to the high rigidity of the material, machining of workpieces is possible only with the use of synthetic diamonds [1]. Basically, ceramic cutting inserts (CCI) are used in continuous semi-finishing and finish turning. In these processing operations, they have an advantage over traditional cutting materials in terms of rigidity, wear resistance and chemical inertness to most of the processed materials. An important quality of ceramic plates is their ability to maintain high rigidity at sufficiently high temperatures arising in the tool-machined material contact zone.

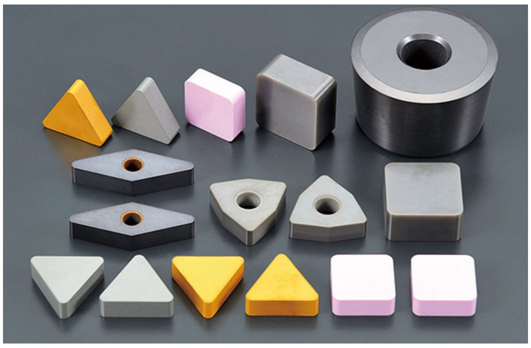


Figure 1 - Appearance of ceramic plates used as cutting material

Since all ceramic parts are brittle, they tend to crack under stress from a cutting or grinding tool. A point load with a sufficiently small plastic deformation leads to

the fact that, under the influence of diamond grains, the ceramics, feeling strong mechanical and thermal loads, crumble; As a result, a groove appears, the width of which exceeds the area of collision of the diamond grain with the material, and cracks (longitudinal, radial, lateral chips and other defects of brittle origin) appear in the areas adjacent to the groove, which has a significant effect on the quality of the processed products and their resource works for consumers. Studies have shown that the most productive is vibro-abrasive processing using a suspension containing diamond powder SDM 20/14 (Fig. 2). This is due to the ability of SDM 20/14 diamond particles to maintain their cutting ability due to constant micro-spalling of the contact areas as a result of vibration and shock loading in the processing zone.

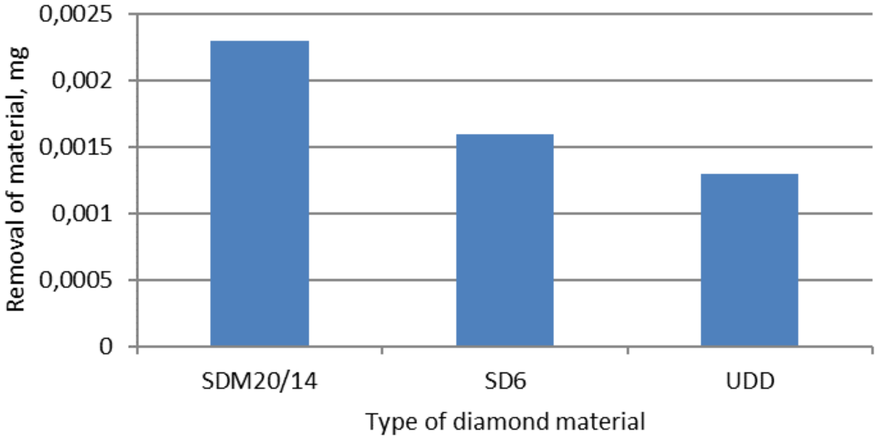
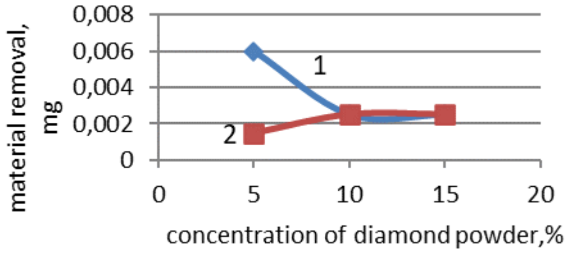
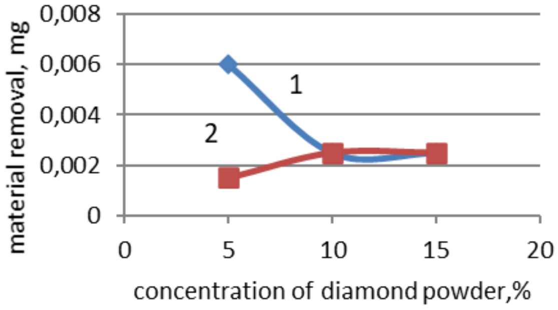


Figure 2 - Influence of the brand of diamond powder on the amount of removal when processing a sample of PCSM brand "Borsinite"

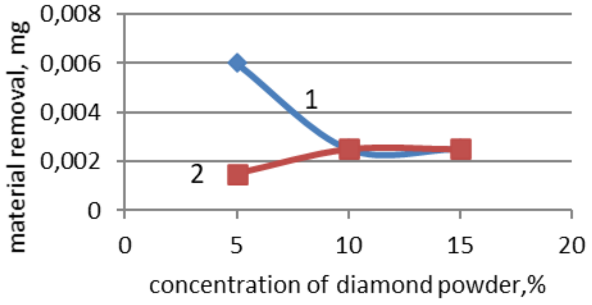
The use of suspensions with monocorundums and diamond powders in different concentrations during abrasive processing significantly affects the amount of removal from PCSM samples (Fig. 3). As can be seen from the figure, the use of mono-corundum in the suspension in addition to diamond powders significantly increases the removal rate. It should be noted that when processing samples in the form of plates, the removal rate is significantly higher, which is probably determined by its area. This is especially important when using SDM20/14 diamond powder in a suspension (Fig. 3, a). For simultaneous processing of both types of samples, the best result occurs when the concentration of diamond powder is 10%. This applies to all studied diamond grades. From a comparison of the results shown in Fig. .3, a, b, it can be seen that the removal of material during abrasive processing of plates with PCSM using a suspension with SDM diamond powder is higher than that of SD6 diamond. This result is due to the difference in the mechanical properties of SDM20/14 and AS6 diamond particles [2]. The amount of material removed at a concentration of 15% SDM20/14 diamond powder testifies to the widespread truth - "the more, the better", that is, the higher content of diamond powder in the suspension causes the intensification of the removal from the PCSM sample.



a



b



c

a – SDM20/14; *b* – SD6; *c* – UDD (1 - plate; 2 - cylinder)

Figure 3 - Influence of the concentration of diamond powder in suspension on the amount of material removed from the sample

When using a suspension with UDD diamond powder at a concentration of 5%, cylindrical PCSM samples are most effectively processed. In this case, the largest contribution to the amount of removal is made by mono-corundum powder, however, in terms of the absolute amount of removal it is inferior to the case of using suspensions with diamond powders SDM20/14 and SD6. When abrasive processing of two types of PCSM samples using suspensions with SD6 diamond powder at concentrations of 10% 15%, the amount of material removed is approximately the same (Figure 3, b). A similar picture, but with a lower absolute magnitude of the survey, is observed when using a suspension with UDD diamond powder. In these options, focusing on the economic factor, it is better to use suspensions with a diamond powder concentration of 10%.

4.2. Surface quality of ceramics after vibro-centrifugal treatment

Ensuring high quality of machined mechanical engineering products, their operability in operation is associated with the need to form the necessary parameters

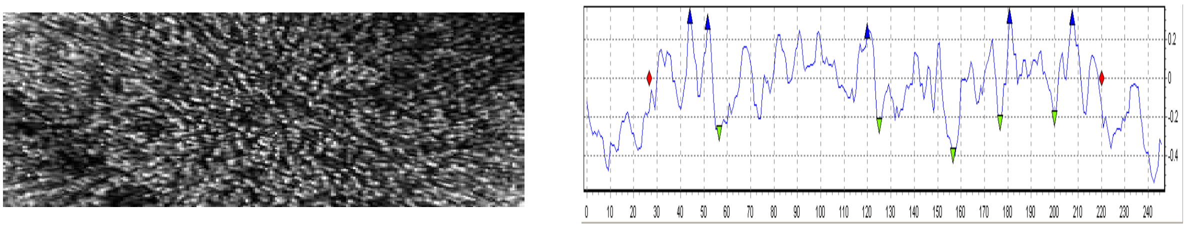
of roughness and state of the surface layer at the working sections of cutting tools [3]. Traditionally, the finishing treatment of the surfaces of tools is carried out by methods of diamond abrasive processing - both bound and free abrasive. A promising finishing method is vibroabrasive machining [59], which allows not only to reduce the roughness of the surfaces of tools, but also to control the value of the radius of rounding of their cutting edge. Until now, there is experience in the use of such processing in the manufacture of cutting tools equipped with a working part of hard alloys. Taking into account the wide distribution and high cost of tools made of superhard polycrystalline materials (PCSM) based on cubic boron nitride (CBN), it is of considerable scientific and practical interest in improving the methods of their manufacture. Vibration-abrasive machining as a finishing method, which in traditional applications is characterized by high productivity and is effective when it is necessary to ensure a high quality of the processed surface, can be quite effective in this case. It should be borne in mind that products made of PCSM have high rigidity, are difficult to machine and the process of their vibro-abrasive processing is characterized by a number of significant features. The quality of the processed surface during vibration processing of superhard ceramics was determined on a non-contact interference 3-D profiler "Micron-alpha", shown in Fig. 4, the purpose for the registration and analysis of microfotography of surfaces by the method of processing a sequence of interference patterns in the white world, namely [4]:

Figure 4 - Non-contact interference 3-D profilograph "Micron-alpha" [5]

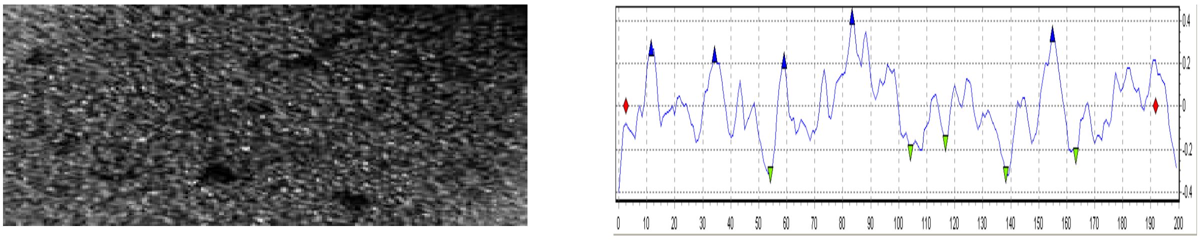
Non-contact interference 3-D profilograph "Micron-alpha" can:
• build 2D and 3D surface profiles;
• quantify the characteristics of the surface;
• calculate the volume of the protrusion (depression):
• observe interference patterns [5];
• to carry out metallographic studies.

Technical characteristics of the "Micron-alpha" device Scanning field (XY) µm 100 × 90 (1300 × 1000) Horizontal resolution (XY). Mcm 0.16 (2) Maximum measured relief height (Z), µm 40 (120) [115] Vertical resolution (Z) nm 3 (5) Time of 3D topography acquisition, min. 0.5 - 5 [115] In fig. 6.5 shows profilograms and fragments of the surface of the samples after 10 min of treatment.

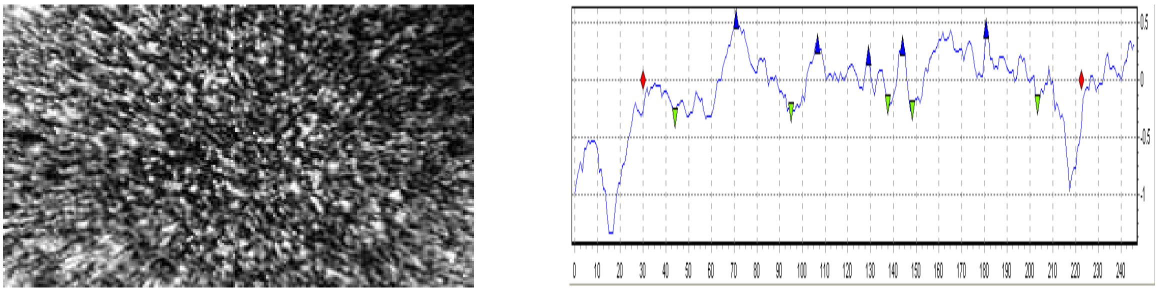
Analyzing the profilograms, we conclude that the highest quality processing took place with a mixture of mono-corundum and UDD diamond powder at a concentration of 15% [6]. Average Ra = 0.11. In the process of removing shavings during diamond grinding of ceramics, individual diamond grains are involved in conjunction with a bunch of tools. When studying the nature of the destruction of the



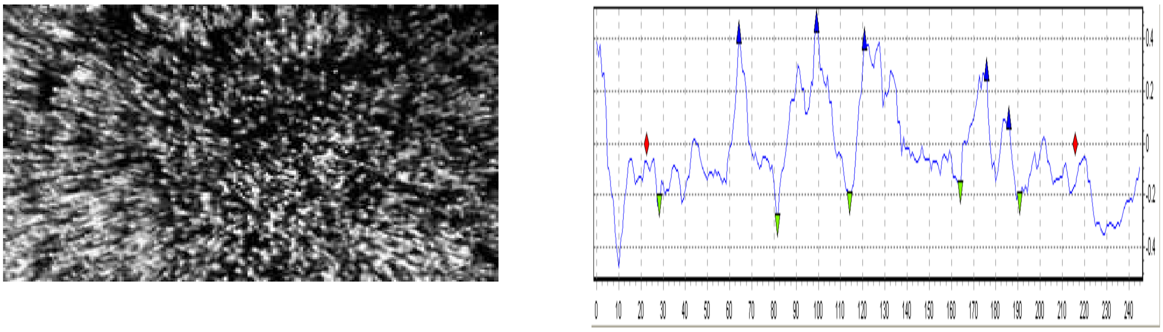
a) monocorud + SDM diamond powder at a concentration of 15%. Ra = 0.11



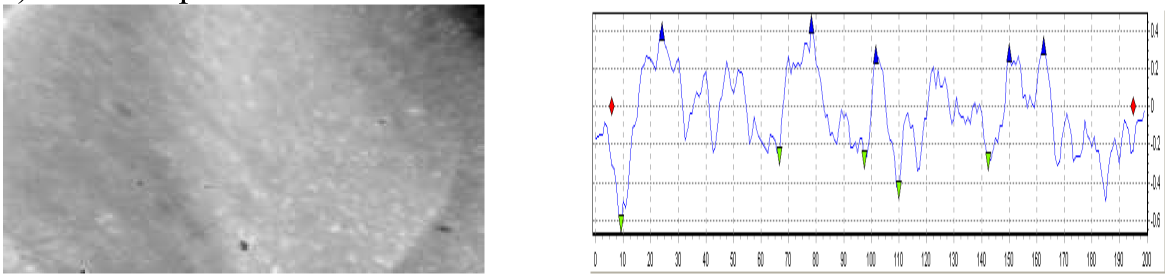
b) UDD diamond powder at a concentration of 10% Ra = 0.12



c) diamond powder SD 6 at a concentration of 10% Ra = 0.14

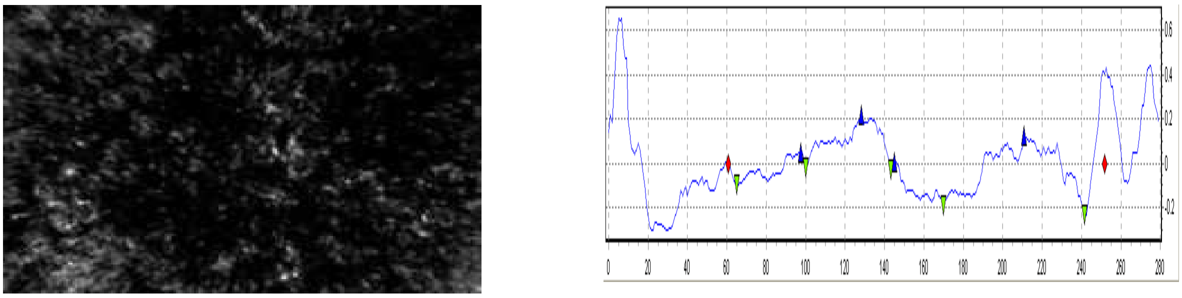


d) diamond powder DSM 20/14 at a concentration of 10% Ra = 0.34

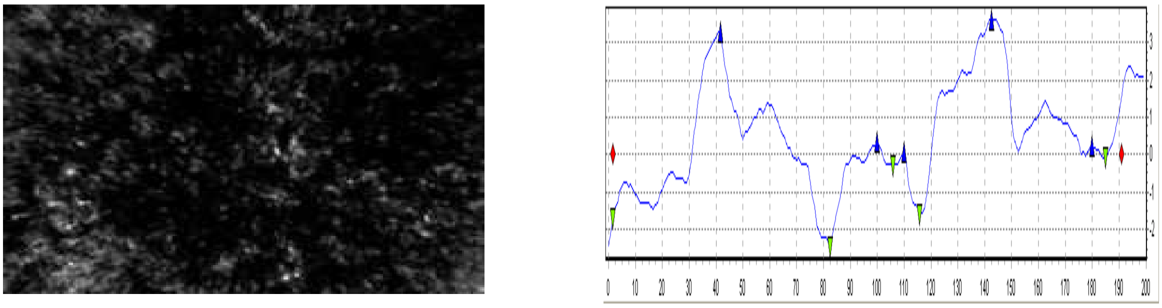


e) diamond powder SD 6 at a concentration of 10% + mono-corundum Ra = 0.18

ISBN 978-3-949059-44-5



f) a mixture of diamond powder UDD + mono-corundum Ra (4) = 0.14

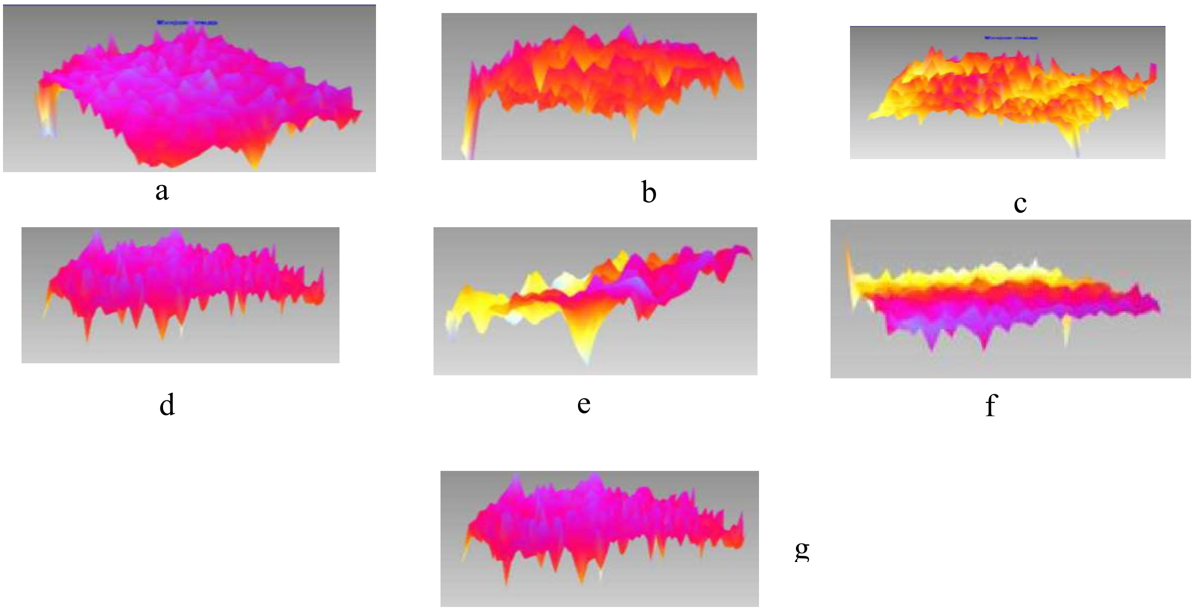


g) a mixture of mono-corundum and white electrocorundum Ra = 1.13

Figure 5 - Profilograms of surfaces

ceramic surface by a diamond grain, it was found that the grain at the beginning and end of the scratch leaves a clear trace without obvious chips along the edges of the trace. A diamond grain, possessing sufficient rigidity, immediately begins to cut off the chips upon contact with the material. The middle part of the scratch has significant tears along the edges along its entire length. The appearance of chips [7], which have reached a certain depth of grain penetration, is explained by the fact that with an increase in the cutting depth, all new edges of the diamond grain come into operation, in connection with which the microcutting forces in the zone of its contact with the sample material grow and are observed together with the formation of a highly dispersed shavings, large areas of material separation. The forces arising during grinding determine the stability of diamond wheels, the quality of processing and allow the choice of rational technical parameters [8]. When grinding ceramics, the state of the surface layer is highly dependent on the cutting forces. Knowledge of the regularities of the change of the latter allows you to reasonably choose the optimal processing conditions. By the nature of the change in cutting forces, one can also judge about the physical phenomena occurring in the grinding zone. The above profilograms confirm the drawings made in 3D graphics. They clearly show the difference in the surface profile of the samples treated with different materials.

The sample surface treated with a mixture of monocorundum and UDD diamond powder at a concentration of 15% looks smoother, without pronounced extrema in the negative and positive directions. Graphic 3D images confirm that the use of a mixture of monocorundum and diamond powder UDD at a concentration of 15% led to the fact that the surface relief of the samples corresponds to the highest surface roughness index [6]. Many industries place high demands on the surface quality of the materials used. This problem is relevant for the metalworking industry, when it is the surface of certain materials that provides the necessary physical effects and operating conditions



a) a mixture of mono-corundum and SDM diamond powder at a concentration of 15%. b) diamond powder SD 6 at a concentration of 10% c) diamond powder UDD at a concentration of 10% d) powder diamond SDM 20/14 at a concentration of 10% e) a mixture of mono-corundum and white electrocorundum f) a mixture of powder of UDD diamond and mono-corundum

Figure 6 - Profile of the surface of the plate after processing performed in 3D mode (× 500)

of the blade tool. Improving the reliability and durability of cutting inserts, cutters', milling heads and drills is one of the main problems of the modern manufacturing industry. The economic significance of this problem is obvious. As the statistical analysis has shown, the main reason for the failure of cutters, mills and other processing tools is not their mechanical breakdown, but a gradual decrease in the quality of processing, due to and depending on the perfection of processing of cutting inserts and surface defects of these plates, and if the second factor is practically not depends on the processing of these plates, with the exception of the low skill of the processor, the first factor can be corrected using vibration abrasive processing.

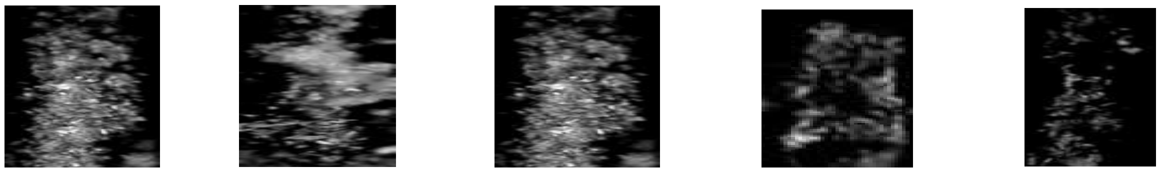
4.3. Varying the radius of rounding of the cutting edge of superhard ceramic inserts

Automation of machine-building equipment, an increase in processing speeds and an expansion of the range of processed materials made it necessary to develop effective abrasive materials that retain the ability to work in extreme conditions. Due to the record hardness of diamonds, a tool consisting of mixtures with a high content of diamond composite materials (DCM) cannot be replaced by any other materials when processing products made of superhard materials, glass, ceramics, natural and synthetic materials [9]. With regard to the final machining operations of parts made of cast irons, hardened steels and non-ferrous alloys - this issue is successfully solved by using tools with cutting inserts made of oxide ceramics. The use of these tools,

ISBN 978-3-949059-44-5

due to the high hardness and heat resistance of ceramics, allows many times to increase the cutting speed and efficiently perform precision machining of parts, while the technological process meets the ever-increasing environmental standards [10]. The use of tools with existing ceramic cutting inserts in previous machining operations of parts is quite effective. Of greatest interest to the industry are tools with cutting inserts made of nitride ceramics, which have a very wide range of applications. Nitride ceramics are obtained either by hot sintering or by hot isostatic pressing. A very important property of silicon nitride cutters is the high strength of the cutting edge and its reliability. In this case, it is possible to use a cooled liquid in the cutting process. According to the data of foreign companies, silicon nitride tools have proven themselves especially well when machining cast iron (even under high variable loads), as well as when machining nickel alloys and aluminum alloys with a high silicon content. Expanding the scope of tools equipped with ceramics can only be ensured on the basis of an integrated approach to their design, manufacture and operation. One of the tasks requiring an inexpensive and efficient solution in the manufacture of cutting tools is edge rounding. Edge rounding is a serious and multifaceted problem, the solution of which can significantly increase the reliability and durability of the product. The need for edge rounding can be justified by the complex of tasks facing the technologists.

This includes both surface cleanliness during machining and reduced wear on the cutting edge. In this case, the radius of rounding of the cutting edges is taken equal to 0.008 - 0.02 mm. Figure 7 shows photographs of the surfaces of the edges of different samples and the values of the rounding radius.



a b c d e

a) The treatment was carried out with a mixture of mono-corundum and diamond powder SDM 20/14 at a concentration of 15%. Rounding radius - 0.003mm. b) The treatment was carried out with a mixture of mono-corundum and diamond powder SD6 at a concentration of 10%. Rounding radius - 0.008 mm. c) Processing was carried out with UDD diamond powder at a concentration of 10%. Rounding radius - 0.007 mm. d) processing was carried out with SD6 diamond powder at a concentration of 10%. Rounding radius - 0.0076 mm. e) Processing was carried out with SDM 20/14 diamond powder at a concentration of 15%. Rounding radius - 0.006mm.

Figure 7 - Photographs of fragments of the edges of ceramic samples, which are rounded (× 500)

Thus, only for materials that are difficult to process, this value changes in the range of 0.005 - 0.04 mm. The size of the radius of rounding of the cutting edges and the rate of its formation are functions of processing time, size and abrasive type of grain. These parameters are empirically selected in each specific case. As you can

see, the radius of rounding of the cutting edge is different when machining with different abrasive cutting materials. But when processing superhard ceramics, its own peculiarities appear. For productive work, you need a cutting tool that processes ceramics. Studies have shown that artificial diamonds can be such a tool, but due to the possible rise in the cost of processing, artificial diamonds make up only 15% of the abrasive mixture used in processing. The studies carried out showed the following results, given below. In practice, processing with SDM 20/14 diamonds turned out to be more productive, but the concentration of SDM 20/14 diamond material was higher than the concentration of ultradispersed diamonds. Therefore, it has been practically established that UDD processes diamond material more efficiently. Figures 8, 9, 10 show the dependences of material removal on the content of diamond powder of different grades in order, as mentioned above, to optimize the process.

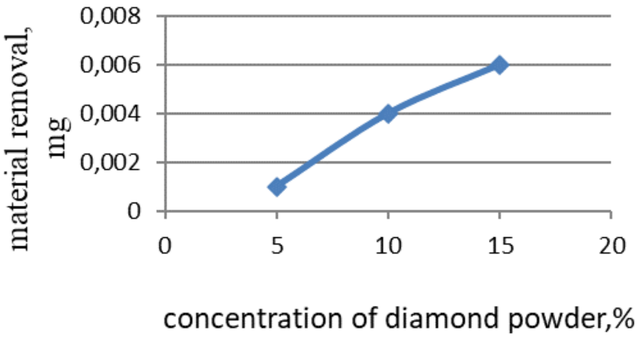


Figure 8 Dependence of the sample edge rounding radius on the content of SD 6 diamond powder in the mixture

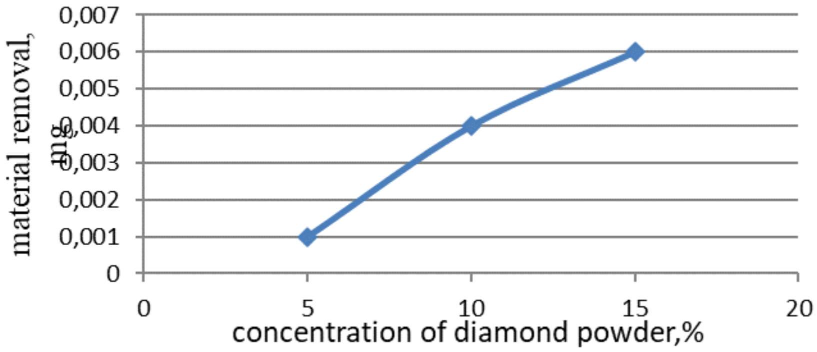


Figure 9 - Dependence of the sample edge rounding radius on the content of UDD diamond powder in the mixture

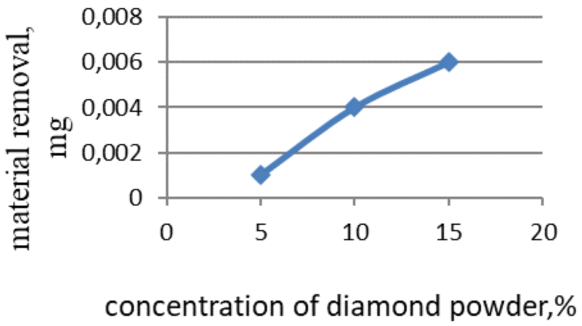
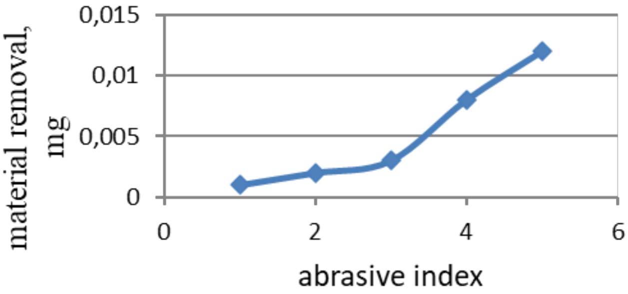


Figure 10 - Dependence of the sample edge rounding radius on the content of SDM 20/14 diamond powder in the mixture

Analyzing the dependencies presented in Figures 2, 3, 4, we can conclude that the use of any of the three presented diamond powders (SDM 20/14, UDD and SD 6) with a content of 15% in a mixture with mono-corundum gives the greatest result of the rounding radius , and if we talk specifically about each powder, then the highest productivity was demonstrated by the UDD diamond powder in the amount of 15% in the mixture [8]. Explosive transformation is used to obtain UDD diamond powder. The properties of such diamonds largely coincide with the properties of natural diamonds, but differ from natural ones in the amount of impurities. Perhaps that is why their use as an abrasive and more acceptable. In order to confirm the conclusion that it is the abrasive material based on any diamond that can increase the material removal rate, a number of studies were carried out. The processing was carried out using different abrasive materials, as well as a mixture of materials. First, the samples were processed with corundum abrasive materials, then diamond materials were added to the mixture. Figure 11 shows the dependence of the amount of material removed from the used abrasive material.



1 - mono-corundum; 2 - mono-corundum + white corundum; 3 - mono-corundum + 15% ACM 20/14; 4 - mono-corundum + 15% AC 6; 5 - mono-corundum + 15% UDD.

Figure 11 - Dependence of the rounding radius on the used abrasive material (mixture)

The processing was necessarily carried out under the same conditions in order to exclude the random component of the study, namely, the constant processing time and vibration amplitude. Analyzing the dependence shown in Figure .11, we conclude that the use of ultradispersed diamonds as an additive in a mixture of abrasive powder made it possible to achieve sufficiently high results during processing, both independently and in a mixture with monocorundum. Analyzing the graph shown in Figure 12, we can make an unambiguous conclusion that the processing time has a direct impact on the radius of rounding of the cutting edge. In this regard, it is fair to assume that the longer the processing of the samples takes place, the greater the amount of rounding of the cutting edge will be. Therefore, having specified the required radius, you can choose the processing time and vice versa. The radius of the cutting edge can be matched to any type of finishing. In contrast to the wear of the flank of the tool, the radius of rounding of the cutting edge increases uniformly throughout the entire period of operation of the cutting tool. In this case, on the classic graph of the cutting tool wear, there will not appear portions of curves that are almost parallel to the time axis, which are always present on the

 ISBN 978-3-949059-44-5

curves of the flank wear. The used abrasive material is mono-corundum + 15% UDD.

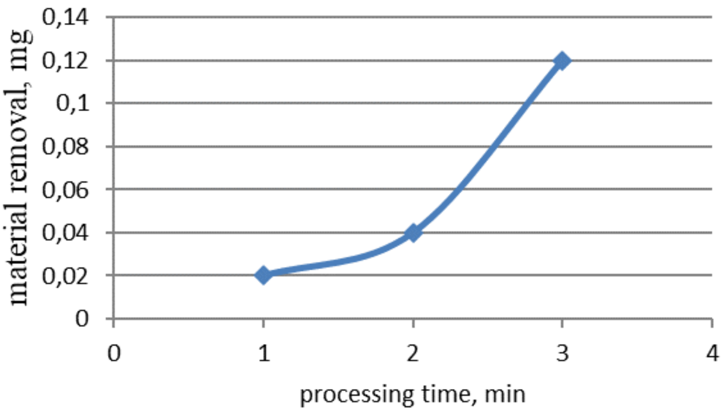


Figure 12 - Dependence of the rounding radius on the processing time

With an increase in the cutting speed and the thickness of the cut layer, the wear of the cutting insert increases. In this regard, the manufacture of ceramic cutting inserts, which allow performing not only the final, but also preliminary processing of parts, is an urgent scientific and technical problem that can be solved by using vibration processing, and an abrasive powder made of mono-corundum can be used as a cutting tool. With the addition of a certain amount of artificial ultrafine diamonds (UDD). The used abrasive material is monocorundum + 15% UDD.

4.4. Stability of cutting tools for superhard ceramics

Tool life T is understood as the total time (min) of its work between regrinds at a certain cutting mode. The stability of turning tools, the cutting part of which is made of different tool materials, is 30-90 minutes. Tool stability depends on the physical and mechanical properties of the tool and workpiece material, cutting mode, tool geometry and processing conditions. The wear of the cutting tool differs by its nature from the wear of machine parts, since the cutting zone in which the tool is located is due to high chemical purity, as well as high pressure and temperature in the contact zone. The process of tool wear during technological cutting of metals includes abrasive, diffuse and adhesive types of destruction of the working edge. The impact of each type of wear depends on the characteristic properties of the material of the tool, the workpiece, as well as the processing conditions, one of which is the cutting speed. The new specialized cutting tools for metalworking offer many of the benefits of this type of tool.

The geometry of the cutting edge, combined with the processing technology, allows you to quickly and efficiently influence the material and ultimately obtain high-quality products. As you know, good machines require high-quality cutting tools. Rational use of machines and tools allows you to fully reveal all the technological capabilities of modern equipment.

With the correct use of an innovative tool, the funds spent on its acquisition are fully justified. The use of wear-resistant tools can significantly increase labor

productivity, reducing changeover time [11]. The versatility of the cutting tool allows you to significantly reduce its nomenclature and reduce the machine time spent on technological transitions. For superhard material tools, the stability of the tool will depend on the same factors as a conventional tool equipped with carbide inserts. Correct sharpening and processing of cutting inserts has a great influence on tool life. When machining cutting inserts by vibration free abrasive with the presence of diamonds. The average resistance with such processing increased several times compared to plates made of hard alloy (type VK, TK) and high-speed steel, which is shown in Figure 13.

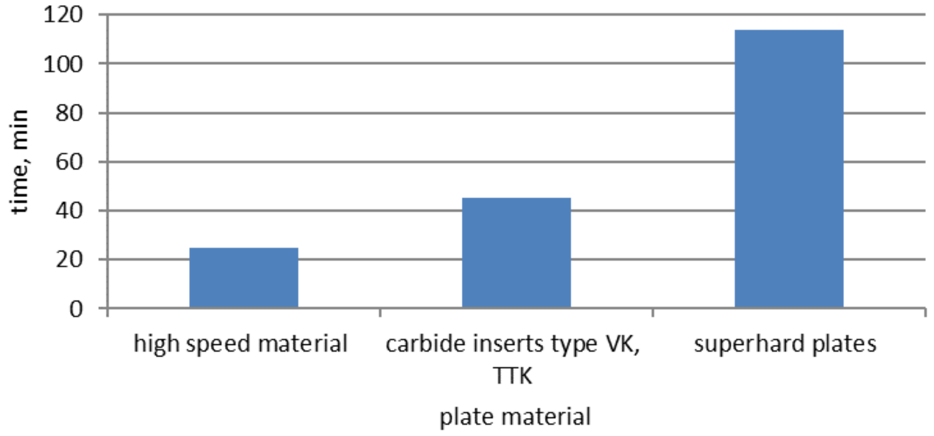


Figure 13 - Dependence of the tool life of the cutting insert on the type of material of this insert

Conclusions

As a result of the study of vibration processing of superhard ceramics with free abrasives by imposing a field of quasi-constant centrifugal forces, considered in the monograph, the following conclusions can be drawn. As for ceramics, here you can pay attention to the fact that the rounding radius increases with increasing processing time, that is, it is possible to obtain the required edge rounding radius by varying the processing time, knowing the amount of material removed per unit time.

When the samples were processed with a mixture of monocorundum and 15% UDD diamonds, the greatest removal of material occurred, i.e. the material removal rate was the highest and, therefore, the radius of the edge rounding was also the greatest. When processing samples with different abrasive materials, abrasive powder with the addition of ultradispersed diamonds was the most productive.

KAPITEL 5 / *CHAPTER 5*
MODERN CONCEPTS OF IMPROVING THE TOOL RESISTANCE OF THE TOOL DURING DEVELOPMENT
СУЧАСНІ КОНЦЕПЦІЇ ПІДВИЩЕННЯ ВІБРОСТІЙКОСТІ ІНСТРУМЕНТУ ПРИ РОЗВЕРТАННІ

DOI: 10.30890/2709-2313.2021-07-08-014

Вступ

Оброблення матеріалів різанням на поточний час залишається основним технологічним способом отримання точних поверхонь виробів найрізноманітнішого призначення. Завдяки досягненням техніки і технологій протягом останніх десятиліть відбулись значні еволюційні зміни у поглядах на формування і реалізацію стратегії технологій оброблення матеріалів різанням. Серед видів чистового оброблення циліндричних отворів у заготовках із більшості конструкційних матеріалів вагому частку складає розвертання. Розвертання поєднує досить високу продуктивність оброблення отворів у широкому діапазоні діаметрів з досягненням точності розмірів в границях *IT*8—*IT*7, забезпеченням необхідної геометричної форми і шорсткості поверхні в границях R_a 2,5…0,8 мкм, а також специфічних експлуатаційних властивостей рельєфу і поверхневого шару обробленого отвору. Серед різноманіття способів подолання вібрацій при розвертанні отворів найпривабливішим є використання інструментів зменшеної віброактивності. Решта з існуючих на сьогодні способів, незважаючи на їхню оригінальність і технічну досконалість їхнього втілення, у більшості випадків мають вкрай обмежену універсальність у застосуванні і потребують додаткових витрат ресурсів і часу на технічну підготовку виробництва. Оскільки більшість з використовуваних розверток є інструментами спеціалізованого призначення, максимальна адаптація їхньої конструкції до конкретних умов застосування обґрунтовує доцільність саме такого способу вирішення завдання забезпечення стабільного безвібраційного функціювання — за рахунок зосередження антивібраційного ефекту в самому інструменті відповідним поєднанням його конструктивного оформлення і геометричних параметрів.

5.1. Аналіз умов виникнення вібрацій при механічній обробці

Наявність періодичних коливань, що супроводжують процес різання металів при всіх видах оброблення і справляють істотний вплив на цей процес, звертає на себе увагу дослідників з самого початку розвитку науки про різання металів. Майже всі дослідження вібрації верстатів в тій чи іншій мірі базуються на класичних положеннях теорії коливань і стійкості руху, елементах теорії автоматичного регулювання та матеріалах експериментального дослідження верстатів. Слід зазначити, що хоча до цього часу немає єдиної думки з питання виникнення і розвитку автоколивань при різанні, більшість наукових шкіл і учених схильні вважати причинами обурення автоколивань елементів

технологічної системи не одне, а декілька фізичних явищ, які можуть діяти одночасно або окремі з цих явищ можуть домінувати. Це залежить від конкретних умов і стану пружної системи верстат — пристосування - інструмент - деталь (СПІД), перш за все жорсткості і демпфуючої здатності елементів системи, міцності і пластичності оброблюваного матеріалу, виду обробки, режимів різання і т. д [2]. Рівень інтенсивності автоколивань пружних технологічних систем істотно впливає на стійкість інструменту, продуктивність обробки і якість обробленої поверхні виробів (хвилястість, шорсткість, наклеп, залишкові напруги). Для кожного технологічного процесу існує певний оптимальний рівень коливань, при якому спостерігається максимальна стійкість інструменту і висока якість обробленої поверхні. За рахунок управління рівнем інтенсивності автоколивань можна домогтися десятикратного збільшення стійкості інструменту, дво-, п'ятикратного підвищення продуктивності і істотного поліпшення експлуатаційних характеристик і якості обробленої поверхні [2].

5.2. Огляд способів запобігання вібраціям при обробленні розвертанням

Для підвищення динамічної стійкості операцій механічної обробки в даний час розроблено і знаходиться в стадії розробки і дослідження велике число прогресивних інструментів, спеціальних пристроїв і оснащення. Застосування таких інструментів, пристроїв і оснащення з підвищеними коефіцієнтами η_0 і C дозволяє практично завжди змінити амплітуду коливань в потрібному напрямку і наблизити її впритул до оптимального значення A_{om}, тобто. успішно завершити процес управління інтенсивністю автоколивань і істотно підвищити продуктивність, стійкість інструменту і якість обробленої поверхні виробів. Деякі зразки таких інструментів, пристроїв і оснащення описані нижче.

Підвищення вібростійкості і продуктивності металорізальних інструментів може бути досягнуто внаслідок збільшення їх жорсткості або з ще більшим успіхом підвищенням їх демпфуючої здатності.

Демпфуюча здатність інструменту може бути підвищена так званим конструктивним демпфуванням, тобто за рахунок збільшення опору в стиках, в місцях з'єднань ріжучих пластинок з ріжучим блоком і Блоку з державкою інструменту, а також активним демпфуванням, тобто введенням в конструкцію інструментів спеціальних віброгасильних пристроїв.

Перспективними є також розробки інструментів з активним демпфуванням. Активне демпфірування досягається за рахунок використання збурюючих пристроїв з додатковим джерелом енергії. Сила опору (демпфірування) пропорційна швидкості віброперемішень, тому доцільно для підвищення демпфірування до інструменту докласти додаткову силу, пропорційну швидкості.

Управління інтенсивністю автоколивань технологічної системи можна здійснювати інструментами з регульованою жорсткістю.

5.3. Огляд конструкцій розверток і перспективи удосконалення їхніх конструкцій і застосування у складі технологічних систем з метою підвищення віброcтійкості

Призначення і типи розверток.

Розвертка призначена для виготовлення точних отворів. Залежно від технологічних вимог за допомогою розверток можна отримати отвори з точністю від 10 до 6 квалітетів за шорсткості обробленої поверхні Ra = (6,3—0,4). Розвертку застосовують після попереднього оброблення отворів зенкером, розточувальним різцем або свердлом, її можна використовувати як чистовий або чорновий інструмент. Правильна робота розвертки залежить від конструкції та якості її виготовлення, умов експлуатації (режиму різання, охолодження, величини припуску, якості заточування й доведення різальних кромок).

Вітчизняні виробники різального інструменту постачають на ринок розвертки наступних типів: циліндричні; конічні (під інструментальні, котлові (заклепкові) та інші конуси); ступінчасті для оброблення отворів класів допусків G6, H6, Js6, K6, G7, H7, Js7, K7, M7, N7, P7, E8, U8, F8, H8, D9, E9, F9, H9, H10, H11, а також комплектні розвертки номерів № 1…№ 6 для оброблення отворів під доведення. Переважну частку цього асортименту складають розвертки з інструментальних сталей, які забезпечують стабільність заявлених показників точності і якості оброблених отворів при їхньому обробленні з вкрай низькими (6…8 м/хв) швидкостями різання. Такі інструменти вже не відповідають сучасному стану технологій металооброблення.

Провідні зарубіжні компанії-виробники, як от Sandvik Coromant, Kennametal, і широко представлені в Україні корейські, китайські і ізраїльські компанії Korloy, ZCC, ISCAR останнім часом зосередили зусилля на виробництві і насиченні ринку розвертками з твердих сплавів. Використання розверток з різальною частиною з твердих сплавів, спроможних здійснювати оброблення зі швидкостями різання понад 200 м/хв, дозволяє радикально підвищити продуктивність розвертання при реалізації сучасних концепцій технології оброблення різанням High Speed Cutting/ Multi Task Cutting [3-8].

За приклад наведено характеристики твердосплавних розверток серій CoroReamer 435 [3-8]. CoroReamer 435 — це серія універсальних високопродуктивних розверток для оброблення широкого діапазону матеріалів — сталей, чавунів, кольорових металів. Вона забезпечує жорсткі допуски на отвір і високу якість поверхні завдяки внутрішньому підведенню МОР, геометрії різальної кромки і максимально нерівномірному розташуванню зубців. Максимально нерівномірне розташування зубців передбачає різний кутовий крок для усіх без винятку зубців. При такому розподілі кроку жоден із зубців не розташовується діаметрально навпроти іншого, завдяки чому розвертка формує отвори зі значно меншими відхиленнями від круглості, ніж після оброблення розвертками пересічної конструкції (рис. 1).

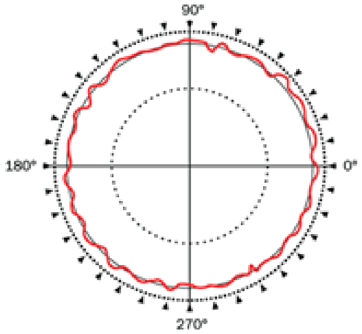


Рис.1. Круглограма отвору, обробленого розверткою CoroReamer™ 435 Sandvik Coromant [3-8]

Додатково до зазначеного ефекту при використанні розверток з максимально нерівномірним кутовим розташуванням зубців спостерігається значне зменшення вібрацій при обробленні з високими швидкостями різання. Характерною особливістю інструментів цієї серії є їхня пристосованість до оброблення з внутрішнім підведенням МОР. Внутрішнє підведення МОР здійснюється через сопла (осьові для розверток з прямими стружковими канавками і бокові для розверток з гвинтовими стружковими канавками) забезпечує подавання МОР точно в зону різання, що сприяє підвищенню стійкості інструменту і ефективність відведення стружки (рис. 2).

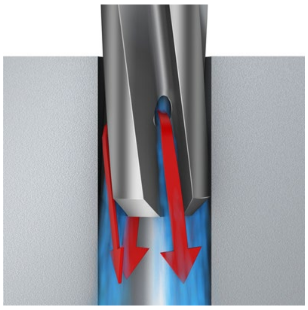


Рис.2. Оброблення отвору розвертками серії CoroReamer™ 435 Sandvik Coromant [3-8]

Наведені особливості надають привабливості використання розверток розглянутої конструкції в різних галузях машинобудування, як от загального машинобудування, оброблення прес-форм і штампів, автомобільної, енергетичної, аерокосмічної галузей тощо. [3-8].

Певного поширення набувають інноваційні розробки збірних конструкцій розверток і модульних інструментальних систем для розвертання.

За конструктивним оформленням змінної різальної частини збірні розвертки поділяються на розвертки зі змінними головками і розвертки зі змінними пластинами. За приклади подібних конструкцій на рис.3 і 5 наведені відповідно розвертки RMR™ компанії Kennametal, модульна інструментальна система зі змінними головками RHM-E™ для розвертання компанії Kennametal і збірні регульовані розвертки серій IRT та IRB з механічним кріпленням змінних пластин компанії Korloy.

Серед оригінальних конструктивних удосконалень робочої частини розверток варто навести конструкцію так званої «протягувальної» розвертки HBRE компанії Korloy. Головною відмінністю цієї конструкції є великий нахил гвинтових зубців лівого напрямку — $\omega = 45°$, — нехарактерний для більшості

Рис. 3. Модульна інструментальна система зі змінними головками RHM-E™ для розвертання компанії Kennametal

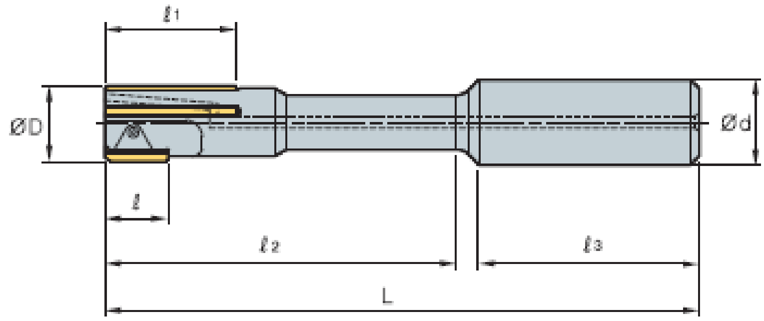


Рис. 4. Збірна регульована розвертка серій IRT та IRB з механічним кріпленням змінних пластин компанії Korloy

розверток. За ствердженнями розробника це рішення забезпечує значне підвищення точності і якості оброблення наскрізних отворів діаметром від 3 мм до 20 мм, сприятливі умови відведення стружки без залучення примусового видалення її МОР, рівномірніший розподіл навантаження на різальні кромки і підвищення стійкості інструменту. Збільшена загальна довжина різальних кромок у даному випадку сприяє поліпшенню динамічних характеристик і справляє позитивного впливу на вібростійкість технологічної системи.

5.4. Аналіз впливу конструктивних параметрів розверток з чергуванням нахилу гвинтових зубців на вібростійкість і обґрунтування концептуальних особливостей їхньої будови

Згідно [1] гасінню коливань при багатолезовому обробленні сприяє раціональний вибір режимів різання і, особливо, швидкості різання; оптимальне заточування лез інструменту; розташування зубців, при якому досягається стійкість у системі; врахування характеристик спрямування коливальних властивостей багатолезових інструментів.

Одним з ефективних способів зменшення вібрацій при обробленні розвертанням конструктивними заходами є виконання зубців розверток з їхнім розташуванням з нерівномірним кутовим кроком. Проте [1], використання

інструментів з нерівномірним кроком зубців не є універсальним і значною мірою визначається поєднанням певних технологічних умов оброблення і станом технологічної системи. Неоднозначність прояву антивібраційного ефекту при розвертанні отворів розвертками з різним кутовим кроком розташування зубців наочно проявляється у роботах різних авторів, в яких спостерігається певна розбіжність у висновках щодо оптимальних величин різниці кутових кроків зубців. Використання додаткових демпфувальних елементів для зменшення вібрації в конструкціях осьового інструменту для оброблення отворів не завжди доцільне насамперед з компонувальних обмежень і, крім того, призводить по його подорожчання, певного зменшення надійності і зростання витрат часу і ресурсів на підготовку виробництва. Відтак удосконалення розверток у цьому напрямку може бути доцільним виключно за умов сталого виробництва і за обґрунтованої його серійності.

Вібрації при багатолезовому обробленні мають свою специфіку внаслідок того, що в різанні бере участь декілька лез, відтак динамічна система верстата отримує одночасно значну кількість збурювальних впливів, різних за величиною та напрямком.

Зворотна реакція пружної системи проявляється на кожному окремому лезі у вигляді пружних переміщень і приростів сили різання. Стійкість в системі досягається при рівності сил збурювання і демпфування, величина яких значною мірою залежить від конструкції і поточного технічного стану верстата, інструменту, жорсткості їхніх окремих елементів і сполучень, швидкості переміщення елементів технологічної системи, ступеню демпфування в них, а також від конструктивних параметрів багатолезового інструменту: форми, розмірів, кількості і взаємного розташування зубців, геометричних параметрів різальних лез, жорсткості тіла інструменту і частоти його власних коливань.

Значною мірою на динамічні процеси в технологічній системі впливають змінні технологічні чинники — механічні властивості поверхневого шару оброблюваної заготованки і рівномірність їхнього розподілу по оброблюваній поверхні, рівномірність припуску, який підлягає зрізанню, дійсні розміри використовуваного інструменту на момент застосування, які в свою чергу обумовлені первинними технологічними похибками його виготовлення, технологічними похибками відновлення інструменту і його поточним зносом. Усі наведені чинники можуть бути джерелом коливань, при тім їхня неоднозначність і випадковість виникнення впливають на величину і напрямок збурювальних сил. Зменшення коливань інструменту в принципі можна досягти керуванням режимами різання в процесі оброблення при використанні верстатів з безступінчастим регулюванням з адаптивними системами ЧПК. Проте щодо оброблення розвертанням, як і для решти видів оброблення отворів осьовим багатолезовим інструментом, на сьогодні цей метод не набув поширення через складність технічної реалізації і обмеженість застосування насамперед внаслідок того, шо він дозволяє контролювати величину і напрямок вектору збурювальних сил.

Використання розверток з чергуванням нахилу гвинтових зубців дозволяє підвищити вибростійкість процесу розвертання за рахунок великого кута

 ISBN 978-3-949059-44-5

нахилу зубців (ω≈30°) і різниці кутів нахилу суміжних зубців. При цьому рівномірне розташування зубців по торцю розвертки (переріз А—А на рис. 5) забезпечує постійність перерізу зрізуваного шару, що виключає одну з основних причин виникнення збурювальної сили, а великий кут нахилу зубців підвищує демпфування інструменту зі сторони калібрувальної частини (переріз С—С на рис. 5).

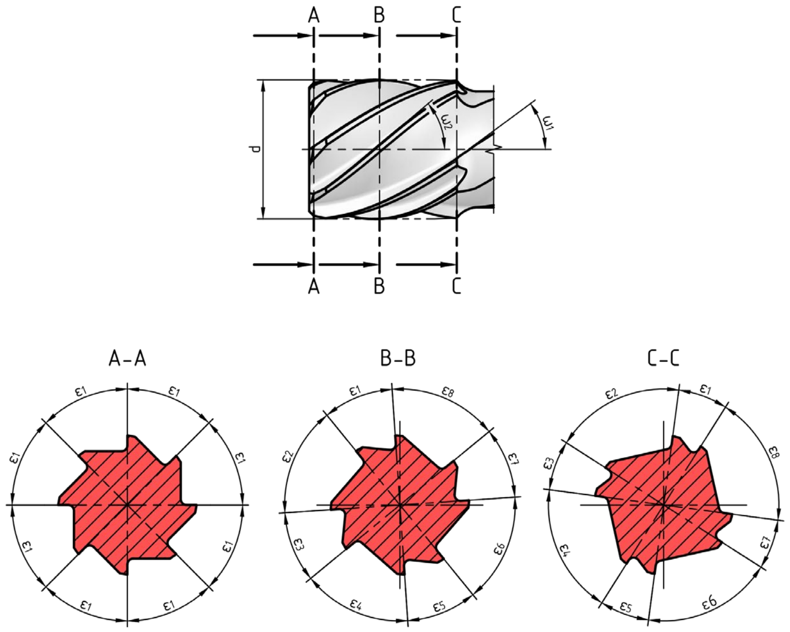


Рис. 5. Розвертки з різним нахилом зубів

Зміна величини центрального кута по мірі віддалення від торця розвертки (перерізи В—В, С—С на рис. 5) забезпечує прояв ефекту нерівномірності кутових кроків, які змінюються від 0° до 6-8°; що пояснюється забезпеченням самоперерізання хвиль, які утворюються зубцями з постійним кутом нахилу зубців і зсувом фази цих хвиль. При цьому відзначається, що чим більше кут нахилу зубців розвертки, тим менша величина різниці нахилу суміжних зубців забезпечує роботу без вібрацій.

Різальні кромки лез розверток розглянутої конструкції являють собою симетричні криві різного нахилу (ω = 40°± 4°...6°), які забезпечують сприятливі умови роботи зубців при виведенні розвертки з обробленого отвору.

Встановлено, що максимальна величина різниці нахилу зубців $\Delta\omega_{max}$ обмежена збіжністю двох сусідніх зубців у кінці калібрувальної частини залежно від довжини робочої частини розвертки $l_р$, а також діаметра d, кількості z і кута нахилу ω зубців розвертки.

Обмеження кута різниці нахилу $\Delta\omega$ не більше 8° можна пояснити забезпеченням безвібраційної роботи розверток при $\Delta\omega$ ≤6˚, а також зменшенням проникнення МОР у стружкові канавки при збіжності суміжних зубців з великим значенням $\Delta\omega$ понад 8° і технологічними складнощами, пов'язаними з обробленням стружкової канавки поміж цими зубцями.

Принцип послідовного виконання гвинтових зубців з чергуванням їхнього нахилу у пропонованому варіанті у порівнянні з їхнім розміщенням з

нерівномірним кутовим кроком надає значних переваг щодо зменшення вібрацій при обробленні насамперед завдяки більшій універсальності у поширенні на різні типорозміри розверток і у придатності до використання в широкому діапазоні режимів різання.

Таким чином оформлення робочої частини розверток за означеним принципом дозволяє значно зменшити прояв фактору вторинного збудження коливань в процесі різання. Це можна пояснити тим, що при різанні багатолезовим інструментом з послідовною зміною форми різальних кромок сліди на поверхнях різання від рухів послідовно розташованих зубців не співпадають. Перетин цих слідів виключає зковзування зубців і копіювання контактного рельєфу, що має місце при обробленні інструментами з різним кутовим кроком зубців. При розвертанні зміна ширини зрізуваного шару та довжина контакту з обробленою поверхнею калібрувальних ділянок зубців впливають на величину різниці нахилу $\Delta\omega$, а саме: зростанню обох із цих величин відповідає зменшення різниці нахилу суміжних зубців розвертки.

Висновки

У представленій роботі було розглянуто вирішення проблеми подолання вібрації при розвертанні отворів. Сучасні концепції розвитку технологій металооброблення передбачають підвищення ефективності використання різального інструменту насамперед за рахунок зростання продуктивності оброблення з суттєвим підвищенням режимів різання. За умов зростання швидкісних і силових характеристик оброблення різанням виникнення вібрацій дуже часто виявляється стримуючим фактором, який у виробничих умовах змушує накладати режимні обмеження на процеси оброблення і не повною мірою використовувати потенціальні спроможності наявних інструменту і устаткування. Відтак підвищення вібростійкості технологічних систем оброблення різанням є одним з пріоритетних напрямків інтелектуальної діяльності в галузі технологій і технічних засобів оснащення процесів оброблення різанням.

Запропоновано удосконалення методики проектування інструментів з чергуванням нахилу зубців, а саме: уточнено методику перевірних геометричних розрахунків таких інструментів і запропоновано удосконалення технологічного способу їхнього виготовлення, який забезпечує постійну уздовж різальної кромки ширину задньої поверхні зубців розверток даної конструкції. Виявлено значне зростання — до 1,5-2 разів — стійкості і надійності розверток з чергуванням нахилу зубців.

KAPITEL 6 / CHAPTER 6
CONSTRUCTION OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE RELIABILITY OF THE ELECTRIC DRIVE OF PUMP UNITS
ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ

DOI: 10.30890/2709-2313.2021-07-08-001

6.1. Характеристика об'єкту дослідження

НПС "Кременчук" - вузлова нафтоперекачувальна станція. На станції насосні агрегати поділяються на магістральні та підпірні. Основними є магістральні насоси. Проте вони невсмоктуючого типу, тобто для нормальної їх роботи рідина повинна подаватись на вхід уже під деяким тиском. Саме для створення цього початкового тиску і призначені підпірні насоси. Як підпірні, так і магістральні насоси є відцентрового типу.

На НПС "Кременчук" є чотири магістральні агрегати (три основні і один резервний) та два підпірні. Для приводу різних типів насосів задіяні різні типи електродвигунів:

- у магістральних агрегатах це синхронні електродвигуни СТД-2500-2394;
- у підпірних - асинхронні DHRL-630LB-04.

Електропостачання НПС«Кременчук» здійснюється двома незалежними лініями ПЛ-150 кВ через відкритий розподільний пристрій 150 кВ (ВРП-150 кВ) НПС «Кременчук» з двома знижувальними трансформаторами типу ТНД-16000-150/6. Два повітряних струмопроводи з'єднують трансформатори із закритим розподільним пристроєм 6 кВ. ЗРП-6 кВ виконано на базі устаткування «Шнайдер Електрик» на 29 комірок з двома системами збірних шин і секційним вимикачем (СВ). Передбачена система автоматичного ввімкнення резерву (АВР) при зникненні напруги на одному з вводів.

Всі основні і допоміжні системи НПС забезпечені електричним і автоматичним ввімкненням резерву при зникненні напруги на одному з вводів ЗРП-6 кВ, КТП-0,4 кВ, ЩСУ-0,4 кВ з селективністю по витримці часу. Для забезпечення споживачів першої категорії електроенергією при повному зникненні напруги на НПС передбачено автоматичне ввімкнення двох дизель-генераторів потужністю 200 кВт кожен.

6.2. Побудова математичної моделі надійності

Оцінка аномальності результатів спостережень. Для оцінки аномальності результатів спостережень, отримано в досліді вибірку випадкових величин розміщують в упорядкований зростаючий варіаційний ряд $t_1 \le t_2 \le ... \le t_N$ і підраховують середнє арифметичне t і середнє квадратичне S відхилень усієї вибірки (включно з тими результатами, які можуть бути аномальними). Потім вираховують U-критерій Смирнова для двох крайніх значень вибірки t_1 та t_N.

У нашому випадку статистичний ряд складається з наробок на відмови різних порядків. Тому жоден з членів статистичного ряду не може бути з нього

 ISBN 978-3-949059-44-5

виключений. Також нема підстав вважати котрийсь із результатів наслідком порушення умов випробування або ж грубої помилки при спостереженні. Отже приймаємо, що аномальних результатів у вибірці немає, і перевірку результатів спостережень на аномальність за U-критерієм Смирнова не проводимо. Також нема змісту проводити перевірку гіпотези про однорідність вибірок, адже маємо лише одну вибірку.

Перевірка гіпотези про закон розподілу. Гіпотезу про закон розподілу випадкових величин, отриманих в результаті спостереження за надійністю виробів при їх експлуатації або випробуваннях, при повних вибірках перевіряють одним із наступних методів (або послідовно двома-трьома з цих методів):

а) порівнянням гістограм густини розподілу, інтенсивності та імовірності даної випадкової величини з типовими теоретичними графіками цих функцій для різних законів;

б) по координатній сітці з імовірнісною шкалою і критерію Колмогорова;

в) по критерію Пірсона.

Для побудови гістограми випадкової величини виписані у вибірку дані розміщують в упорядкований варіаційний ряд у порядку зростання і увесь діапазон їх зміни поділяють на декілька інтервалів. Кількість інтервалів в залежності від кількості даних у вибірці рівна (1):

$$k = 1 + 3{,}3 \cdot \lg N \qquad (1)$$

де к - кількість інтервалів; N - кількість даних у вибірці.

Довжина інтервалу визначається (2):

$$\Delta t = (t_{\max} - t_{\min}) / N \qquad (2)$$

де Δt - довжина інтервалу; $t_{\max}$ - максимальне значення випадкової величини у вибірці; $t_{\min}$ - мінімальне значення випадкової величини у вибірці; N - кількість даних у вибірці.

Для нашого досліджуваного об’єкту N=36, а k=6,136 (згідно (1)). Приймаємо k = 6. Тоді, згідно (2) довжина інтервалу складає 27033,33 год.

Для кожного інтервалу визначають і заносять в розрахункову таблицю (таблиця 1) наступні величини:

– число значень випадкової величини m_i, що припадає на і-й інтервал Δt_i;

– загальне число значень випадкової величини від першого до початку і-го інтервалу $\sum_{j=1}^{i-1} m_i$;

– загальне число значень випадкової величини від першого до кінця і-го інтервалу $\sum_{j=1}^{i} m_i$.

Далі для кожного інтервалу визначають і заносять у розрахункову таблицю (таблиця 1) статистичні параметри розподілу даної випадкової величини:

– густину розподілу f_i*;

– інтенсивність відмов λ_i*;

– функцію розподілу F_i*;
– ймовірність безвідмовної роботи P_i*.

Зазначені параметри розподілу визначають за формулами:

$$f_i^* = m_i /(N \cdot \Delta t), \qquad (3)$$

$$\lambda_i^* = \frac{m_i}{(N - \sum_{j}^{i-1} m_i)}, \qquad (4)$$

$$F_i^* = \frac{\sum_{j}^{s} m_i}{N}, \qquad (5)$$

$$P_i^* = 1 - F_i^*. \qquad (6)$$

Результати розрахунку статистичних параметрів розподілу даної випадкової величини зведені в таблицю 1.

Таблиця 1 - Розрахунок статистичних параметрів

	Δt_i,год	m_i	$\sum_{j=1}^{i-1} m_i$	$\sum_{j=1}^{i} m_i$	f_i*	λ_i*	F_i*	P_i*
1	18500-45533,33	7	0	7	$7{,}19\cdot10^{-6}$	$7{,}19\cdot10^{-6}$	0,194444	0,805556
2	45533,33 - 72566,67	4	7	11	$4{,}11\cdot10^{-6}$	$5{,}1\cdot10^{-6}$	0,305556	0,694444
3	72566,67 - 99600	6	11	17	$6{,}17\cdot10^{-6}$	$8{,}88\cdot10^{-6}$	0,472222	0,527778
4	99600 - 126633,3	7	17	24	$7{,}19\cdot10^{-6}$	$1{,}36\cdot10^{-6}$	0,666667	0,333333
5	126633,3 - 153666,7	7	24	31	$7{,}19\cdot10^{-6}$	$2{,}16\cdot10^{-6}$	0,861111	0,138889
6	153666,7-180700	5	31	36	$5{,}14\cdot10^{-6}$	$3{,}7\cdot10^{-6}$	1	0

Після заповнення розрахункової таблиці (таблиця 1) будують гістограми густини розподілу f*, інтенсивності відмов λ*, функції розподілу F* та ймовірності безвідмовної роботи P*. Для чого на осі абсцис відкладають у певному масштабі усі часові інтервали Δt_i і на кожному з них, як на основі, будують прямокутник, площа якого пропорційна значенню даної функції

(f_i*,λ_i*, P_i* або P_i*) для даного інтервалу (рисунок 1- рисунок 4).

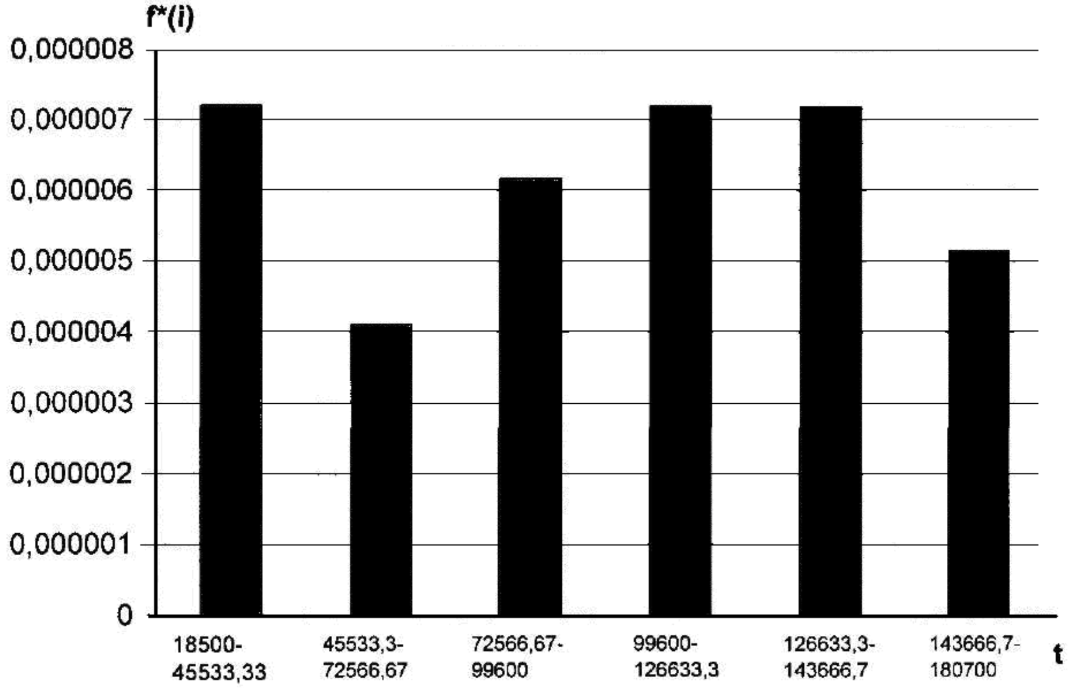


Рисунок 1 – Гістограма густини розподілу

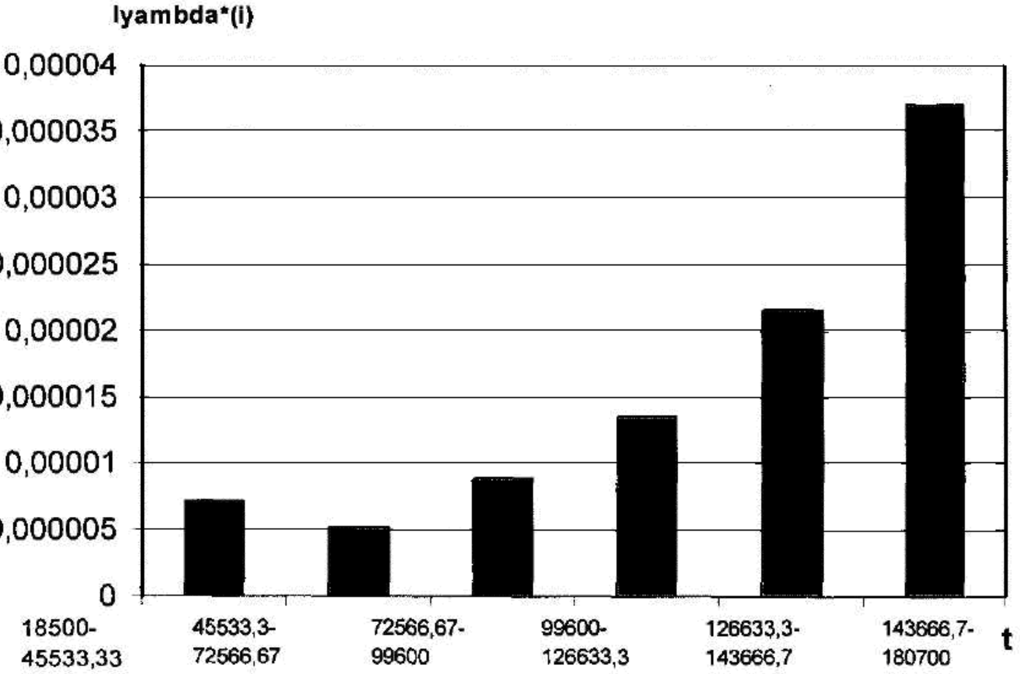


Рисунок 2 - Гістограма інтенсивності відмов

Порівнюючи побудовану гістограму з типовими графіками теоретичних функцій f(t), λ(t), F(t) та P(t) [1, с78] для різних законів розподілу, орієнтовно визначають, до якого теоретичного закону найбільш близьким є розподіл статистичних даних. При порівнянні виявлено, у даному випадку можуть підійти експоненційний закон розподілу і закон розподілу Вейбула. Який саме

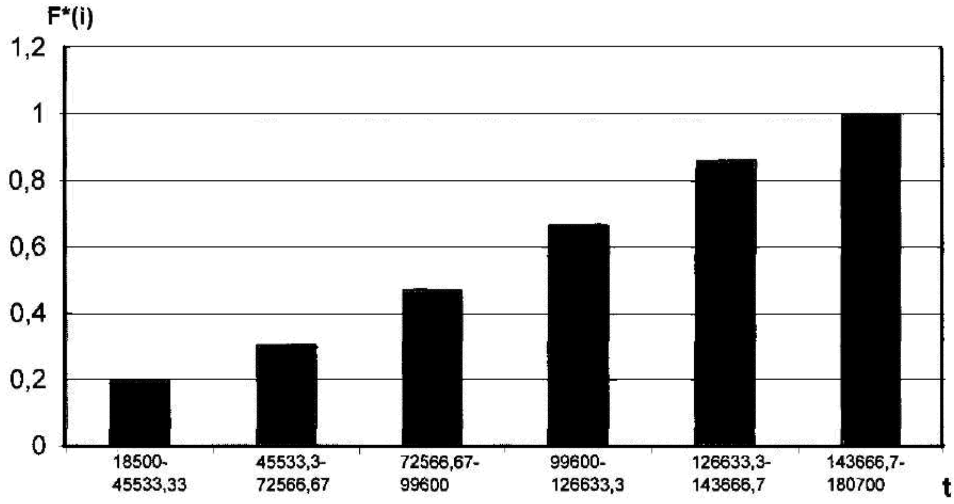


Рисунок 3 - Гістограма функції розподілу

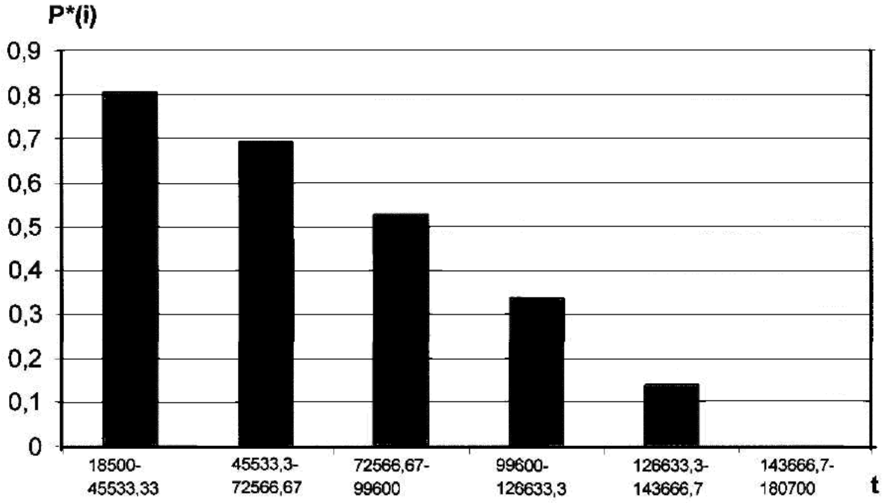


Рисунок 4 - Гістограма ймовірності безвідмовної роботи

з них, визначимо пізніше по координатних сітках з імовірнісними шкалами. Різні закони розподілу характеризуються різними параметрами розподілу випадкових величин

Параметр експоненційного розподілу - інтенсивність відмов λ - рівна

$$\lambda = 1/t_{0,632} \quad , \tag{6}$$

де $t_{0,632}$ - середнє арифметичне значення випадкової величини, рівне для експоненційного закону абсцисі точки перетину апроксимуючої прямої із горизонталлю F=0.632 .

Параметри розподілу Вейбула визначаються за допомогою координатної сітки (рисунок 6) наступним чином:

$$a = t_{0,632}, \tag{7}$$

$$b = \frac{1}{\ln t_{0,934} - \ln t_{0,632}} \quad , \tag{8}$$

де $t_{0,934}$ - абсциса точки перетину апроксимуючої прямої із горизонталлю

F=0,934 координатної сітки.

При перевірці гіпотези про закон розподілу випадкової величини по координатних сітках з імовірнісними шкалами статистичні значення функції розподілу випадкової величини F_i* із розрахункової таблиці 1 наносимо на відповідну координатну сітку (точки з координатами Δt_i та F_i*). Через нанесені точки проводимо пряму так, щоб відхилення точок від прямої мали якнайменше значення (в масштабі імовірнісної шкали F*) і точки розміщувались рівномірно по обидва боки від прямої. Після цього визначаємо відхилення усіх статистичних точок від проведеної апроксимуючої прямої по ординаті і вибираємо найбільше з них $D_{оп}$.

По таблиці D-критерія Колмогорва (таблиця 10 в [20]) в залежності від числа дослідів N визначаємо табличне значення $D_т$. Якщо має місце нерівність $D_{оп}<D_т$, то статистичні дані не суперечать теоретичному закону, який ми розглядаємо. Якщо ж $D_{оп}>D_т$,то статистичні дані не узгоджуються з цим законом і треба переходити до інших координатних сіток.

При перевірці гіпотези про закон розподілу по координатних сітках з імовірнісними шкалами параметри розподілу випадкових величин визначаються графічно. По координатних сітках (рисунок 5 та рисунок 6) можна дійти висновку, що найбільш точно даний розподіл описує закон Вейбула. Проте відповідність цьому закону ще слід перевірити за допомогою критеріїв Колмогорова і Пірсона.

Здійснюємо перевірку за критерієм Колмогорова. Максимальне розходження між функціями F*(t) та F(t) визначається за виразом:

$$D_{max}= F^*(t) - F(t) \qquad (9)$$

і становить 1,5 . Далі визначаємо λ, (не слід плутати з інтенсивністю відмов):

$$\lambda = D_{\max} \cdot \sqrt{N} \qquad (10)$$

де N - загальне число випадкових величин (N=36); λ=0,9.

За таблицею 10 в [20] знаходимо P(λ): P(0,9)=0,393. Гіпотезу вважають такою, що не суперечить дослідним даним, якщо P(λ)=0,01-0,5 (згідно [20]). Отже, перевірка за критерієм Колмогорова підтвердила гіпотезу про закон розподілу.

Здійснюємо перевірку за критерієм Пірсона. Критерій Пірсона визначаємо за виразом:

$$\chi^2 = \sum_1^k \frac{(m_i - Np_i)^2}{Np_i} \qquad (11)$$

де К - кількість інтервалів статистичного ряду; m_i - частота в і-му інтервалі; N - загальне число значень випадкової величини; Pі - теоретична ймовірність потрапляння випадкової величини в і-й інтервал.

Ймовірність потрапляння випадкової величини в і-й інтервал рівна приросту функції ймовірності в цьому інтервалі.

У даному разі $\chi^2 = 3{,}97 \cdot 10^{-30}$. Розрахувавши χ^2 , за табл. 9 [2] в залежності від числа ступенів свободи визначаємо ймовірність співпадання емпіричного і теоретичного розподілів.

Згідно [2], якщо знайдена ймовірність P≥ 0,1 , то можна вважати, що

статистичні дані не суперечать прийнятому теоретичному розподілу. Число ступенів свободи рівне:

$$r=K-s \tag{12}$$

де К - кількість інтервалів; s - кількість обов'язкових зв'язків.

Для закону розподілу Вейбула s=3. Тоді r=3 , а тому (згідно табл. 9[20]) Р=0,99. Отже перевірка за критерієм Пірсона також підтвердила гіпотезу про закон розподілу.

Виявлено, що у даному випадку має місце закон розподілу Вейбула. Тепер визначаємо його параметри. Згідно рис.4.6, $t_{0,632}$= 105000, $t_{0,934}$=149000(год). Тоді a=105000; b=2,87.

Тоді ймовірність безвідмовної роботи становитиме:

$$P(t)=\exp\left(-\left(\frac{t}{a}\right)^{b}\right) \tag{13}$$

або, з урахуванням відомих значень параметрів закону розподілу Вейбула:

$$P(t)=\exp\left(-\left(\frac{t}{105000}\right)^{2,87}\right) \tag{14}$$

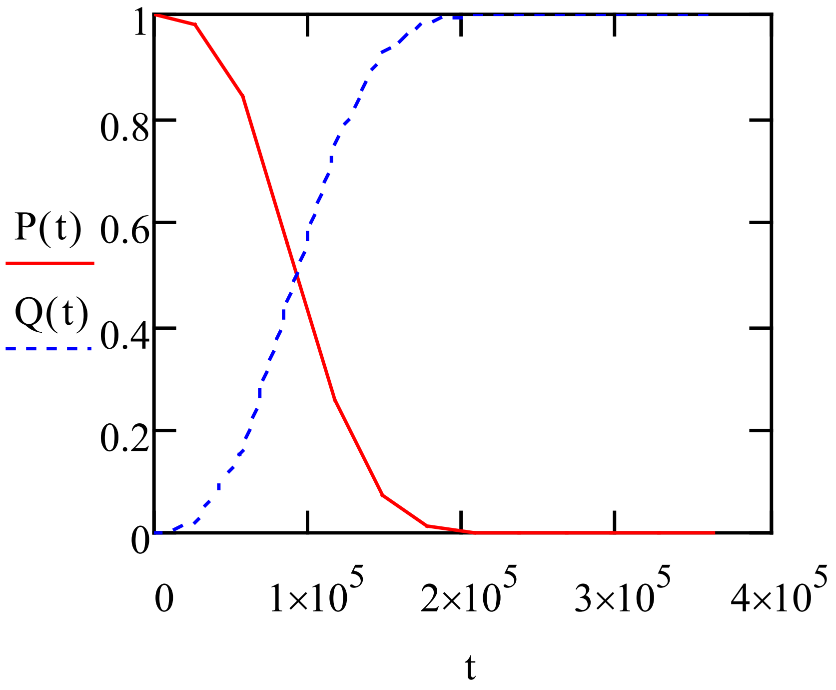


Рисунок 5 – Ймовірність безвідмовної роботи двигунів приводу відцентрових насосів

Далі проведемо визначення гамма-процентних показників надійності. Наробки двигунів до відмови або до виходу в капітальний ремонт являють собою випадкові величини, розподілені в інтервалі від найменшої до найбільшої наробки. Представляє інтерес визначення наробки, протягом якої

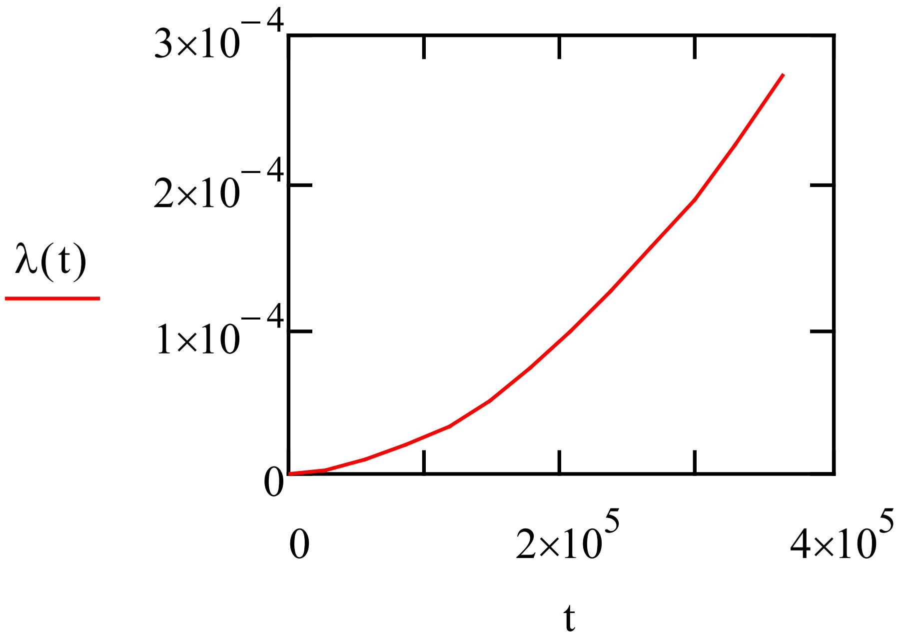


Рисунок 6 –Інтенсивність відмов двигунів приводу відцентрових насосів

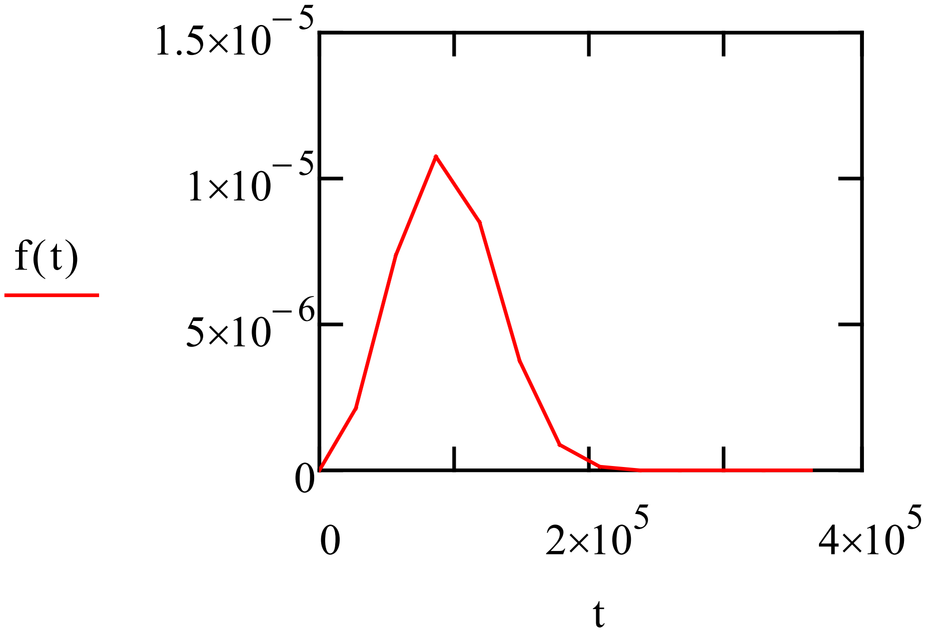


Рисунок 7 –Частота відмов двигунів приводу, відцентрових насосів

двигуни не відмовлять з деякою ймовірністю у, тобто по закінченні якої γ(%) двигунів будуть знаходитись у робочому стані.

Гамма-процентні показники надійності для закону Вейбула визначаються за формулами:

$$t_\gamma = \frac{\bar{t}}{K_B}\sqrt[b]{-\ln\frac{\gamma}{100}} \quad (15)$$

де γ - регламентована ймовірність, $\bar{t}$ - середє арифметичне значення вибірки,

b - параметр закону Вейбула. $К_в$, при b=2.87, становить 0,891; значення $\bar{t}$ становить 61738,89 год.

6.3. Математична модель надійності статорної обмотки

Для подібних виробів обов'язковими кількісними показниками є середній технічний ресурс до капітального ремонту Тк і наробка на відмову Т. Ці два показники визначаються через імовірність відсутності пробою ізоляції та імовірність безвідмовної роботи ізоляції обмотки:

$$T_K = \int_0^{\infty} H(t)dt \tag{16}$$

$$T = \int_0^{\infty} P(t)dt \tag{17}$$

$$P(t)=H(t)\cdot P(R) \tag{18}$$

де P(R) - ймовірність підтримання заданого рівня опору ізоляції, H(t) - ймовірність відсутності пробою ізоляції, P(t) - ймовірність безвідмовної роботи ізоляції обмотки.

З точки зору надійності обмотка синхронного двигуна являється системою, елементи якої з'єднані послідовно і резервування відсутнє, тому

$$H(t)=H_B(t)\cdot H_K(t)\cdot H_{M\Phi}(t) \tag{19}$$

де $Н_в(t)$, $Н_к(t)$, $Н_{МФ}(t)$ - ймовірність відсутності пробою міжвиткової, корпусної та міжфазної ізоляції обмотки відповідно.

Складові формули 19 залежать від надійності елементів відповідного виду ізоляції. За елемент виткової ізоляції приймається ізоляція між парою сусідніх витків, за елемент корпусної ізоляції - ізоляція одного паза або його частини, за елемент між фазної - ізоляція міжфазної прокладки чи її частини.

Для розрахунку ймовірності відсутності пробою ізоляції обмоток синхронних електро двигунів застосовується математична модель, побудована на основі відомого в теорії надійності рівняння, яке пов'язує випадкову величину міцності з випадковою величиною навантаження. В якості параметра, що характеризує міцність ізоляції, прийнята пробивна напруга елемента ізоляції, а за навантаження приймається прикладена до елемента електрична напруга. Ймовірність того, що елемент виткової ізоляції не вийде з ладу, буде рівна імовірності того, що його пробивна напруга буде перевищувати прикладену до елемента напругу. Ймовірність відсутності пробою міжвиткової, корпусної та міжфазної ізоляції обмоток для синхронних двигунів типу СТД (згідно [2]) визначається наступними виразами, відповідно:

$$H_B(t) = e^{-\left(\frac{t}{29000}\right)^{0,64}} \tag{20}$$

$$H_K(t) = e^{-0,00016\cdot t} \tag{21}$$

$$H_{M\Phi}(t) = e^{-\left(\frac{t}{6000}\right)^{0,5}} \tag{22}$$

Тоді ймовірність відсутності пробою ізоляції складає:

$$H(t) = e^{-\left(\frac{t}{29000}\right)^{0,64}} \cdot e^{-0,00016 \cdot t} \cdot e^{-\left(\frac{t}{6000}\right)^{0,5}} \qquad (23)$$

Звідси, ймовірність безвідмовної роботи ізоляції обмотки :

$$P(t) = 0,95 \cdot e^{-\left(\frac{t}{29000}\right)^{0,64}} \cdot e^{-0,00016 \cdot t} \cdot e^{-\left(\frac{t}{6000}\right)^{0,5}}$$

де 0,95 - це P(R), згідно [2].

Висновки

Побудовано математичні моделі надійності приводу відцентрових насосів. Визначено закон розподілу, тобто залежності ймовірності безвідмовної роботи досліджуваних електродвигунів від часу, що дає змогу прогнозувати кількісні показники надійності. Перевірку гіпотези про закон розподілу здійснено методом порівняння гістограм густини розподілу, інтенсивності відмов та ймовірності безвідмовної роботи з типовими теоретичними графіками цих функцій для різних законів; за координатними сітками з імовірнісними шкалами та критерієм Колмогорова і за критерієм Пірсона. Виявлено, що має місце закон розподілу Вейбула. Також побудовано математичну модель надійності статорної обмотки та визначено гамма-процентні показники надійності.

KAPITEL 7 / CHAPTER 7
ANALYSIS OF FINANCIAL AND TECHNICAL INDICATORS OF SYSTEM EFFICIENCY IN DYNAMIC MODES
АНАЛІЗ ФІНАНСОВИХ ТА ТЕХНІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ В ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМАХ

DOI: 10.30890/2709-2313.2021-07-08-018

Introduction

Smart Grid is considered as an electrical network or system that integrates the actions of all connected participants through the use of intelligent solutions in order to ensure a sustainable, cost-effective and secure energy supply. The concept of Smart Grid development in energy in a more global sense is not only the latest energy technologies, but also modern information and communication technologies of billing, e-commerce, modeling and data storage, virtualization, computer security, distributed computing, collection, processing and transmission real time information.

In implementing the provisions of the Smart Grid concept, it is necessary to note the outpacing growth of the role of local electricity markets for the development of local energy supply systems (Microgrid), in particular, the evolution of Microgrid as active consumers (prosumer) and virtual power plants (Virtual Power Plant, VPP). Generation (DRG) - (Distributed Energy Resources, DER) [2, 3, 4]. Retail electricity prices that change over time significantly help reduce the cost of producing or purchasing electricity in the system, meet operational capacity reserve requirements, and so on.

7.1. Systems of active management of distributed energy facilities

Depending on the type of managed network (Network Manager) it is possible to distinguish between power transmission control systems (TMS) and power distribution control systems (DMS) energy management systems (EMS) [6, 7]. Prior to the abolition of state regulation, energy management systems (EMS) were mainly used for integrated management of electricity generation and transmission. After the abolition of state regulation, the separation of these two functions led to the creation of power generation management systems (GMS) for independent management of generating capacity.

For Microgrid and VPP, the DER Management System (DERMS) optimally manages the operation of DER to provide network services, facilitates alternatives, and allows DER to participate in markets. DERMS allows you to increase situational awareness while increasing DER penetration by providing DER modeling, aggregation, and grouping. There is a problem of building new algorithms of accounting and control, when when building a control system it is necessary, along with the technical (technological) circuit, to use the economic control circuit.

The new RES support mechanism in Ukraine should take into account: the introduction of new RES support mechanisms should be carried out together with a significant increase in carbon taxes, the rates of which in Ukraine are lower than in

Europe; non-tariff methods of RES support; maximum support for RES for self-generation (consumption of energy produced by the consumer without return to the grid); creating favorable financial conditions not only for the development of distributed generation, but also for the establishment of means of energy storage and conversion by households and businesses.

7.2. Dynamic pricing in Microgrid

Reducing the price paid by consumers for electricity is invariably the first reason for the introduction of competitive electricity markets [8]. Electricity generation costs depend solely on the type of technology and fuel used to generate electricity.

Consumer behavior is related to consumption patterns, as most consumers use large electrical loads at the same time. The expected dynamic pricing program affects the behavior of consumer demand [9]. Changing consumption patterns at the macro level can affect strategic decisions, such as the construction of power plants, as well as increase the efficiency of operating costs. Consumers may be interested in dynamic pricing if they are well informed and if the schemes are designed in an easy-to-use way to allow them to save on their bills [10].

The active introduction of Microgrid in liberalized local markets has necessitated the implementation of flexible tariff policies, in particular, dynamic tariffs [1, 2]. There is a need to consider the possibility of forming these "adjustable" components on the basis of power, as well as carefully study the possibility of more dynamic formation [5, 11, 12].

The analysis showed that the technical implementation of Microgrid is quite fully developed for all levels, in particular, with time forecasting and the day ahead. However, it is important to conduct research to assess the demand-price ratio at the micro level, to determine the impact of dynamic pricing on Microgrid functions, taking into account the factors affecting electricity demand, depending on generator and load modes. It is important to optimize fuel consumption through the implementation of the dynamic pricing methodology and, as a consequence, the reduced costs for the production of 1 kWh of electricity in Microgrid.

Let $c_e(t)$ and $c_f(t)$ be the tariff for electricity and the unit cost of fuel; $P(t)$ and B ($P(t)$, t) - power consumption and current consumption of primary fuel. With the allocation of the constant components B_0 costs of Microgrid, and variable B_N ($P(t)$, t) non-fuel costs (in particular, the operation of Microgrid) and the corresponding cost indicators c_0 ($P(t)$) and c_N ($P(t)$, t) we can write the value of the current cost C_F, $N_F(t)$ for power generation in the Microgrid interval [0, t)

$$C_{F,NF}(t) = \int_0^t c_0(P(t))dt + \int_0^t c_N(P(t),t)dt + \int_0^t c_f(t)\cdot B(P(t),t)dt$$

The task is to optimize the power processes in Microgrid in terms of efficient operation of both generators and loads.

Then for the cost of electricity consumed CE (t) and the cost of fuel consumption CF (t) in the interval [0, t) we can write:

$$C_E(t) = \int_0^t c_e(t) \cdot P(t)dt;$$

$$C_F(t) = \int_0^t c_f(t) \cdot B(P(t),t)dt;$$

We describe the features of the individual elements of Microgrid in terms of determining the optimal and suboptimal modes of their operation. In the future, we use the Frieze power and the Q_{OB} exchange power as a criterion for the optimality of processes in Microgrid [13].

In order to reduce losses by analyzing the possibilities of power supply control, the method of estimating suboptimal levels based on the Frieze power index Q_f [13] is usually used, which is defined as the quadratic discrepancy between full S and active P power: $Q_ф = \sqrt{S^2 - P^2}$.

Frieze's power allows to identify groups of consumers with the greatest impact on the overall unevenness of the system and to analyze possible options for corrective action. Losses in Microgrid transmission and distribution lines are neglected.

To implement dynamic tariffing by state, namely to record changes in the amount of energy received in dynamic mode according to relations (3), (4), the generalized algorithm of Smart-counter contains the following steps [12, 14]:

1. Installation of initial standards.
2. Introduction of the i-th mode. Control of W and B values and ΔW and ΔB increments.
3. Switch to the new mode $i = i + 1$.
4. Calculation of the instantaneous cost of fuel $B_i(P)$ and electricity $W_i(P)$.
5. Determination of increases in the cost of fuel $\Delta B_i(P)$ and electricity ΔW_i $P)$.
6. Verification of the condition: whether the value is in the i-th zone of tariff constancy, ie verification of the conditions: $\Delta B_i(P) > \varepsilon_B(P)$ and electricity $\Delta W_i(P) > \varepsilon_W(P)$, $\varepsilon_B(P) > 0$ and $\varepsilon_W(P) > 0$.
7. Transition to the installation of a new electricity tariff $W_i(T)$.
8. Control of levels of generation and consumption of the electric power according to the i-tariff.
9. Formation of the current report of spreadsheets and graphs on instantaneous and integrated values of tariffs, generation and consumption of electricity.
10. Transition, if necessary, to the 2nd stage; otherwise to step 11.
11. Removal of information about instantaneous and integral characteristics at specific times.
12. Completion of the algorithm.

7.3. Algorithm for calculating the price of primary fuel depending on the uneven consumption of active power.

To estimate the cost of primary fuel in Microgrid dynamic mode, we present an algorithm for calculating the price of primary fuel depending on the uneven consumption of active power over a period of time T^* (duration from minutes, hours,

several hours to days, etc.). Let's mark it as some technological period of T_T. To simplify the calculations, we assume that fuel costs depending on the level of active power consumption are known, and the cost of primary fuel does not change over time and is sustainable [14].

To estimate the cost of primary fuel in Microgrid dynamic mode, it is necessary to analyze the graphs of generation and consumption of electricity, in particular, graphs of electrical loads. Different types of generation and consumption of electricity reflect the functions *P (t)*, *Q (t)* or *I (t)*, which are integral characteristics of the change in load on the selected interval (minutes, hours, days). Depending on the methods and accuracy of measurement (approximation), the load graph can be considered as a continuous or stepped curve [15].Наведемо кроки алгоритму оцінки фінансових та технічних показників ефективності роботи Microgrid в динамічних режимах розрахунку вартості первинного палива.

Step 1. Determination of the functional dependence of the active power *P (t)* on the interval T^*. As an example in Fig. 1 shows a graph of changes in active power *P (t)* with the selection of the controlled time interval T^*.

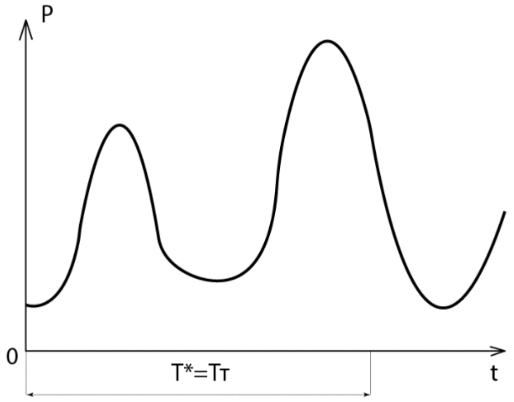


Figure 1 - Graph of active pulling *P(t)*

Step 2. We assume that as a result of approximation of the function *P(t)* by piecewise constant functions at individual intervals, we constructed a step graph of the dependence of the active power *P(t),* shown in figure 2.

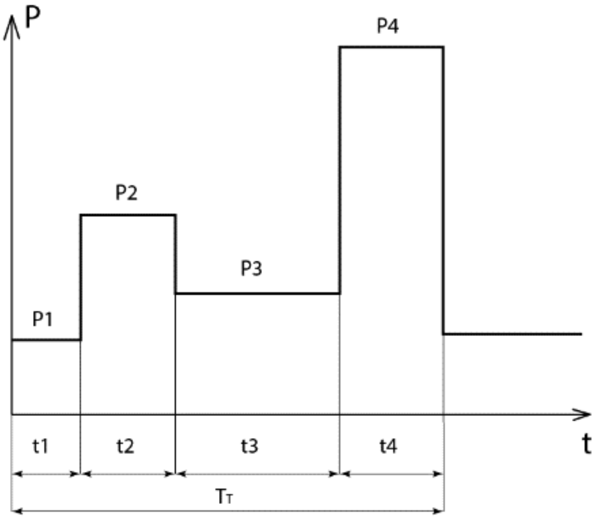


Figure 2 - Approximations of the graph of the abundance of active pressure *P(t)*

Step 3. Forming a graph of the dependence of primary fuel consumption *B(P)*. In the general case, the graph can be constructed by using normative (average) values or experimentally. If the dependence graph was previously unknown, then the graph *B(P)* is constructed by the root-mean-square approximation method, we find parameters not of a linear function but of a quadratic one, when the approximating function is a quadratic dependence: $y = ax^2 + bx + c$ [16].

Step 4. Linearization of the graph of the dependence of primary fuel consumption *B(P)* and determination of the cut-off points at which there is a transition from one approximating linear function to another (figure 3). At these points, the nature of the costs will change according to the slope coefficients of linear approximations a_1, a_2, a_3, ie the slope coefficients of linear approximations characterize the slope of the lines *B(P)*. Note that there are a significant number of methods for approximating nonlinear functions [17]. In this case, we use the piecewise linear method of approximation of a nonlinear function.

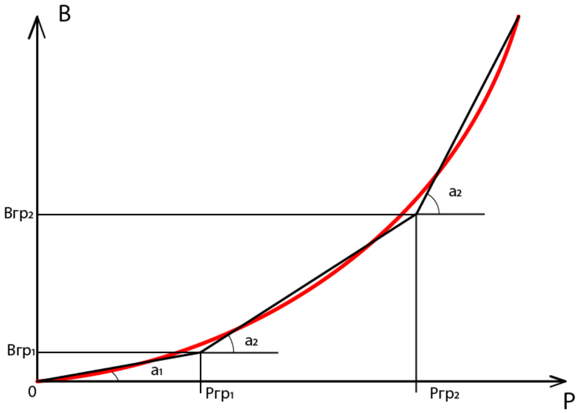


Figure 3 - Approximate graph of the dependence of primary fuel consumption on changes in active power consumption *B(P)*

We reduce the nonlinear function to several (in this case up to three) intervals with linear dependences (figure 3), each of which corresponds to its coefficient a_1, a_2, a_3 and the value of the power limit (characteristic breakpoints): P_{gr1}, P_{gr2}, P_{gr3}.

Step 5. Determining the number of the interval Δt_i, which belongs to the set of values of active power P_i, which consumes the equivalent load.

According to the results of step 2, we have as the initial set of values of P_i depending on time *t*. The power of P_i has a constant value at a certain time interval Δt_i. therefore it is necessary to determine which i-in the interval of fig. 4 belongs to the set of power values P_i:

$$P_{gr(i-1)} \le P_i \le P_{gr(i)}. \quad (8)$$

Step 6. Calculation of fuel consumption at *n* intervals (in this case, these intervals are denoted by I, II and III) in accordance with the function shown in figure 4 (by the value of $P_{\text{гр},i}$, a_i, $i = 1, 2, 3$):

$$B_{\text{Ii}} = P_{\text{Ii}} \cdot \alpha_1;$$

$$B_{\text{IIi}} = B_1 + P_{\text{IIi}} \cdot \alpha_2;$$

$$B_{\text{IIIi}} = B_2 + P_{\text{IIIi}} \cdot \alpha_3. \quad (9)$$

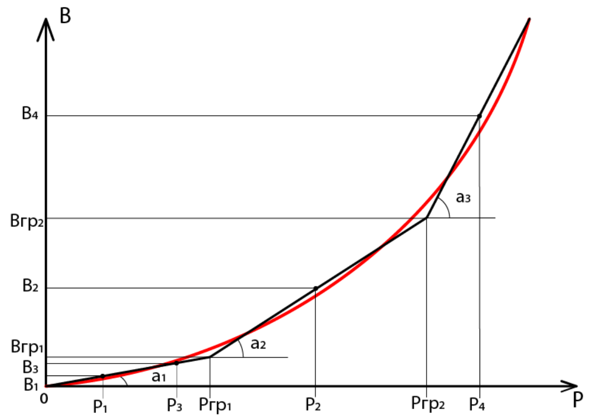


Figure 3 - Graph of the dependence of primary fuel consumption *B(P)* with indication of limit and current values

Step 7. Calculate the price of primary fuel at each interval. To do this, first calculate the total amount of primary fuel, using the value of primary fuel consumption for a certain period of time according to the formula:

$$W_B = \sum B_i \cdot \Delta t_i . \qquad (10)$$

Then calculate the cost of C_B primary fuel by the formula:

$$C_B = c_B \cdot W_B . \qquad (11)$$

The cost of primary fuel c_B can be of different nature, for example, both linear and nonlinear. Next, we form a graph of the dependence of the cost of primary fuel on capacity (figure 5).

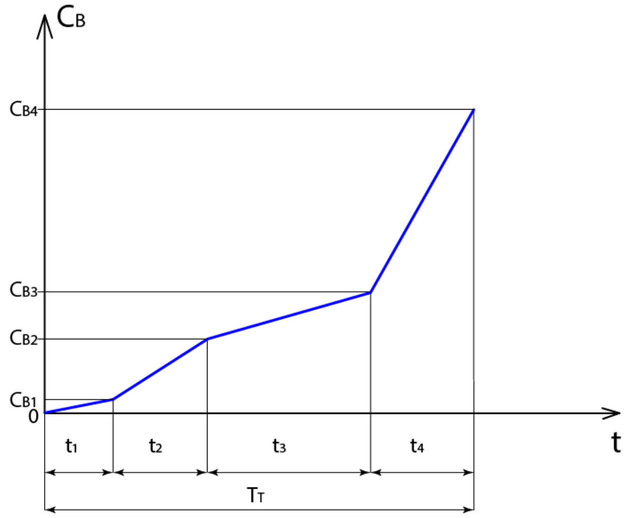


Figure 5 - Graph of the dependence of the cost of primary fuel *C_B(t)*

Step 8. Calculation of the optimal value of active power P_{OPT}, which corresponds to the uniform consumption of electricity and is characterized by minimal use of primary fuel. Steady consumption leads to a reduction in electricity losses and, consequently, to a reduction in fuel consumption. Let the value of P_{OPT} belong to the 1st interval (figure 9). According to the type of active power function shown on figure 2, we find the most rational variant of active power consumption for constant volumes of energy transfer W in the interval $T^* = T_T$. This will be when the active power consumption in the T_T interval is constant.

ISBN 978-3-949059-44-5

To transmit the same amount of electricity with uniform consumption, power is determined by the following formula.

$$P_{\text{OPT}} = \frac{\sum P_i \cdot \Delta t_i}{\sum \Delta t_i}. \qquad (12)$$

The calculated capacity will be considered the baseline, in relation to which we will assess the impact of uneven consumption on the total cost of primary fuel use.

Step 9. Calculate the optimal value of primary fuel consumption. To do this, we use the obtained value of the optimal active power P_{OPT}, calculated by formula (10). Determine the costs using the formula:

$$W_{\Sigma OPT} = P_{OPT} \cdot \alpha_1 \sum \Delta t. \qquad (13)$$

In this case, the amount of primary fuel consumption will depend on the observation interval T^* and the accuracy of the approximation of the above functional relationships. The greater the number of Δt_i intervals, the more accurately the optimal value of the active power of the P_{OPT} will be determined, which improves the reliability of the obtained analysis results.

Step 10. Using the optimum value of primary fuel consumption found above (11), the optimal value of the price of primary fuel is calculated according to the formula:

$$C_{\Sigma \text{POT}} = c_B \cdot W_{\Sigma \text{POT}}. \qquad (14)$$

Depending on the nature of the change in the tariff of primary fuel, the optimal value of the price of primary fuel will change. With a more dynamic change in the tariff, the number of intervals to be considered will increase and, as a result, the volume of settlements will increase. To increase the accuracy of the calculation, it is advisable to take into account all aspects (factors of influence) of changes in the tariff of primary fuel.

Step 11. Assess how different the current value of the price of primary fuel $C = C_{\text{POT}}$ from the optimal value C_{OPT}. We can offer a relative value as the difference between the current value of the price of primary fuel and the optimal value obtained in the previous step (12), divided by the optimal value of the price of primary fuel by the formula:

$$\delta C = \frac{C_{\text{POT}} - C_{\text{OPT}}}{C_{\text{OPT}}};$$

$$\delta C = \frac{C_{\text{POT}}}{C_{\text{OPT}}} - 1. \qquad (15)$$

To illustrate the effect of the non-uniformity of the graph *P(t)* on the value of the current C_{POT} and the optimal C_{OPT} value of the primary fuel price for specific values of the approximating functions of the generation and consumption of electricity shown in figure 2, use the following active power values: $P_1 = 1$ kW, $P_2 = 3$ kW, $P_3 = 2$ kW, $P_4 = 6$ kW. The time intervals for the values of $P_1, \ldots, P_4$ are respectively $t_1 = 1$ h, $t_2 = 2$ h, $t_3 = 4$ h, $t_4 = 2$ h. Assume that the tariff for primary fuel is c_B = \$ 27,72 / liter.

To estimate the difference between the current and optimal values of the price of

primary fuel, we find by formula (11) the value of the current price of primary fuel C_{POT} = \$ 267,14 and by formula (14) the optimal value of the price of primary fuel C_{POT} = \$ 196,13. Then according to (15) the value of δC is equal to:

$$\delta C = \frac{267,14 - 196,13}{196,13} = 0,36.$$

To analyze the impact of uneven consumption of active power *P(t)* on the price of primary fuel, reduce the active power P_4 by 4 times, P_4 (1) = 0,25 P_4 (figure 5). Using the algorithm, we find new values of the current C_{POT} = \$ 198,94 and the optimal C_{OPT} = \$ 178,26 value of the price of primary fuel and evaluate their ratio. For this case:

$$\delta C = \frac{198,94 - 178,26}{178,26} = 0,12.$$

With decreasing power P_4 4 times, P_4 (2) = 0,25 P_4 and, accordingly, increasing the interval t_4 also 4 times, so t_4 (2) = 4 t_4 (figure 5). Performing all the steps of the algorithm, we list the value of the current C_{POT} = 244,4 \$ and the optimal C_{OPT} = 191,3 \$ value of the price of primary fuel and have the following ratio:

$$\delta C = \frac{244,4 - 191,3}{191,3} = 0,277.$$

Therefore, with a more uniform value of power consumption *P(t)*, the current price of primary fuel will approach the optimal value. This is due to the fact that when the unevenness of consumption is reduced, fuel consumption decreases, and therefore the total price of fuel decreases accordingly.

Conclusions

1. It is shown that the advantages of dynamic charging are most fully manifested at the local level, and modern interaction of participants in the market of ancillary services involves increasing the role of dispersed generation aggregators and dispersed consumption aggregators. development of business models with a combination of physical, communication, information and business levels.

2. Developed algorithm for calculating the price of primary fuel depending on the uneven consumption of active power over a period of time allows you to use dynamic charging when changing modes of Microgrid generators, while providing an adequate price for consumers and producers of both primary fuel and electricity supplied and consumed. Using the Frieze power modification, the developed algorithm provides for the calculation of the optimal value of active power, which corresponds to a uniform power consumption and is characterized by minimal use of primary fuel.

3. The need to combine technical and economic (financial, price) indicators in business models and technical means at the Microgrid level is substantiated, which will significantly improve the process of managing electricity demand in the local electricity market. The proposed algorithm allows us to study the impact of a fairly rapid change in the level of generator power and power consumption on changes in the cost of the system, the introduction of demand side management mechanisms and measures to improve energy efficiency.

KAPITEL 8 / *CHAPTER 8*
DETERMINATION OF NETWORK ATTACKS USING NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES
ВИЗНАЧЕННЯ МЕРЕЖЕВИХ АТАК З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОМЕРЕЖНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

DOI: 10.30890/2709-2313.2021-07-08-003

Introduction

Formulation of the problem. Intrusion-Detection Systems (IDS) are used to detect network attacks in real time. In the information and telecommunication system (ITS) of railway transport, the problem of a large volume of network traffic arises, since standard approaches to data processing cease to be effective. One of the most effective approaches to classifying a large amount of data is the use of neural network technology. This approach allows detecting not only already known network attacks, but also detecting new ones.

Analysis of recent research. The most promising areas are IDS, built on the basis of neural networks (NN): multilayer perceptron (Multi Layer Perceptron, MLP); Radial Basis Function Network (RBF), Self Organizing Maps (SOM) and Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System (ANFIS). For example, [23] analyzes only DDoS attacks using TCP, UDP and ICMP protocols due to their popularity among attackers, in [24] some threats were detected in the network based on the analysis and processing of parameters of network connections using the stack of TCP/IP protocols, using a neural network configuration 19-1-25-5 (19 – the number of initial neurons ; 1 – the number of hidden layers; 25 – the number of hidden neurons; 5 – the number of resulting neurons), but other types of attacks also require research.

At the present stage, on the one hand, there are more and more works [1, 12-14, 17-18] that use a combined approach to solving the problem. For example, [14] proposes a new ensemble classifier that uses RBF and fuzzy clustering to increase detection accuracy, reduce false positives, and provide a higher detection rate for infrequent attacks. In [1] the approach with use of neural networks, immune systems, neurofuzzy classifiers and their combinations is considered. The essence of hybrid approaches is to implement various schemes of combining basic classifiers, which allow eliminating shortcomings in their operation separately. However, at the same time an important disadvantage of such techniques is the lack of universality of their application. In [12] to improve the efficiency of IDS it is proposed to use the method of coincidence, based on the fact that different types of NN (MLP, RBF, SOM) can detect different attacks, but erroneous triggers also do not always occur on the same network packets. Analysis using different types of NN. In addition, each type of neural network has its advantages, the disadvantages that need to be considered or additional research.

On the other hand, attempts are being made to use NN at different levels. For example, [5] considered a new approach to building a multilevel network intrusion detection system, which consists in the fact that groups of similar parameters between network interactions are fed to the inputs of individual first level modules, each of

which represents a hierarchical structure of several different NN type and performs detection of anomalies on a given group of parameters. The results of the first level modules are fed to the input of the second level solver, which makes the final decision on the presence of the attack and its classification. According to this approach, the probability of identifying known attacks was 91 %, detection of intrusions, information about which was not available during training, was 86 %. However, the developed prototype has a relatively significant probability of error of the second kind of 18 %, analysis and correction of the causes of these errors is promising for further study.

The purpose of this work is to develop a method for determining network attacks. To achieve this goal ***the following tasks*** were solved:

– to determine the optimal parameters of some types of neural networks, which will provide a sufficiently high level of reliability of detection of intrusions into the computer network;

– conduct research on different approaches (single-level and two-level) to detect network attacks;

– explore a combined version of network attack detection that combines the use of neural network technology with immunology.

8.1. Problem statement and database selection

Attacks are divided into four main categories [19]: DoS, U2R, R2L, Probe.

A Denial of Service (DoS) attack is an attempt to harm by making the target system, such as a website or application, inaccessible to ordinary end users. Typically, attackers generate a large number of packets or requests, which ultimately overload the target system. An attacker uses multiple hacked or controlled sources to carry out a «distributed denial of service» (DDoS) attack. There are six classes of DoS attacks: Back, Land, Neptune, Pod, Smurf, Teardrop.

U2R (User-to-Root) attacks involve obtaining the privileges of a local superuser (network administrator) by a registered user. There are four classes of U2R attacks: Buffer_overflow, Loadmodule, Perl, Rootkit. R2L (Remote-to-Local) attacks are characterized by an unregistered user gaining access to a computer from a remote computer. There are eight classes of R2L Attacks: Ftp_write, Guess_password, Imap, Multihop, Phf, Spy, Warezclient, Warezmaster. Probe attacks are about scanning network ports for confidential information. There are four classes of Probe attacks: IPsweep, Nmap, Portsweep, Satan.

Specific types of network attacks are presented in the KDDCup database [20], which contains about 5,000,000 connection records. A connection is a sequence of TCP packets over a limited period of time, the start and end points of which are clearly defined and during which data is transmitted from the sender's IP address to the receiver's IP address using a specific protocol.

As an architectural solution of the attack detection module, five neural networks of the multilayer perceptron type are proposed [25]: NN1 - to determine the category of network attack (DoS, R2L, U2R, Probe) or the fact that there was no attack; NN2… NN5 - to identify the network attack class, if any (each of these four neural

networks corresponds to the attack category and is able to identify classes that belong only to this category). In fig. 1 shows the structure of a hypothetical complex that uses such a solution.

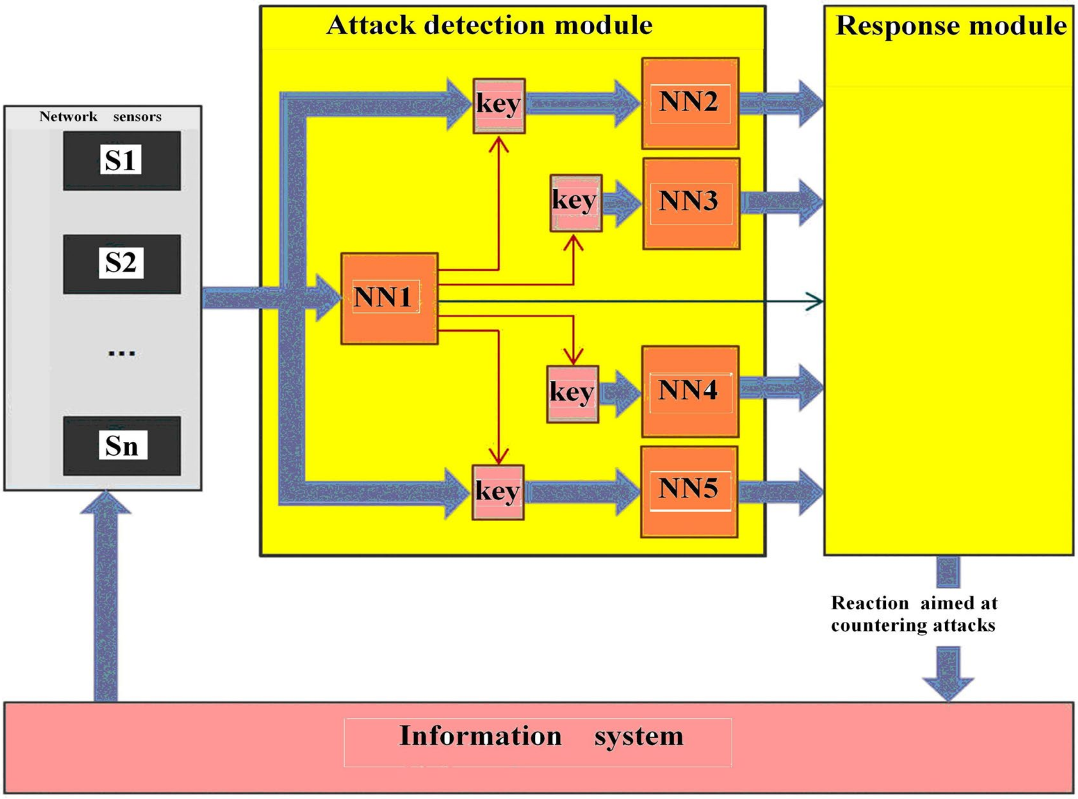


Figure 1 – Structure of hypothetical complex [25]

The complex includes a network attack detection module, which receives connection data from network sensors and outputs the result to the response module. The signal from NN1, which detects the category of network attack, through the key turns on one of the neural networks NN2… NN5, which will determine the class of network attack according to the category. The simulation results on other neural networks (attack detection accuracy) are summarized in table 1.

Table 1 – NN simulation results [25]

NN	NN1	NN2	NN3	NN4	NN5
Configuration	41–1–132–5	41–1–160–5	41–1–111–5	41–1–8–5	41–1–107–5
Accuracy, %	91.03	98.93	94.77	–	97.35

The table shows that the best result is achieved when determining the type of attacks of the DoS and Probe classes, slightly worse – for the R2L class. For the U2R class, it was not possible to configure the NN4 neural network to obtain acceptable results. This is due to the small number of records (52 in total) in the KDD Cup 99 database that belong to the U2R class.

8.2. Research of the type of neural network to determine attacks

8.2.1. Multilayer perceptron

The author's certificate [10] is received on a technique of detection of threats to a computer network by means of a multilayer neural network. As means of realization use of various neuropackages or drawing up of program model is possible [2-3, 8-11, 24-25]. So, for example in [3], on the created software model it is established that the best indicators of the quality of detection of network attacks of the DoS category in multilayer receptors with one hidden layer of neurons. In fig.2 shows that the best indicators have NN with the following activation functions: logistic function on the hidden layer; Softmax function on the resulting layer.

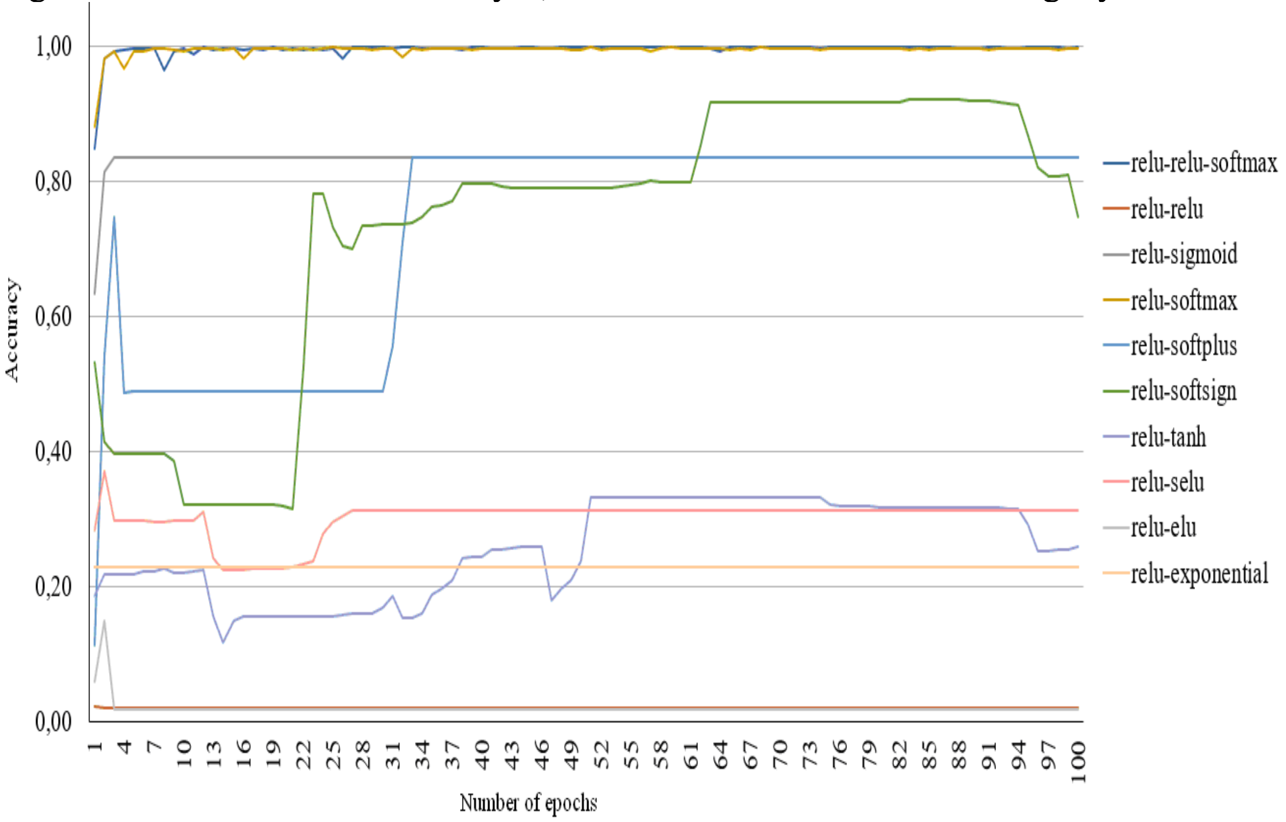


Figure 2 – Investigation of MLP-DOS accuracy from the number of learning epochs by different activation functions [3]

The study of the accuracy of MLP-DoS from the number of learning epochs for different numbers of hidden neurons is shown in fig. 3. The figure shows that the best quality indicators showed NN configuration 29-1-25-6. The obtained structure of MLP-DoS, where y0 corresponds to Back, y1 – Land, y2 – Neptune, y3 – Pod, y4 – Smurf, y5 – Teardrop.

In fig. 4 presents a study of MSLE from the number of learning epochs for the obtained structure of MLP-DoS. Based on low MSLE scores, it is concluded that the best optimization method for MLP-DOS is the adadelta method. To achieve a sufficient level of quality of the algorithm is enough 25 epochs of learning.

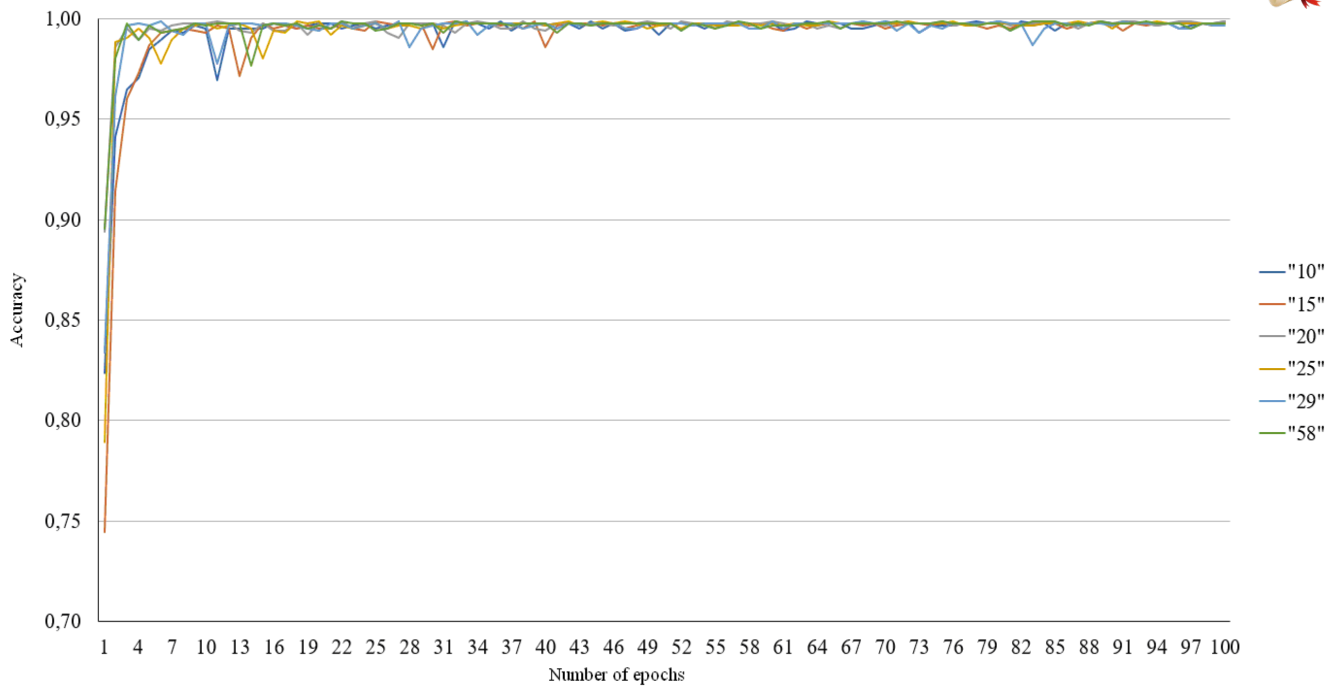


Figure 3 – Study of the accuracy of MLP-DoS from the number of learning epochs for different numbers of hidden neurons [3]

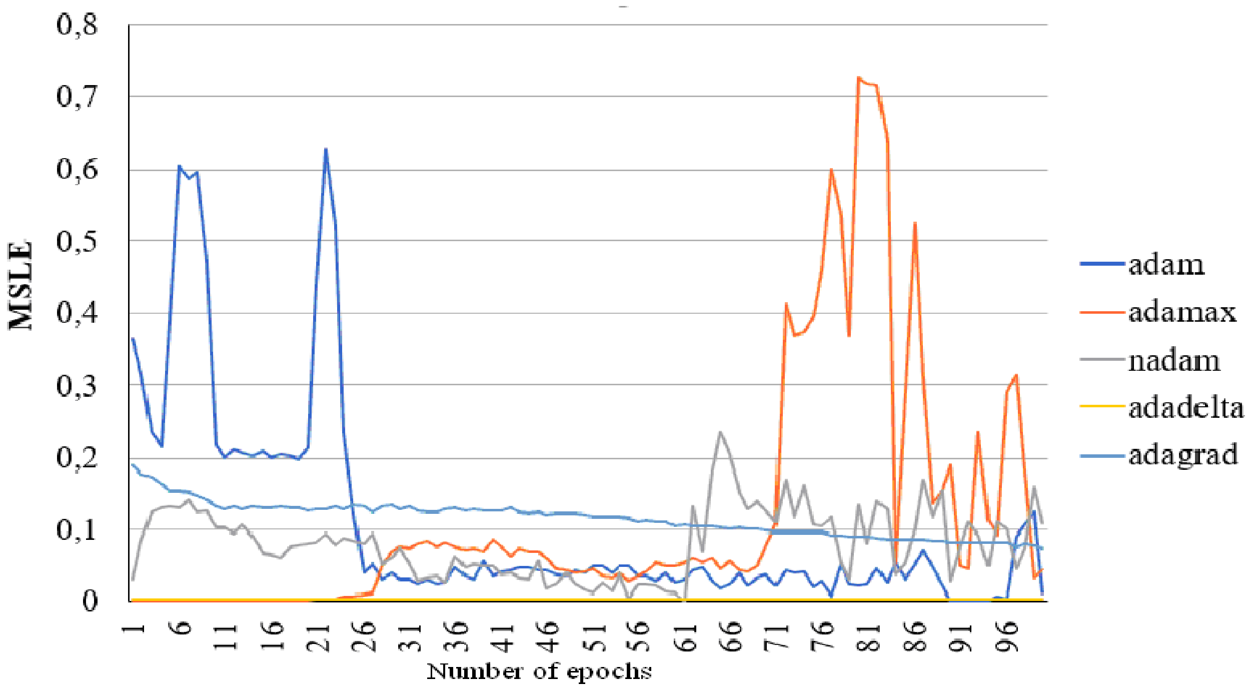


Figure 4 – MSLE study of the number of learning epochs by different methods of optimizing MLP-DoS learning [3]

8.2.2. Self-organizing map

The Kohonen network (self-organizing map) has only two layers: an input and an output composed of radial neurons of an ordered structure (the output layer is also called a topological map layer or «screen»). The neurons of the source layer are located in the nodes of a two-dimensional grid with rectangular or hexagonal cells. The number of neurons in the grid determines the degree of detail of the result of the algorithm, and, ultimately, the accuracy of the generalizing ability of the map

depends on it. Thus, having a map in front of us and knowing information about some of the objects under study, we can fairly reliably judge the objects with which we are little familiar. The SOM learning process includes the following stages: assigning weights as small random numbers; choice of learning speed parameter; determining the best matching unit; weight update.

In [2, 7] created software models «SOM» on C++ and Python respectively. For example, in [7] to determine the classes of network attacks of the Probe category, a Kohonen network was created, consisting of 15 input neurons (according to the selected parameters) and 900 results, which are presented in the form of a two-dimensional map with 30 columns and 30 rows. The software implementation is made in Python. MiniSom (implementation of a self-organizing map based on Numpy) was used as the main framework for SOM.

The Matplotlib library is selected for information display, which includes the Matplotlib.pyplot module, which contains functions for graphical information display. Numpy (open source library) is selected as auxiliary libraries, which includes multidimensional arrays with high-level functions for working on them. Metrics from Sklearn were used for data analysis. The Sklearn.metrics module includes evaluation functions and performance metrics. A sample of 400 records was used to teach SOM, a fragment of which is shown in fig. 5.

```
1,6,2,0,0,0,0,0,2,0.00,0.00,1.00,0.02,0.53,0.00,1
1,6,6,0,0,0,0,0,1,0.00,0.00,1.00,1.00,0.00,0.00,2
1,6,6,0,0,0,0,0,1,0.00,0.00,1.00,1.00,0.00,0.00,2
1,6,6,0,0,0,0,0,1,0.00,0.00,1.00,1.00,0.00,0.00,2
1,6,6,0,0,0,0,0,1,0.00,0.00,1.00,1.00,0.00,0.00,2
1,15,6,0,0,0,0,0,1,0.00,0.00,1.00,1.00,0.00,0.00,2
1,6,6,0,0,0,0,0,1,0.00,0.00,1.00,1.00,0.00,0.00,2
1,6,6,0,0,0,0,0,1,0.00,0.00,1.00,1.00,0.00,0.00,2
1,6,6,0,0,0,0,0,1,0.00,0.00,1.00,1.00,0.00,0.00,2
1,6,6,0,0,0,0,0,1,0.00,0.00,1.00,1.00,0.00,0.00,2
1,13,3,0,77,0,1,0,1,0.00,0.00,1.00,1.00,0.00,0.00,2
1,14,3,693375640,0,1,0,0,3,0.79,0.67,0.21,0.05,0.39,0.00,1
1,6,8,0,0,0,0,0,2,0.69,0.50,0.31,0.01,0.38,0.00,1
2,5,1,8,0,0,0,0,10,0.00,0.00,0.00,1.00,0.00,1.00,2
2,5,1,8,0,0,0,0,6,0.00,0.00,0.00,1.00,0.00,1.00,2
2,5,1,8,0,0,0,0,9,0.00,0.00,0.00,1.00,0.00,1.00,2
2,5,1,8,0,0,0,0,37,0.00,0.00,0.00,1.00,0.00,1.00,2
2,5,1,8,0,0,0,0,43,0.00,0.00,0.00,1.00,0.00,1.00,2
2,5,1,8,0,0,0,0,46,0.00,0.00,0.00,1.00,0.00,1.00,2
2,5,1,8,0,0,0,0,49,0.00,0.00,0.00,1.00,0.00,1.00,2
2,5,1,8,0,0,0,0,33,0.00,0.00,0.00,1.00,0.00,1.00,2
2,5,1,8,0,0,0,0,26,0.00,0.00,0.00,1.00,0.00,1.00,2
2,5,1,8,0,0,0,0,4,0.00,0.00,0.00,1.00,0.00,1.00,2
2,5,1,8,0,0,0,0,43,0.00,0.00,0.00,1.00,0.00,1.00,2
1,6,7,0,0,0,0,0,1,1.00,1.00,0.00,1.00,0.00,0.00,4
1,6,7,0,0,0,0,0,1,1.00,1.00,0.00,1.00,0.00,0.00,4
1,6,7,0,0,0,0,0,1,1.00,1.00,0.00,1.00,0.00,0.00,4
1,6,7,0,0,0,0,0,1,1.00,1.00,0.00,1.00,0.00,0.00,4
1,6,7,0,0,0,0,0,1,1.00,1.00,0.00,1.00,0.00,0.00,4
1,6,7,0,0,0,0,0,1,1.00,1.00,0.00,1.00,0.00,0.00,4
1,6,7,0,0,0,0,0,1,1.00,1.00,0.00,1.00,0.00,0.00,4
1,6,7,0,0,0,0,0,1,1.00,1.00,0.00,1.00,0.00,0.00,4
1,6,7,0,0,0,0,0,1,1.00,1.00,0.00,1.00,0.00,0.00,4
```

Figure 5 – Fragment of the training sample

For testing, the sample consisted of 205 records, the control sample - of 60 records. The KDDCup database was used as the data source. As a result of the neural network, a map was obtained (fig. 6), each figure of which reflects a certain type of attack: Portsweep (red); IPsweep (green); Satan (blue); Nmap (yellow).

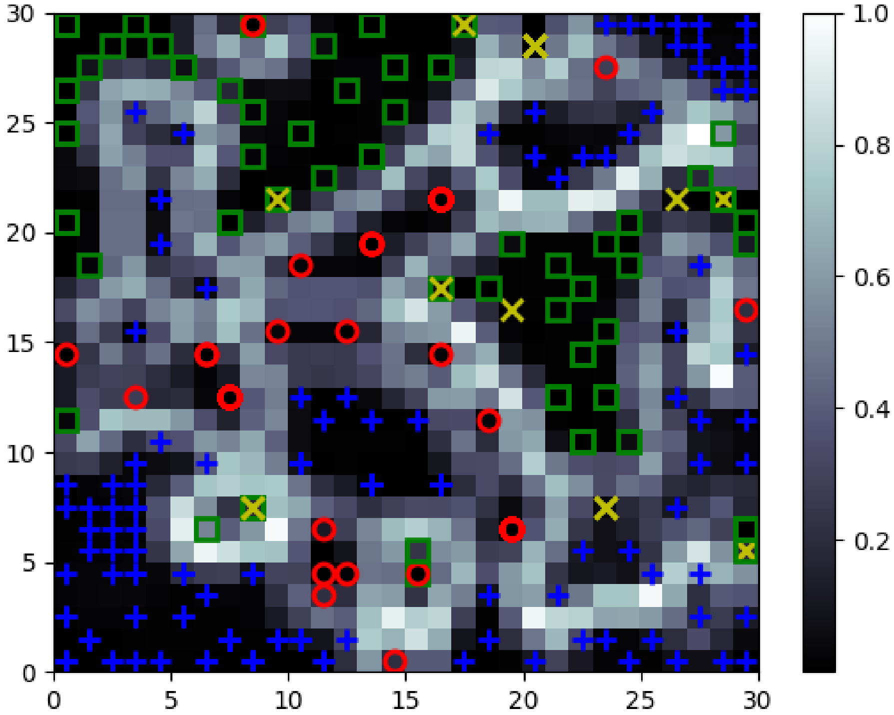


Figure 6 – Distribution of attacks on the map

In fig. 7 presents the results obtained on the software model.

```
              precision    recall  f1-score   support

           1       1.00      0.97      0.99       103
           2       0.93      0.99      0.96       126
           3       1.00      1.00      1.00       158
           4       0.94      0.74      0.83        23

    accuracy                           0.98       410
   macro avg       0.97      0.93      0.94       410
weighted avg       0.98      0.98      0.97       410

PS E:\VSCPP\Project1>
```

Figure 7 – The results obtained on the program

The number of epochs is 250 thousand. The average error was 0.05 and suggests that the neural network well determines the classes of network attacks. The neural network showed the lowest accuracy in determining the attack class Nmap. That is, NN detects network attacks of the Portsweep, IPsweep, and Satan classes well, but errors can occur when defining the Nmap class. To solve this problem, it is recommended to increase the concentration of Nmap class network attacks in the training sample. The results of the research were presented at conferences [7].

8.2.3. Neural fuzzy network

With the help of MatLAB Fuzzy Logic Toolbox ANFIS, a fuzzy network of configuration 4-5-8-16-1 was created (fig. 8) [4], where 4 is the number of neurons in the input layer, which corresponds to the categories of DoS, U2R, R2L and Probe

attacks; 5 – the total number of layers of the fuzzy network (input, inputmf, rule, outputmf, output); 8 – the number of neurons in the first hidden layer (inputmf), which depends on the number of input variables and the number of terms (was the attacks or not); 16 – the number of neurons in the second hidden layer by the number of rules (rule); 1 – the number of neurons in the resulting layer (output).

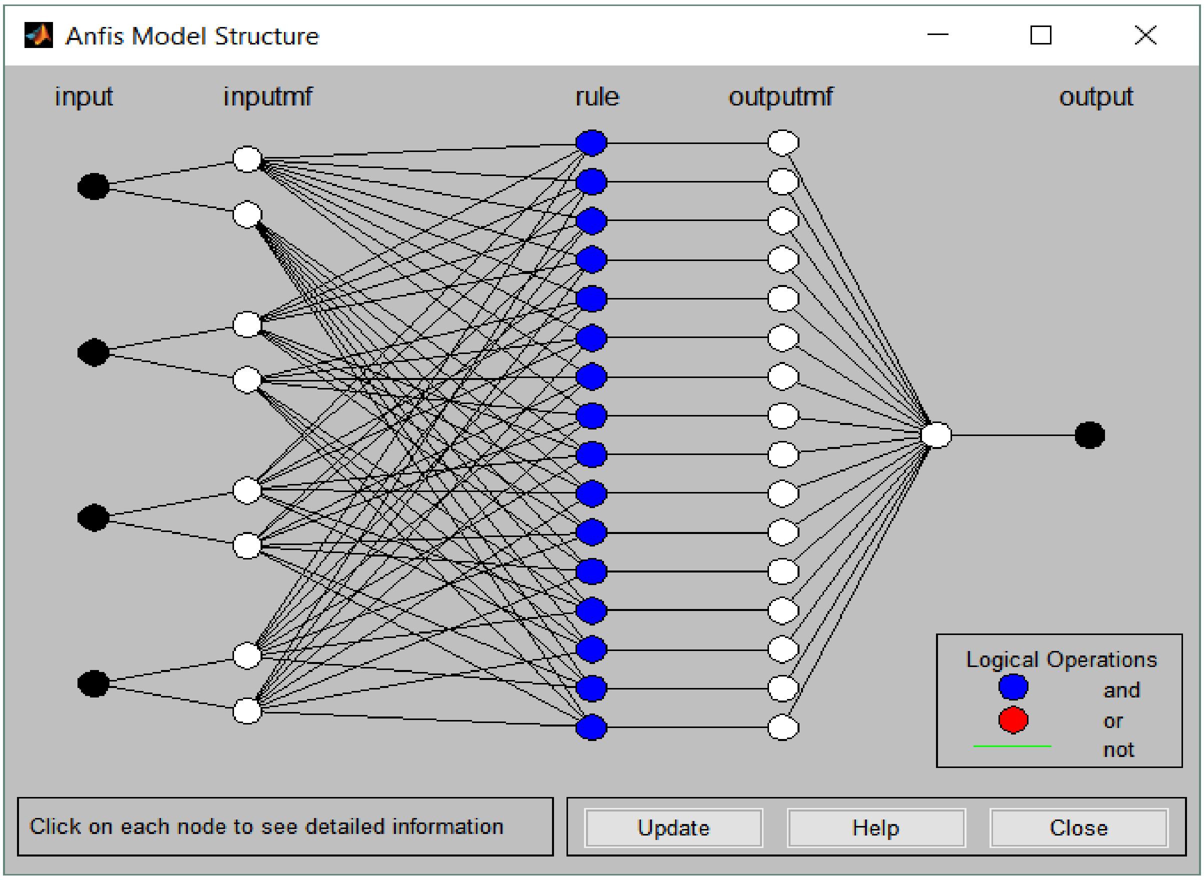


Figure 8 – Structure of the ANFIS system

The input layer contains neurons that represent the membership functions of the input fuzzy variables and perform the operation of falsification (fuzzy) of the input data. The inputmf layer consists $2 \cdot 4 = 8$ values for the rules that make up the knowledge base created as a result of model learning, these neurons can contain any implementation of the operation of the t-norm, which is a fuzzy analogue of the operation «AND» (logical operation «AND»). The third layer is the TSK generator (this is a parametric layer). The neurons of the rule layer contain the results of rule calculations taking into account the weight of each rule: $2^4 = 16$. The neurons of the outputmf layer contain the final results of rule calculations, which are grouped into fuzzy classes. The output layer is normalizing (nonparametric) and contains only one neuron, which calculates the final output of the model by performing a dephasification operation (definition) by determining the centers of fuzzy classes. At the preparatory stage, samples were prepared using the Excel package. On the created neural network the research of value of an error of training on various functions of belonging at various algorithms is carried out.

8.2.4. Hybrid attack detection: combining different classifiers

The resulting vector is found as the sum of the output vectors of the three NN: MLP, SOM and ANFIS. If the coordinate in the resulting vector is zero or one, then there are no attacks. The unit means that a false positive occurred on one of the NN. If the coordinate value of the vector is 2 or 3, then an attack of the corresponding type has occurred. The implementation of such a hybrid option for the definition of attacks: the combination of basic classifiers will eliminate the shortcomings in their operation separately.

3. Research of one-level and two-level approaches to detecting network attacks

8.3.1. Determination of neural configurations

In [22] provides an overview of existing datasets, the most common of which is the NSL-KDD database, initiated by the US Department of Defense's Advanced Research Projects Authority (DARPA) based on the KDD'99 database [21]. The data set consists of the following sets [15]: KDDTest+, KDDTrain+, KDDTrain+20% (table 2). The benchmark contains 43 parameters for each record, 41 of which relate to the traffic itself, and the last two: Label and Score. Although all attacks exist in the database, but their distribution is highly distorted, as shown in table. 1. More than half of the records that exist in each data set reflect the normal state, and the standards for the classes U2R and R2L are extremely small. This is an accurate idea of the distribution of modern attacks on Internet traffic, where the most common attacks are DoS, and attacks of U2R and R2L are almost non-existent.

Table 2 – Distribution of attacks in the NSL-KDD database

Dataset	Total	Normal	DoS	Probe	U2R	R2L
KDDTrain+20%	25192	13449 (53 %)	9234 (37 %)	2289 (9,16 %)	11 (0,04 %)	209 (0,8 %)
KDDTrain+	125973	67343 (53 %)	45927 (37 %)	11656 (9,11 %)	52 (0,04 %)	995 (0,85 %)
KDDTest+	22544	9711 (43 %)	7458 (33 %)	2421 (11 %)	200 (0,9 %)	2654 (12,1 %)

Multilayer NN as a mathematical apparatus. The number of neurons in the latent layer of Multilayer NN can be determined by a known formula, which is a consequence of the Kolmogorov-Arnold-Hecht-Nielsen theorem:

$$\frac{N_y Q}{1+\log_2(Q)} \le N_w \le N_y\left(\frac{Q}{N_x}+1\right)(N_x+N_y+1)+N_y,$$

where N_y is the length of the output signal; Q is the number of elements of the set of educational examples; N_w – the required number of synaptic connections; N_x – the dimension of the input signal.

After estimating the required number of synaptic connections, you can calculate the required number of neurons in the hidden layer (N):

$$N = \frac{N_w}{N_x + N_y}.$$

As an example in fig. 9 shows the configuration of NN2 at the maximum number of hidden neurons: 41-1-8-4, where 41 is the number of initial neurons; 1 – the number of hidden layers; 8 – the number of hidden neurons; 4 – the number of resulting neurons ($Y_1 = 1$, then the category DoS; $Y_2 = 1$, then the category Probe; $Y_3 = 1$, then the category U2R; $Y_4 = 1$, then the category R2L; otherwise, where i=1,…, 4).

For all NN, the calculation of the minimum ($N_{\min}$), average (N_{avg}) and maximum ($N_{\max}$) number of hidden neurons was performed (table 3).

Table 3 – NN parameters according to the Levenberg-Marquardt algorithm [9]

NN	Appointment NN	Number hidden neurons			Optimal NN configuration	Number training standards	MSE
		$N_{\min}$	N_{avg}	$N_{\max}$			
NN1	Attack detection	33	313	593	41-1-33-23	7000	2,71
NN2	Detect the attack category	8	56	104	41-1-8-4	500	3,79
NN2-1	Detect the attack class of the DoS category	16	138	259	41-1-16-9	500	3,74
NN2-2	Detect the attack class of the Probe category	12	84	156	41-1-12-6	400	4,79
NN2-3	Detect the U2R category attack class	4	28	52	41-1-4-2	300	1,47
NN2-4	Detection of an attack class of category R2L	10	70	130	41-1-10-5	400	1,98

The results of the study of one-level and two-level approaches to identifying network attacks are presented in [9]. The author’s certificate was obtained for the methodology of the corresponding research [11].

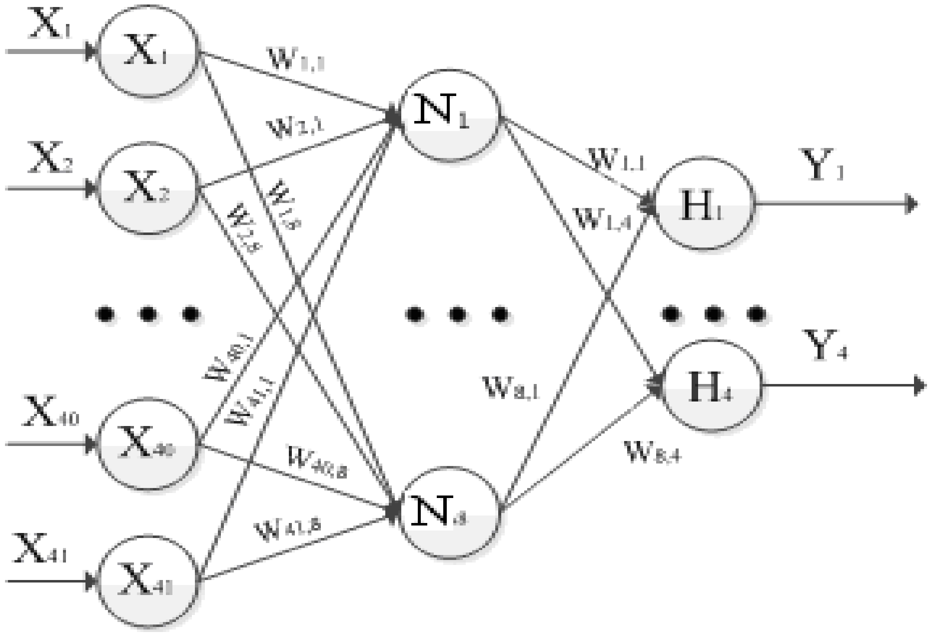


Figure 9 – NN2 configuration 41-1-8-4 [9]

8.3.2. Investigation of neural network error and learning time

On the created NN with the of the Neural Network Toolbox package of the MatLAB program the research of value of MSE from length of educational sample on training algorithms is carried out: Levenberg-Marquardt; Bayesian Regularization; Scaled Conjugate Gradient with different number of hidden neurons ($N_{\min}$, N_{avg}, $N_{\max}$).

The Levenberg-Marquardt algorithm always gives the smallest value of an error of train the received relts are added to table 2. The table shows that in all cases it is sufficient to use a minimum number of hidden neurons. For example, for NN2, the lowest value of MSE is achieved in a sample of 500 training standards.

Configuration 41-1-33-23 with a sample length of 7000 examples (first approach) was taken as NN1. To implement the second approach, the following configurations were selected: 41-1-8-4 (NN2, 500 references); 41-1-16-9 (NN2-1, 500 references); 41-1-12-6 (NN2-2, 400 references); 41-1-4-2 (NN2-3, 300 references); 41-1-10-5 (NN2-4, 400 references). Three parallel series of four possible combinations of threat detection based on the NN ensemble are considered. The average detection of network threats on NN1 (according to the first approach) is 2.21 s, according to the second approach – 0.92 s. That is, using an ensemble of five NN is about 2.4 times faster.

8.3.3. Investigation of errors of the first and second kind

The first kind of error is the number of incorrectly detected attacks (FP, False Positive). The error of the first kind on NN1 is 7.39 %, and when using an ensemble of neural networks: NN2; NN2-1; NN2-2; NN2-3; NN2-4 (second approach) – 2.17 %. The second type of error is the number of omissions of attacks (FN, False Negative). The error of the second kind on NN1 is 6.96 %, and when using the

ensemble NN (second approach) – 3.91 %. During the experiments, the following results were obtained on NN (fig. 10): TP (True Positive); FP (False Positive); FN (False Negative); TN (True Negative), on the basis of which at the final stage it remains to assess the quality of solution for different approaches (table 4), using the following quality indicators.

TP 1950	**FP** 170
FN 160	**TN** 20

1st approach

TP 2150	**FP** 50
FN 90	**TN** 10

2nd approach

Figure 10 – The results of the study [9]

1) TPR – the rate of correct detection of network attacks is determined by the known formula:

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN},$$

where TP is the number of correctly recognized anomalous connections;

FN – the number of errors of the second kind (the number of skips of attacks).

2) FPR – the rate of false positives is defined as:

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN},$$

where FP – the number of errors of the first kind (the number of incorrectly detected attacks);

TN is the number of correctly recognized normal connections.

3) CCR – the correctness of the classification of connections is determined by the following formula:

$$CCR = \frac{CC}{TP + TN + FN + FP},$$

where CC is the total number of elements whose class has been correctly defined on a combined data set composed of normal and anomalous connections.

4) ICR – the indicator of incorrect classification is defined as:

$$ICR = \frac{IC}{TP + TN + FN + FP},$$

where IC is the number of cases of incorrect classification.

5) GPR – an indicator of generalizing ability when detecting:

$$GPR = \frac{\overline{TP^*}}{\overline{TP^*} + \overline{FN^*}},$$

where $\overline{TP^*}$, $\overline{FN^*}$ – represent respectively the number of correctly recognized anomalous connections and the number of errors of the second kind, which are calculated on the unique data of the control set, strictly excluding any data of the training set.

 ISBN 978-3-949059-44-5

6) OPR – retraining rate when detecting:

$$OPR = \overline{TPR} - GPR,$$

where $\overline{TPR}$ is the indicator of the correctness of detection on the unique data of the training set.

7) GCR – an indicator of the generalizing ability in the classification:

$$GCR = \frac{\overline{CC^*}}{\overline{TP^*} + \overline{FN^*} + \overline{FP^*} + \overline{TN^*}},$$

where $\overline{CC^*}$, $\overline{FP^*}$, $\overline{TN^*}$ – represent, respectively, the number of correctly classified connections, the number of errors of the first kind and the number of correctly recognized normal connections, which are calculated on the unique data of the control set, strictly excluding any data of the training set.

8) OSR – retraining rate in the classification:

$$OCR = \overline{CCR} - GCR,$$

where $\overline{CCR}$ – an indicator of the correctness of the classification on the unique data of the training set.

Table 4 – Indicators for assessing the quality of solutions for different approaches [9]

Indicator	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	Accuracy	Precision	Recall
1st approach	1950	170	160	20	0,92	0,89	0,86	0,92	0,92
2nd approach	2150	50	90	10	0,96	0,83	0,94	0,98	0,96

The table shows that the best results are achieved based on the use of the NM ensemble (second approach): TPR (indicator of the correctness of the definition of network attacks) is 0.96 (in comparison with 0.92); FPR (false positive rate) – 0.83 (in comparison with 0.89); accuracy – 0.94 (in comparison with 0.86), accuracy (Precision) – 0.98 (in comparison with 0.92) and completeness (Recall) – 0.96 (in comparison with 0.92) compared to the first approach on based on NN1.

8.4. Combined option for detecting attacks: a combination of neural network technology with immunology

8.4.1. Initial data for SOM

According to the source [6], 29 parameters characterizing network connections are enough to detect and classify 9 out of 22 types of attacks. Table 5 shows the relationship between the parameters in the implementation and the attributes of KDDCup [20].

The mechanism of clonally selection simulates the behavior of B-cells in the process of immune response to an antigenic stimulus. This interaction is accompanied by the production of B-cell clones, which can undergo mutations of varying degrees depending on the strength of their binding (affinity) to any epitope of the antigen. Like the negative selection algorithm, the clonally selection algorithm belongs to a family of population algorithms in which individuals who describe the current

solution of the problem are improved and replaced, and fight with each other for the right to be selected as the best candidates [1].

Table 5 – The ratio of parameters and attributes of KDDCup

Parameter	Attribute	Parameter	Attribute
x0	Duraction	x15	Srv rerror rate
x1	Protocol type	x16	Same srv rate
x2	Service	x17	Diff srv rate
x3	Flag	x18	Srv diff host rate
x4	Source bytes	x19	Dst host count
x5	Destination bytes	x20	Dst host srv count
x6	Land	x21	Dst host same srv rate
x7	Wrong fragment	x22	Dst host diff srv rate
x8	Urgent	x23	Dst same src port rate
x9	Hot	x24	Dst host srv diff host rate
x10	Count	x25	Dst host rerror rate
x11	Srv count	x26	Dst host srvb serror rate
x12	Serror rate	x27	Dst host rerror rate
x13	Srv serror rate	x28	Dst host srv rerror rate
x14	Rerror rate		

The first implementation of the clonally selection algorithm is CLONALG [16], which consists of initialization and population cycle: affinity; selection; cloning; mutation; choosing the best clone.

8.4.2. Sampling based on the clonally selection algorithm

The following approach is used to solve the problem of classifying network attacks: generation based on existing data with the addition of new data using a clonally selection algorithm.

The model of the clonally selection algorithm can be represented as follows [16]: CLONALG = $(Pr^0, f, L, N, n, \beta, d, \varepsilon)$,
where Pr^0 – initial antibody population;
f is the objective function;
L is the length of the antibody receptor;
N is the number of antibodies in the population;
n is the number of antibodies selected for cloning (with the highest affinity);
β – reproductive factor that regulates the number of clones of selected antibodies;
d is the number of antibodies to be replaced by new ones (with the lowest affinity);
ε – algorithm stop criterion.

Step 1. Initialization. Generation of the initial population of Pr^0 antibodies.

Step 2. Determination of affinity. For each $Pr_j \in Pr^t$ antibody, calculate the value of the objective function $y_i=f(Pr_j)$ and determine the affinity $g_j=affinity(y_j)$, $j \in \{1..N\}$, t – the generation number.

Step 3. Selection. Select a subset of antibodies with the highest affinity $Pr_{\{n\}}$.

Step 4. Cloning. Obtain a population of $C_{\{Nc\}}$ clones from $Pr_{\{n\}}$.

Step 5. Hypermutation. Obtain a population of altered clones $C^*_{\{Nc\}}$ with $C_{\{Nc\}}$.

Step 6. Determining the affinity of the population of altered clones. For each antibody $C^*_j \in C^*_{\{Nc\}}$, calculate the value of the objective function $y_j = f(C^*_j)$ and determine the affinity $g_j = affinity(y_j)$, $j \in \{1..N_C\}$.

Step 7. Selection. Select a subset $C^*_{\{n\}}$ of n antibodies with the highest affinity from the population of altered clones $C^*_{\{Nc\}}$.

Step 8. Replacement. Replace the subset $Pr_{\{n\}}$ with $C^*_{\{n\}}$.

Step 9. Clonally removal. Replace the subset of $Pr_{\{d\}}$ antibodies with the lowest affinity with new individuals.

Step 10. Check the stop condition of the algorithm. According to the selected criterion ε, check the fulfillment of the stop condition of the algorithm.

8.4.3. Research results

We compare the obtained values for the initial sample of 369 vectors and obtained by clonally selection of the sample of 937 vectors. TPR, FPR, CCR and ICR were calculated for the initial and obtained samples. By increasing the sample with clonally selection, we thus improve the algorithm of intrusion recognition. In addition, it significantly improves the recognition of little-known attacks, the sample of which is very few elements. False Positive (FP) is the number of incorrectly detected attacks when the normal state was taken as an attack. False Negative (FN) is the number of skips of attacks when the attack was mistaken for a normal network state. The percentage values of errors of the first and second kind at different stages are summarized in table 6.

Table 6 – The obtained values of the errors of the first and second kind

Number test data	Error first kind, %	Error second kind, %
362	0	12,98
1009	2,58	4,36
1986	1,964	5,04
4698	3,13	5,58
9931	1,96	5,49

The table shows that when the sample was increased (from 1009 to 9931 examples) approximately 9 times the errors of the first (number of incorrectly detected attacks) and the second kind decreased approximately 1.3 and 0.8 times, respectively. The results of the research were presented at conferences [2].

Conclusions

In according with the first task, a study of the type of NN to detect networks attacks. It is determined that MPL, SOM and ANFIS are suitable for finding solution (setting the network attack categories) based on the use of open databases KDDCup or NSL-KDD, but not enough to determine U2R. In addition, a hybrid option for defining attacks has been proposed: combining different classifiers (MLP, SOM and ANFIS), which will eliminate the shortcomings in their functioning separately.

In according with the second task, the detection of attacks was carried out using two approaches: a one-tier approach based on NN1 and a two-tier approach based on a complex of five NN (NN2; NN2-1; NN2-2; NN2-3; NN2-4) to determine DoS, Probe, U2R or R2L attack categories (at the first level) and determining the attack class according to the category (at the second level). Normalized data from the open NSL-KDD database were used for all NN. The best results are achieved on the basis of the use of the NN complex (the second approach): the indicator of the correctness of the definition of network attacks is 0.96 (in comparison with 0.92); the rate of false positives – 0.83 (in comparison with 0.89); reliability – 0.94 (in comparison with 0.86), accuracy – 0.98 (in comparison with 0.92) and completeness – 0.96 (in comparison with 0.92) compared to the first approach based on NN1.

3***. In accordance with the third task***, studies of the combined option for the definition of network attacks, which combines the use of neural network technology with immunology. For example, when detecting a network attack category when increasing the sample (from 1009 to 9931 examples) for SOM by the clonally selection algorithm, the errors of the first kind (number of incorrectly detected attacks) and the second kind (number of skips of attacks) decreased approximately in 1.3 and 0.8 times, respectively. It should be noted that the error of the second kind when increasing the training data (according to the algorithm of clonally selection) was not more than 5 % in comparison with 10 % (without the use of clonally selection), which is better twice.

KAPITEL 9 / *CHAPTER 9*
SWITCHED RELUCTANCE MOTORS. DESIGN, SIMULATION, CONTROL
ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНІ ДВИГУНИ. ПРОЕКТУВАННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ, КЕРУВАННЯ. ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ. ПРОЕКТИРОВАНИЕ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, УПРАВЛЕНИЕ

DOI: 10.30890/2709-2313.2021-07-08-017

Introduction

Today, electric motors are considered as an integral part of household electrical appliances and power tools, electric vehicles of different capacity for various purposes, and the vast majority of industrial equipment, units and robots. Such a wide application causes the availability of a large variety of electric motor types, respectively focused on different tasks. Modern electric motors are distinguished by the type of power supply (DC and AC), design features, operation modes, control methods, etc.

Given the trends of the recent years, we can state that electric vehicles will become soon one of the largest areas of applying electric motors [1]. The gradual transition to electric traction has already been going on for the last few decades. However, the course in support of green technologies, which has taken by most of the developed world, promises a sharp reduction in producing internal combustion engine vehicles in the near future, and subsequent complete refusal of them in favor of electric vehicles.

The electric transport industry includes several different directions:

- powerful electric trains;
- urban public vehicles – buses, trolleybuses, trams;
- electric cars;
- low-power vehicles – electric scooters, electric bicycles, segways, unicycles, electric wheelchairs, etc.;
- light aircrafts – electric planes, quadcopters.

Depending on the desired parameters of electric vehicles, such as carrying capacity, maneuverability, traction and performance characteristics, the most appropriate types of electric motors that are able to provide these characteristics should be chosen.

Thus, until recently, brushed DC motors, connected directly to the DC power supply of 550-600 V, were mainly used as traction motors for urban public transport (trolleybuses, trams) with a capacity of hundreds of kilowatts [2]. Such motor type is featured by high starting torque, simple control and reversing, nearly linear control characteristics, high efficiency, and the ability to adjust the rotational speed in wide range. However, due to enhancement of power electronics and microprocessor technology in recent decades, brushed DC motors are being actively replaced by asynchronous AC motors [2]. Although the last ones require a more complex control system with DC to AC converting unit, they are cheaper and structurally simpler, have a simple start-up and high dynamic characteristics. In addition, they need less maintenance and have much higher reliability due to elimination of brush-collector

units.

Asynchronous electric motors are also used for traction in some models of electric cars with a capacity of tens of kilowatts [3]. However, such motors are not optimal in this application, because significant energy losses in the rotor bars and thus not high enough efficiency are inherent for them. This is crucial for electric cars supplied from autonomous battery, unlike trolleybuses and trams. Through this, most modern electric cars are equipped with brushless synchronous DC motors with permanent magnets, which are characterized by smooth speed control, low weight and dimensions [4]. Still, for all their advantages, permanent magnet motors have a quite complex multipole design and low specific torque, which determines the ordinary dynamic performance of the cars. Besides, permanent magnet motors have high cost given by use of rare earth metals (neodymium-based alloys) as magnets [4]. To improve the dynamic performance, electric cars with permanent magnet motors may be additionally equipped with asynchronous motors.

DC motors on permanent magnets are also mainly used in low-power electric bicycles, scooters, unicycles, etc. [4]. The most critical parameters of such vehicles are mass and dimensions, and the motor efficiency as well, while their speed is mostly limited to 25 - 50 km/h.

It is also known about the use of synchronous motors on electromagnets in electric cars [5]. Such motors, unlike asynchronous ones, are not able to self-starting, so to ensure high starting characteristics they are equipped with additional structural elements that provide fast asynchronous starting. However, synchronous motors on electromagnets have a lower cost compared to motors on rare earth permanent magnets, also they have higher power and speed stability, as well as the best ability to recuperating energy during braking, thus saving battery power.

Recently, a switched reluctance motor (SRM) is considered as promising motor type for use in electric vehicles. SRMs have simple and technological design, high reliability and maintainability, a wide range of speed control and high efficiency. Besides, these motors are produced using electrical steel or ferromagnetic materials, so they are much cheaper than the ones on permanent magnets [2, 6]. Due to their advantages, SRMs are regarded as an alternative to permanent magnet motors. However, their widespread use in electrical vehicles is restrained by such their drawbacks as low specific torque and its significant ripple. The last ones can be eliminated by forming a special current shape in the stator windings and by improving the motor topology through optimizing the shape and number of the stator and rotor poles.

It should be noted that the continuous progress in power and information electronics, improvement and invention of new structural and electrical materials lead to creation of novel approaches to designing the electric drive systems for vehicles. Thus, recently there has been a trend towards using combined solutions in this area. It is known, for instance, about successful combination of construction principles of an internal permanent magnet motor and a synchronous reluctance motor, which gives significant advantages in most basic parameters [7]. In addition, the change of the element base characteristics and the steady development of technologies and design ideas lead to the fact that the known earlier but limited in use solutions are becoming

in demand. In particular, this concerns to the switched reluctance motor type. The interest in SRMs has increased recently in the context of a significant increase in the cost of neodymium permanent magnets, which are widely applied today in electric motors of vehicles [6].

This chapter is devoted to switched reluctance motors. In view of the foregoing, it is obvious that the improvement of SRM characteristics is an urgent task for the development of the electric transport industry. The following subsections of the chapter will consider the principles of construction and operation of classical SRMs, the ways to improve their design, to maximize the torque and to minimize its ripples, as well as to increase the energy efficiency.

To carry out the research presented in this chapter, modern software for mathematical simulation was used.

9.1. Typical operation and design principles of switched reluctance motors

The switched reluctance motor is classified as a brushless DC electric motor also known as an electronically commutated motor or synchronous DC motor. This motor type runs by reluctance torque. Currently, many different topologies of switched reluctance motors are known [6, 8]. Fig. 1 gives two common SRM designs: with an inner rotor (a) and with an outer rotor (b).

The design of SRM shown in Fig. 1 (a) can be called a classic one. It is very simple: the toothed cylindrical rotor is located inside the toothed stator with concentrated phase windings installed on teeth-poles [6]. The opposite windings of the same phase can be electrically connected in series or in parallel, and they can have cumulative or differential magnetic coupling. Rotor and stator are made up from magnetically soft materials (electrical steel or ferromagnets) with high magnetic permeability and low hysteresis losses. In order to reduce eddy current losses, both the rotor and the stator are produced not solid, but laminated.

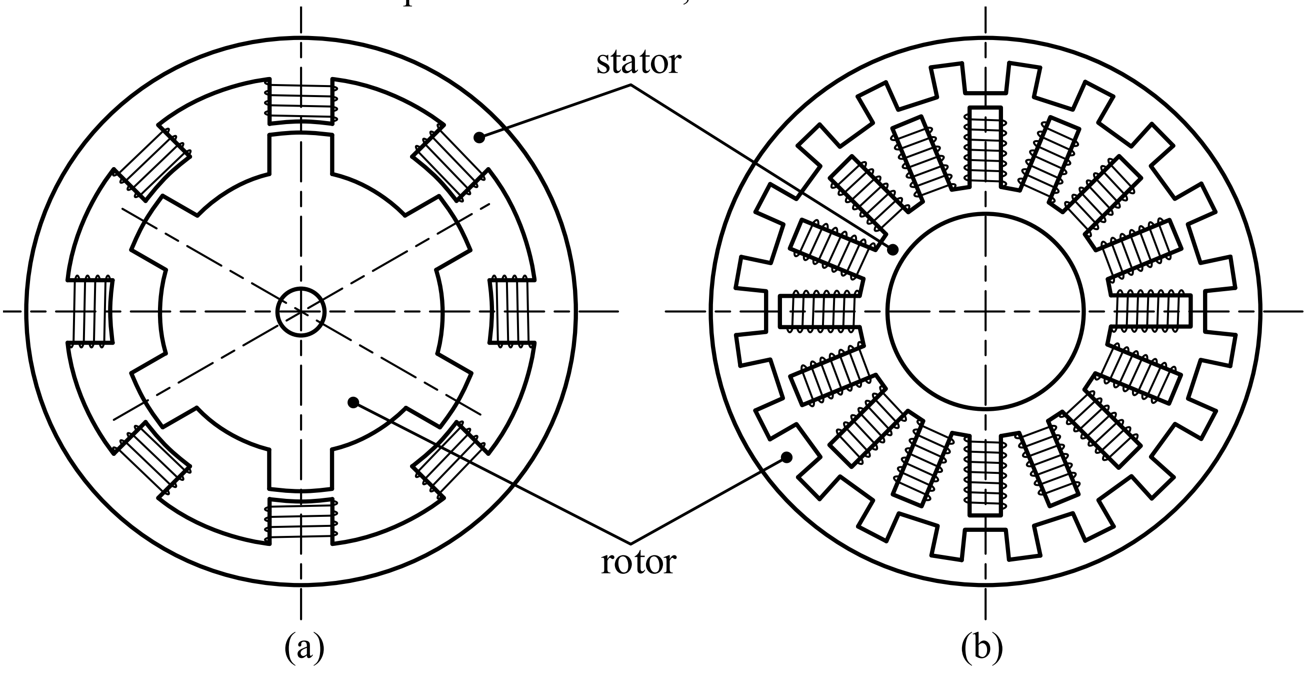


Figure 1 – Switched reluctance motor designs

The operation principle of switched reluctance motor is as follows. Unipolar current pulses energize the stator pole windings in the phase sequence order, which creates a magnetic flux closing through the rotor between two windings of the active phase. The number of the rotor poles m is not equal to the number of the stator poles k, usually $k > m$. The most commonly used ratios m / k are: 4/6, 6/8, 8/12 [6, 9]. The poles are placed in a way that there is always a shift between the poles of the rotor and the stator. So that, when the current pulses are applied to the windings of the active phase, the rotor begins turning, trying to reach a position providing a low reluctance path for the magnetic flux. The torque that develops under such conditions is called reactive.

Fig. 2 shows as an example the formation of magnetic flux and resulting rotation of the rotor for three-phase SRM topology with the ratio $m / k = 4/6$ [9].

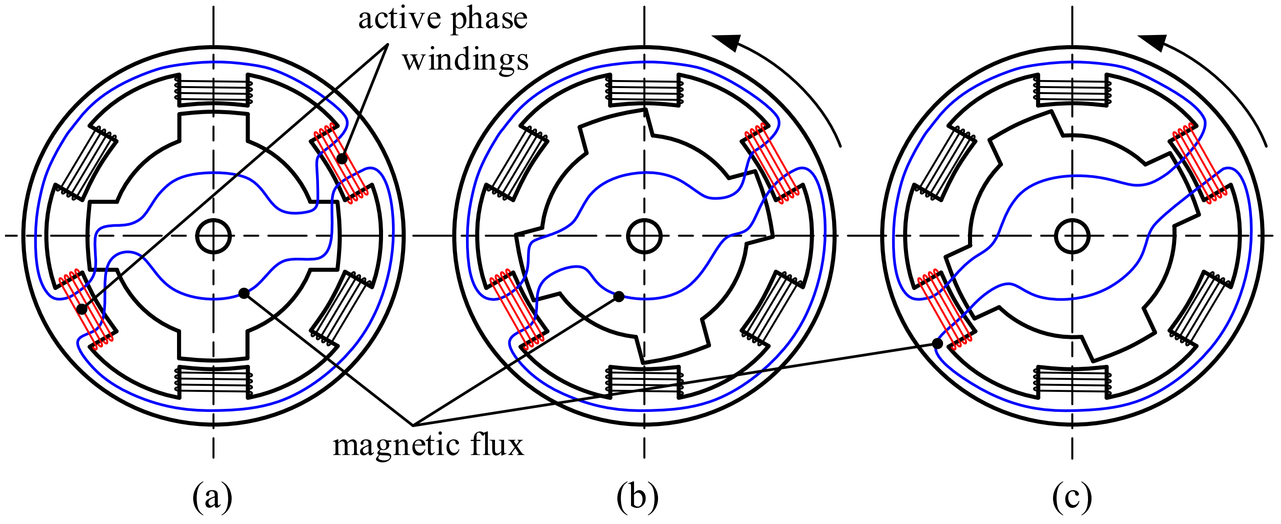


Figure 2 - Rotation of SRM rotor

As can be seen from Fig. 2, in the order from (a) to (c), after applying control pulses to windings of one of the three phases, the rotor starts rotating, which leads to shortening the magnetic field lines. When the active poles of the stator and the rotor reach complete axial alignment, the reluctance to magnetic flux becomes minimal, but the torque at this point is equal to zero, so the control pulses energize the next phase windings to continue the rotation, and then the process is repeated.

The rotor speed is regulated by the frequency of current pulses on the stator pole windings. A frequency inverter is used for this purpose. The order of pulses on the phase windings is determined considering the actual position of the rotor, which is monitored using a special sensor – encoder.

Fig. 3 gives two common ways of forming control pulse sequences for phases 1, 2 and 3 of three-phase SRM (Fig. 2).

The case in Fig. 3 (a) is the simplest: the control pulse for every next phase starts immediately after finishing the control pulse for the previous one, and the duty cycle is equal to 1/3. In the other case (Fig. 3 (b)), two of the three phases operate simultaneously during certain time intervals, and the duty cycle is equal to 1/2. This makes it possible to increase the total number of the rotor positions by the number of

intermediate ones due to the joint operation of the two phases during some intervals, thereby reducing torque ripples and resulting in smoother rotor movement. Both cases shown in Fig. 3 are reversible, i.e. the reverse order of control pulses for the phases causes the rotor rotation in the other direction.

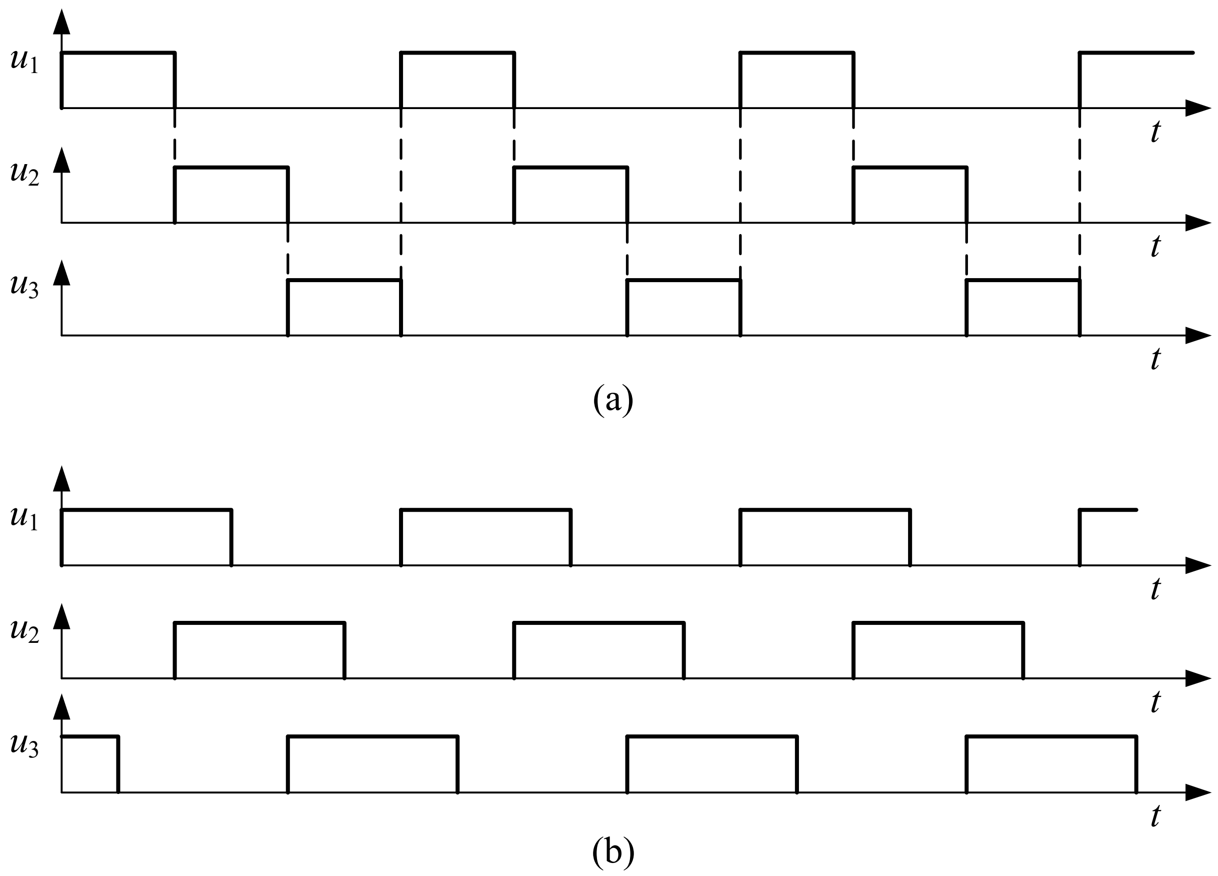


Figure 3 - The ways of forming control pulse sequences for three-phase SRM

In general, the torque ripple magnitude in switched reluctance motors of classical topology depends on the pole number and control algorithm: the larger pole number and the more "intelligent" control algorithm, the higher rotation smoothness can be achieved. However, it is obvious that the reduction of torque ripples in this way is accompanied by a significant complication of the motor topology and its control system. Another disadvantage of the classical topology of SRMs is a solid rotor design, which involves significant material costs and low torque.

It is possible to get rid of SRM classical topology drawbacks in the following ways: choice of the optimal shape of the poles and their ratio, improve of the rotor design, development of an effective control algorithm, and use of a special form of the stator winding current.

In the next subsections, SRM motor with an improved topology will be represented, its operation features will be investigated and the efficiency of the proposed solutions will be evaluated.

9.2. Operation features and pole ratios of U-shaped pole switched reluctance motors

In [10], a new topology of the SRM is proposed (Fig. 4 (a)). As can be seen from the figure, the poles of the stator and rotor are U-shaped. Their number is variable. The optimal pole number and stator/rotor pole ratio can be calculated based on specific given conditions, as will be shown below. The stator and the rotor of this SRM are not solid: the soft magnetic poles are incorporated into the non-magnetic, ceramic or plastic, retaining structure, which reduces the magnetic material consumption and the total weight of the motor. Besides, in contrast to the classical topology of SRM, shown in Fig. 1 and Fig. 2, the stator and rotor poles in the proposed topology have a modular structure and can be produced separately by cheaper technology.

The stator poles are activated individually in their turn, not in pairs as provided by the classical topology of SRMs. In this case, depending on the desired SRM characteristics, it is possible to use various algorithms to form control pulse sequences for the stator pole windings.

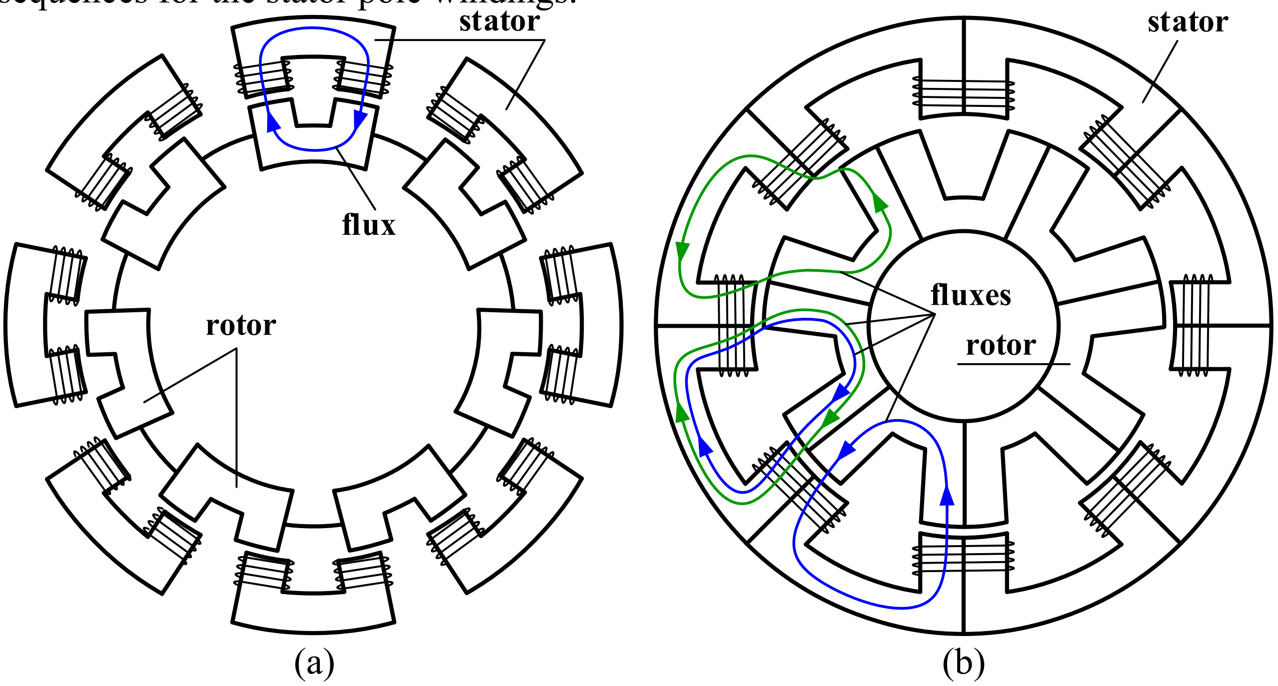


Figure 4 – SRM topologies with U-shaped poles

It should be pointed that the SRM topology with U-shaped poles requires additional space to place the windings at the stator poles (see Fig. 4 (a)), which can be obtained by reducing the rotor radius or by decreasing the density of the stator poles, that however leads to motor specific torque decrease. To prevent the reduction of the specific torque, it is proposed to use paired windings for the stator poles (Fig. 4 (b)), so that the windings are wound on the teeth of two adjacent poles together, which makes it possible to accurately place them in the pole windows without using additional space and thus provides the higher density of the poles. At the same time, the paired windings create magnetic fluxes in both poles at once, which should be considered when developing the control algorithm for the poles. Also, it is necessary

to note that the paired U-shaped poles are magnetically isolated from each other, so the distribution of magnetic fluxes between them differs from the one in SRM with the classical topology.

It is important to take into account that when the stator pole is activated, the magnetic flux passes not only through the working one, but also through the near poles of the rotor. This reduces the force of the rotor working pole attraction to the stator.

Theoretically, the magnetic flux generated by the stator active pole winding is distributed between all the rotor poles at the same time, but in practice, it is sufficient to consider the effect of magnetic flux only on two adjacent rotor poles (Fig. 5), because the effect on the other poles is too weak and can be neglected. Let's consider the processes of magnetic flux distribution between the rotor poles and its stray using Fig. 5.

Assume that the magnetic flux Φ_Σ is created by the active stator pole **1-s**. It is divided into three main components: the flux Φ_1 passing through the rotor pole **1-r**, the flux Φ_2 passing through the adjacent rotor pole **2-r**, and the stray flux Φ_3, which does not perform any useful work and is closed through the working pole of the stator **1-s** and the air gap between its teeth. Therefore:

$$\Phi_\Sigma = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3. \tag{1}$$

Let the rotor moves clockwise, then the pole **1-r** pulls the rotor in the forward direction, while the pole **2-r** pulls it in the opposite one, thus braking it. The stator pole, which is adjacent to the working one, is denoted in Fig. 5 as **2-s**. The distance between the nearest stator poles is denoted as l and the distance between the poles of the stator and the rotor as x.

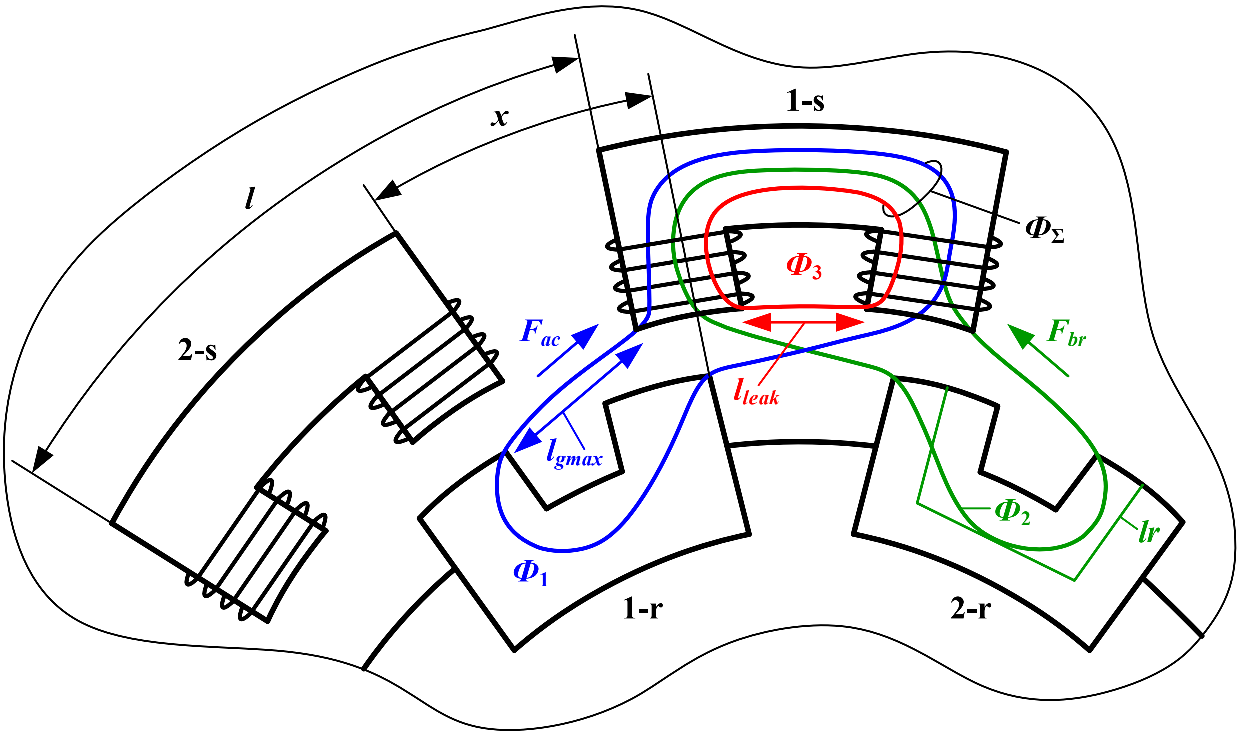


Figure 5 – Magnetic flux distribution between two adjacent rotor poles

 ISBN 978-3-949059-44-5

To evaluate the effect of each of the three components of the total magnetic flux, let's obtain the corresponding mathematical relationships.

First, let's express the magnetic field strength H through the magnetic flux Φ:

$$\left.\begin{aligned} H &= \frac{B}{\mu_0 \mu} \\ \Phi &= BS \end{aligned}\right\} \Rightarrow H = \frac{\Phi}{S \mu_0 \mu}, \tag{2}$$

here B is magnetic flux density, μ_0 is the permeability of free space, μ is relative permeability of the material, S is the surface area through which the magnetic flux passes.

Next, let's compose the equations for three magnetic circuits according to Kirchhoff's second law:

$$\begin{aligned} I \cdot N &= \frac{\Phi_\Sigma l_s}{S_g \mu_0 \mu_m} + \frac{\Phi_1 l_r}{S_g \mu_0 \mu_m} + \frac{\Phi_1 l_{g\max}}{S_g \mu_0 \mu_g}(1 - x^*) \\ I \cdot N &= \frac{\Phi_\Sigma l_s}{S_g \mu_0 \mu_m} + \frac{\Phi_2 l_r}{S_g \mu_0 \mu_m} + \frac{\Phi_2 l_{g\max}}{S_g \mu_0 \mu_g} x^* \\ I \cdot N &= \frac{\Phi_\Sigma l_s}{S_g \mu_0 \mu_m} + \frac{\Phi_3 l_{leak}}{S_g \mu_0 \mu_g}, \end{aligned} \tag{3}$$

here I is the stator winding current, N is the number of stator winding turns, l_s, l_r are the lengths of the magnetic circuit of the stator and the rotor respectively, S_g is the air gap area, μ_m, μ_g are the relative magnetic permeability of the magnetic circuit and the air gap respectively, $\mu_g \approx 1$, l_{leak}, l_{gmax} are the air gap between the stator pole teeth and the maximum stator and rotor poles' gap respectively, x^* is the distance between the poles of the stator and the rotor, normalized relative to l, $x^* = x/l$, x is the distance between the poles of the stator and the rotor.

Subtracting the second equation from the first one in (3), and then subtracting the third equation from the first one, we obtain the ratio between the magnetic fluxes:

$$\frac{\Phi_2}{\Phi_1} = \frac{l_r + l_{g\max}(1 - x^*)\mu_m}{l_r + l_{g\max} x^* \mu_m}; \frac{\Phi_3}{\Phi_1} = \frac{l_r + l_{g\max}(1 - x^*)\mu_m}{l_{leak}\mu_m};$$

$$\frac{\Phi_3}{\Phi_2} = \frac{l_r + l_{g\max} x^* \mu_m}{l_{leak}\mu_m}; \tag{4}$$

Adding two first equations, then adding and subtracting Φ_1, and considering (1), we obtain the ratio for Φ_1. In the same way, we obtain the ratios for the fluxes Φ_2, Φ_3:

 ISBN 978-3-949059-44-5

$$\Phi_1 = \frac{\Phi_\Sigma}{1 + \dfrac{q_1 + 1 - x^*}{q_1 + x^*} + \dfrac{q_1 + 1 - x^*}{q_2}},$$

$$\Phi_2 = \frac{\Phi_\Sigma}{1 + \dfrac{q_1 + x^*}{q_1 + 1 - x^*} + \dfrac{q_1 + x^*}{q_2}},$$

$$\Phi_3 = \frac{\Phi_\Sigma}{1 + \dfrac{q_2}{q_1 + x^*} + \dfrac{q_2}{q_1 + 1 - x^*}}, \tag{5}$$

here q_1, q_2 are the parameters, which depend on geometry and material of the poles:

$$q_1 = \frac{l_r}{\mu_m l_{g\max}}; \quad q_2 = \frac{l_{leak}}{l_{g\max}}, \tag{6}$$

Provided that the components of the forces are directed horizontally, magnetic flux Φ_1 makes the force F_{ac_x}, which accelerates the rotor pole, whereas the flux Φ_2 brakes it with the force F_{br_x}. Thus, the total force F_Σ is the difference between accelerating and braking forces:

$$F_\Sigma = F_{ac_x} - F_{br_x}, \tag{7}$$

The total torque M_Σ developed by the motor is calculated as a product of the total force and a radius R of the rotor:

$$M_\Sigma = F_\Sigma \cdot R. \tag{8}$$

The total current I_Σ of the stator pole winding can be calculated as follows:

$$I_\Sigma = I_{ac} + I_{br} + I_{leak}, \tag{9}$$

here I_{ac}, I_{br} are the currents inducing the accelerating force F_{ac_x} and the braking force F_{br_x} respectively, I_{leak} is the current inducing the stray flux.

The forces F_{ac_x} and F_{br_x} are the functions of the distance between the stator pole and a corresponding rotor pole, and can be expressed in terms of the generalized force F:

$$F_{ac_x} = F(1 - x^*); F_{br_x} = F(x^*). \tag{10}$$

The generalized force F is calculated as follows:

 ISBN 978-3-949059-44-5

$$F(x^*) = \frac{1}{2\mu_0 S_g} \cdot \left(\frac{I(x^*)L(x^*)}{N} \right)^2 = k\left(I(x^*)L(x^*)\right)^2, \tag{11}$$

here $L(x^*)$ is the generalized inductance, which is associated with one of the fluxes, k is the coefficient, which depends on the pole parameters.

The generalized inductance is calculated by the formula:

$$L(x^*) = \frac{N^2 \mu_0 S_g \mu_m}{l_m + l_{g\max} x^* \mu_m} = \frac{\dfrac{N^2 \mu_0 S_3 \mu_m}{l_{g\max} \mu_m}}{(l_m / (\mu_m l_{g\max}) + x^*)} = \frac{c_1}{c_2 + x^*}, \tag{12}$$

According to the total force expression, we can plot the stator pole attraction force (total force) versus rotor pole normalized distance x^* (Fig. 6).

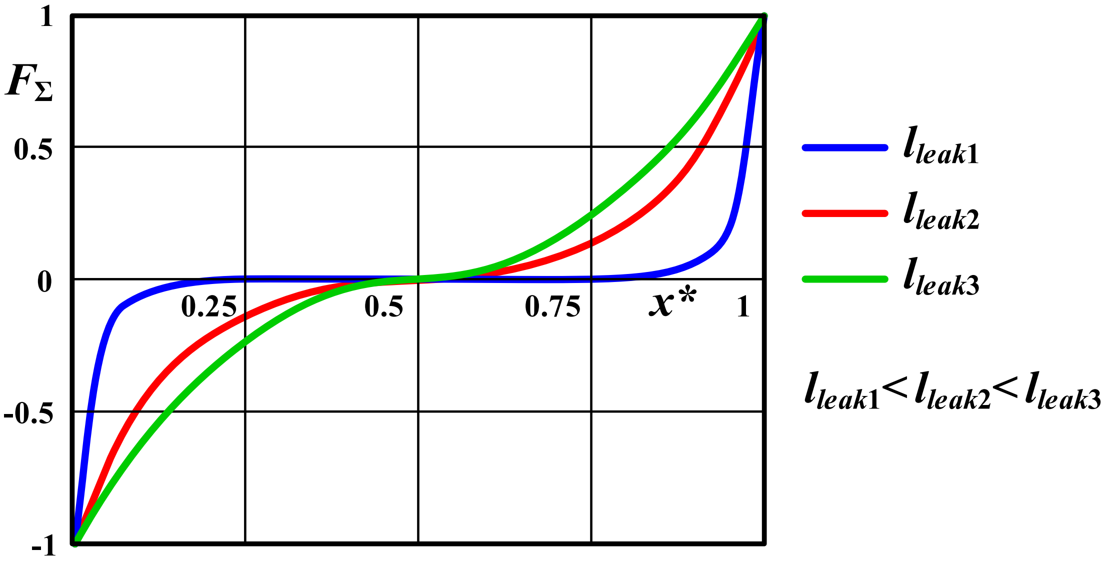


Figure 6 – The total force over the normalized distance x^* plot

We can distinguish three different intervals on the plot.

$x^* > 0{,}5$:

In this interval, the rotor pole conducting magnetic flux Φ_1 is closer to the active stator pole than the pole conducting the flux Φ_2. This provides a positive total force in the direction of the rotor movement, $F_\Sigma > 0$.

$x^* < 0{,}5$:

In this interval, the rotor pole conducting magnetic flux Φ_1 is further from the active stator pole than the pole conducting the flux Φ_2. This provides a negative total force in the direction of the rotor movement, $F_\Sigma < 0$.

$x^* = 0{,}5$:

In this point, the magnetic fluxes through the both rotor poles are equal, $\Phi_1=\Phi_2$, whereas the stray flux Φ_3 is maximal. So that, the total force is zero, $F_\Sigma = 0$.

It is also important to pay attention to the dependence of the total force on the distance l_{leak} between the teeth of the stator pole. Thus, the smaller distance the smaller value of the total force we have, which is logical considering the increase of the stray flux Φ_3. Therefore, the condition $l_{leak} >> l_g$ should be kept during the entire operating time to provide efficient motor operation.

Obviously, another important condition for ensuring high efficiency of SRM operation, as well as minimal torque pulsations under minimal total current of the stator pole winding is the tendency of the braking force F_{br} to zero. This requires the working rotor pole to be as close as possible to corresponding stator pole when activating it during rotor rotation. Thus, the topology of the SRM, namely the number of stator and rotor poles and their ratio, plays a crucial role.

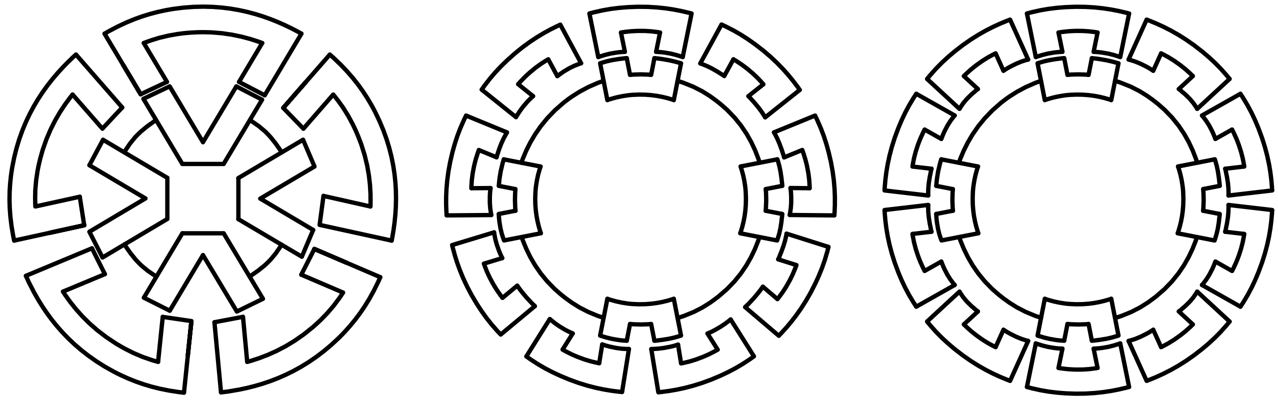
To evaluate the efficiency of the SRM, let's use the ratio k_F of braking and accelerating forces affecting the working rotor pole:

$$k_F=1 - F_{br_x} / F_{ac_x}. \tag{13}$$

The values of k_F can vary in the range [0; 1] for $x^* \geq 0.5$, where the zero value corresponds to complete inefficiency and the value 1 corresponds to the maximum efficiency.

It is important to note that the possibility of creating torque is provided when the number of stator poles k exceeds the number of rotor poles m, $k > m$. The maximum efficiency of SRM, $k_F = 1$, is achieved by increasing k and m to infinity, which is practically unattainable. Therefore, it is advisable to maximize the efficiency of the motor at a fixed number of stator and rotor poles.

Let's consider and analyze several possible topologies of SRM. The topologies with stator/rotor poles combinations $(n+1)/n$, $(2n+1)/n$, $(2n+2)/n$ for $n = 4$ are shown in Fig. 7 (a), (b), (c) respectively.



(a) (b) (c)

Figure 7 – SRM topologies: (a) (*n*+1)/*n*, (b) (2*n*+1)/*n*, (c) (2*n*+2)/*n*

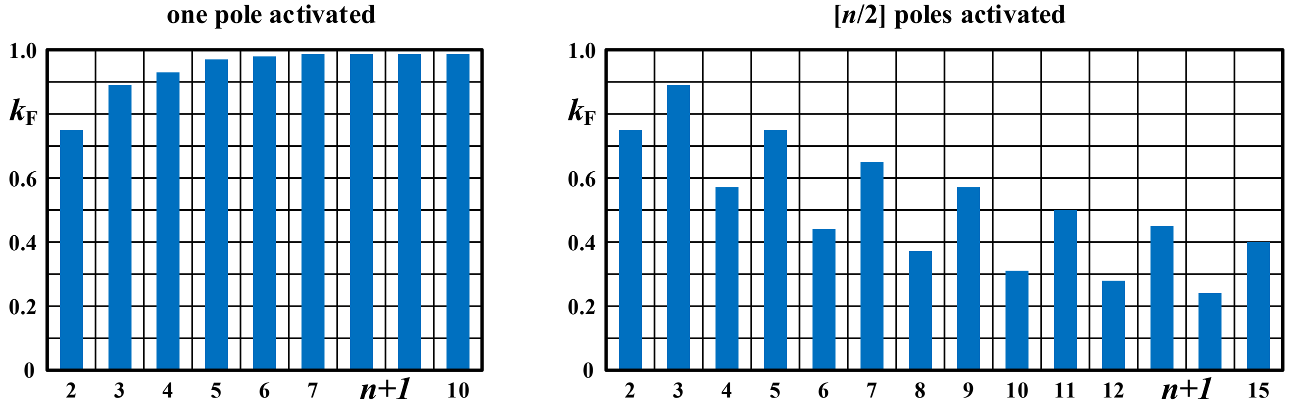
As we can see from Fig. 7, in the topologies (b) and (c) the number of the stator

poles is significantly higher than the number of the rotor poles. This determines remote location of adjacent rotor poles relative to the active pair of rotor and stator poles, and obviously provides less braking force than the one in the topology (a). However, the topology (a) has a higher density of the rotor poles' location relative to the stator ones, which makes it possible to obtain a higher accelerating force, so, this topology is more preferable in practice.

It should be noted that the dimensional parameters of the stator and rotor poles should be chosen to provide the same cross sections of their teeth and the same distances between the teeth, because the magnetic fluxes passing through them are equal, so they have the same saturation conditions. The shape of the rotor poles is not so important and can be chosen based on the configuration of the SRM internal space. For example, in Fig. 7 (a) the shape of the rotor poles is triangular.

As mentioned earlier, it is possible to apply different control algorithms to SRM poles by activating one or more stator poles simultaneously or in certain sequences. Based on the fact that only one rotor pole can be located maximally close to the working stator pole at each time, it is obvious that the highest efficiency can be achieved if you activate exactly one rotor pole at each time point. When controlling several poles at the same time, it is possible to develop more force, but in this case the poles switch at the moments of less efficiency.

Fig. 8 shows the dependence of the force ratio k_F on the number of poles for the SRM topology $(n+1)/n$ with two control options: (a) one pole activation, (b) simultaneous activation of $[n/2]$ poles, where the result is rounded off to the nearest integer number. As can be seen from the figure, for the option of one pole activation, the increase of the number n causes significant increase of the ratio k_F, and at $n = 10$ k_F approximates 1. When simultaneously activating $[n/2]$ poles, the ratio k_F decreases if the number of poles increases due to shortening the distance difference between the accelerating and braking poles. It should be noted that in the last case, the even value of n provides higher efficiency because more stator poles can operate simultaneously.



(a) (b)

Figure 8 – Dependence of SRM force ratio k_F on the number of poles:
(a) one pole activation, (b) simultaneous activation of [n / 2] poles

The total force relation on n values for the defined motor dimensions (length l = 860 mm, diameter D = 520 mm) for one pole operation and $[n/2]$ pole operation

were evaluated and presented in Fig. 9 (a) and (b) respectively.

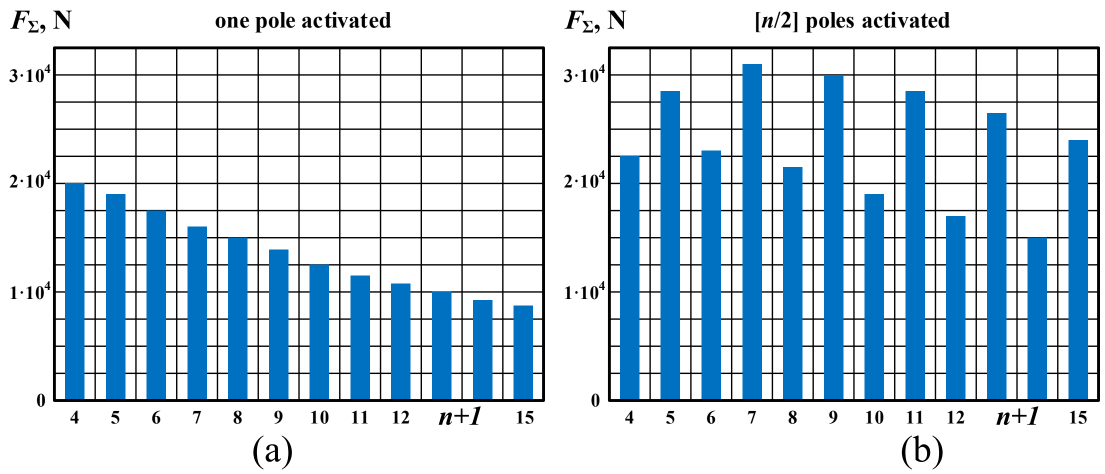


Figure 9 – Dependence of SRM total force on the number of poles:
(a) one pole activation, (b) simultaneous activation of [n/2] poles

As can be seen from the figure, if one pole activation is used, the maximum value of the force decreases with increasing the number of the poles. It can be explained by increasing the stray flux due to decreasing the pole dimensions. When using [n/2] poles, the maximum force is achieved at some value of n (here at $n = 7$), that should be taken into account in designing the motor.

In order to verify the theoretical positions, a motor with U-shaped poles located by (n+1)/n topology at $n = 7$ (when maximum force achieved F_Σ) and with the simultaneous control of three poles was developed and calculated. The SRM was placed in the standard motor case with the following dimensions: length $l = 860$ mm, diameter $D = 520$ mm. As a material for magnetic circuit, alsifer was chosen due to its high magnetic saturation and good frequency characteristics. The volume of the motor was reduced by 2.75 times and the power was increased by 6 times. Thus, the developed motor with the dimensions $l = 313$ mm, $D = 520$ mm provides a torque 1150 N/m and has a maximum speed 9375 rpm. The losses on the magnetic circuit magnetization reversal at the maximum operating frequency amounted to 8%.

In general, SRM with the proposed topology provides the same values of torque and its pulsation, as classical SRM. To improve these characteristics, it is advisable to analyze the pole shape and to choose the optimal one, as well as to apply the specific regulation of the current in the stator windings. So, further, let's consider certain ways to increase the torque and to decrease its pulsation.

9.3. Optimal pole profile of U-shaped pole switched reluctance motors

As mentioned earlier, the relatively low specific torque, as well as its significant ripple are the main disadvantages of SRM, caused by regular changes in the position of stator and rotor poles and, accordingly, by constant change in torque. Let's analyze the factors affecting these parameters.

To simplify the analysis, let's consider a model of a system consisting of three U-shaped poles – two rotor poles, **1-r** and **2-r**, and one stator pole **1-s** with a winding

1-w (Fig. 10).

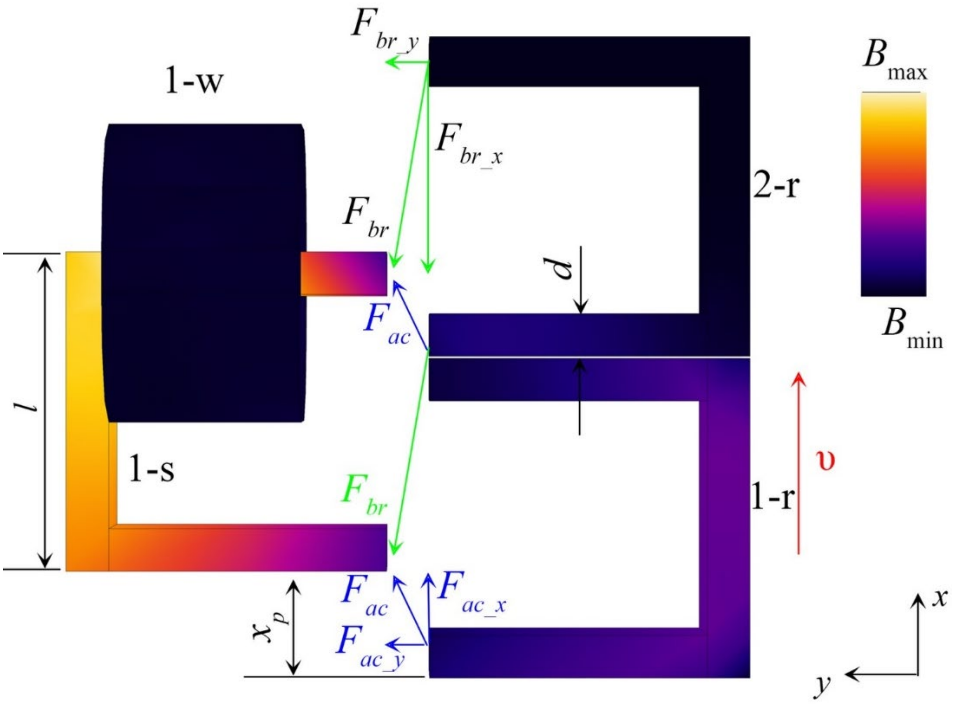


Figure 10 – The system of three U-shaped poles

The color gradient in Fig. 10 shows the change in the induction value B in the poles. As can be seen from the figure, a magnetic flux is induced in the stator pole, and is distributed between the two rotor poles. The magnetic flux closing through the rotor pole **1-r** produces a force F_{ac}, a component of which F_{ac_x} creates a torque, whose vector is co-directed with the velocity υ vector. In the same time, the magnetic flux closing through the pole **2-r** creates an oppositely directed braking force F_{br_x}. However, given the relative position of the poles, the force F_{ac_x} is bigger than the force F_{br_x}, the values of which are inversely proportional to the distance between the poles, so the rotor rotates in the positive direction. The force components F_{ac_y} and F_{br_y} attract the stator and rotor poles to each other and do not perform useful work.

Theoretically possible force F_Σ, which is determined by the magnetic induction B and the cross-sectional area of the pole S_g [11]:

$$F_\Sigma = \frac{S_g B^2}{2\mu_0}, \tag{14}$$

It is convenient to introduce the factor of electromagnetic energy use of SRM k_f^*:

$$k_f^* = \frac{F_{\Sigma x}}{F_\Sigma} = \frac{F_{ac} - F_{br}}{F}. \tag{15}$$

It becomes obvious from (15) that the factor k_f^* is low, which explains the low specific torque of SRM. It should be noted that the real value of the factor k_f^* is even lower, because the following phenomena are not taken into account in (15): stray flux formed in the stator pole, saturation of the magnetic circuit and the energy loss in the pole winding. In addition, the factor k_f^* depends on the relative position of the poles, which is determined by the parameter x_p, $k_f^* = f(x_p)$, so at a constant current of the stator pole windings for certain values of x_p the factor of electromagnetic energy use is critically low, which causes significant pulsation of the motor torque.

One of the ways to increase the torque and reduce the ripple is to optimize the shape of the poles, which is proposed in a number of studies [12, 13]. An alternative to this is the formation of stator winding current by a special law [14]. Next, the implementation of these two approaches is investigated.

When using the poles with a rectangular profile, there is a significant uneven distribution of the magnetic flux as well as the torque decrease caused by high concentration of the magnetic field at the pole edges (Fig. 11) producing the pole material saturation in these places, and consequently a decrease in the torque and the factor of electromagnetic energy use k_f^*. Additionally, the factor k_f^* decreases if the distance between the poles x_p (Fig. 10) does not exceed the width of the pole tooth d, because in this case the force component F_x acting along the x-axis and performing the useful work, is much smaller than the force component F_y ($F_x << F_y$).

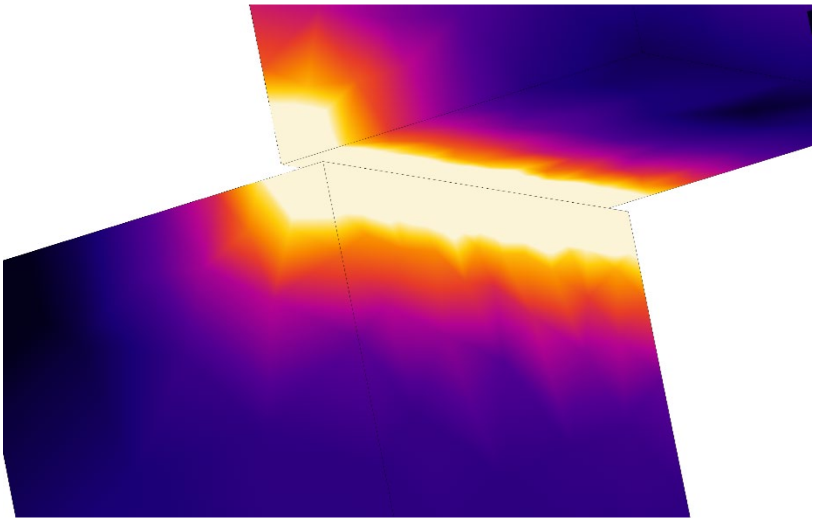


Figure 11 – The field concentrated at the edges of the poles with a rectangular profile

To eliminate this disadvantage in SRMs of classical topology, a more complex pole shape, often trapezoidal one with an extended profile (Fig. 12 (a)), is proposed to use in a number of studies. Such a pole shape really provides to develop a significant torque in a larger part of the rotation sector due to increasing the inductance of the system "stator pole - rotor pole". However, it has the following disadvantages: reduce of the factor of electromagnetic energy use k_f^* at the intersections of the poles caused by a significant increase in the force component F_y comparing to the component F_x ($F_x << F_y$), as well as the pole material saturation at the edges (Fig. 11).

For the proposed SRM structure consisting of U-shaped poles, this approach has the additional disadvantage. A substantial increase in the stray flux of the stator field caused by a significant reduction in the distance between the pole teeth at their expansion places makes it impossible to use this pole shape, in fact. Therefore, it is also advisable to analyze the trapezoidal pole with a narrowed profile, shown in Fig. 12 (b).

The pole faces should be formed at an angle of 45° with a length equaling to a half the pole width *d*/2. Then the induction density on the pole face will be almost even, because of the equidistance of the faces of the two poles. However, it should be noted that when using a trapezoidal pole with a narrowed profile, the effective gap width increases.

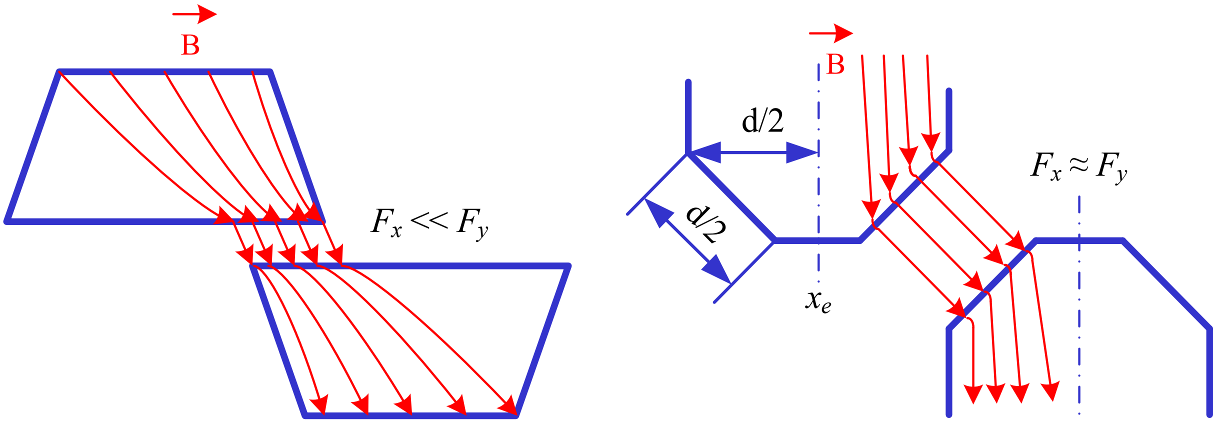


Figure 12 – Pole profiles: ***(a) trapezoidal pole with an extended profile, (b) trapezoidal pole with a narrowed profile***

Therefore, we can see, that the choice of the pole shape, providing the highest value of the factor k_f^* and torque, as well as minimal ripple, is a complicated task. So, it is convenient to use a mathematical model of SRM stator and rotor poles to evaluate the electromagnetic processes. The software environment of Comsol Multiphysics is considered as the most suitable for creating and studying such a model. In particular, the simulation software is used to analyze the induction distribution in the magnetic core and the rotational force formation.

The total force F_Σ that can be formed in the stator pole is calculated by the formula (14). Since the induction B in the core is a function of three spatial coordinates, $B = f(x, y, z)$, the formula (14) will be transformed as follows:

$$F = \frac{\iint_S B(x, y, z_0)^2 dxdy}{2\mu_0}, \qquad (16)$$

here S is a level surface at $z = z_0$ intersecting the stator pole in the plane of the highest induction density, as shown in Fig. 13.

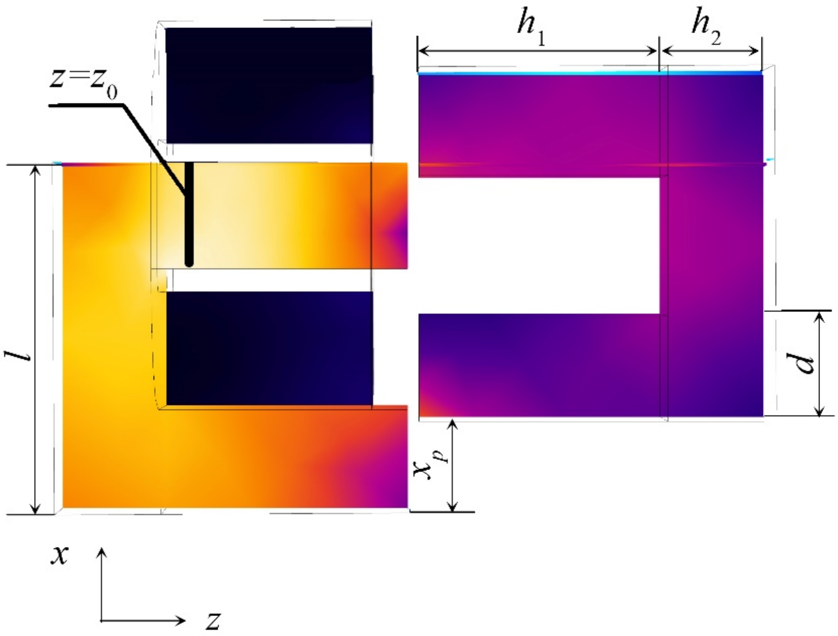


Figure 13 – Illustration to the choice of induction integration surface

First, we analyze the dependence of the factor of electromagnetic energy use k_f^* and the rotational force $F_{\Sigma x}$ on the width d of the teeth of U-shaped poles and on their mutual displacement x_p (Fig. 13). To do this, let's introduce the normalized offset parameter x^*:

$$x^* = \frac{x_p}{l}, \qquad (17)$$

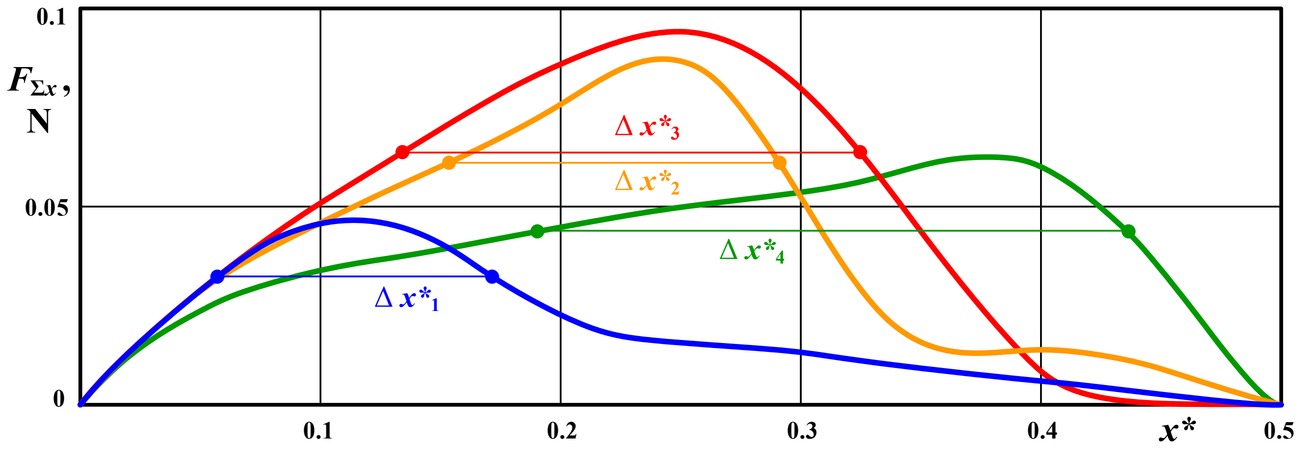
here l is the pole base length.

The dependences $F_{\Sigma x}(x^*)$ and $k_f^*(x^*)$ are obtained for the interval x^* ϵ[0; 0.5) where the rotational force $F_{\Sigma x}$ is directed positively, and the pole tooth width d specifies as $2l/15$, $4l/15$, $5l/15$, $6l/15$, the pole base length l = 15 mm, the pole thickness w = 1 mm, the tooth height h_1 = 15 mm, the pole base width h_2 = 4.5 mm. The dependences $F_{\Sigma x}(x^*)$ and $k_f^*(x^*)$ at a constant current of the stator pole winding are shown in Fig. 14.

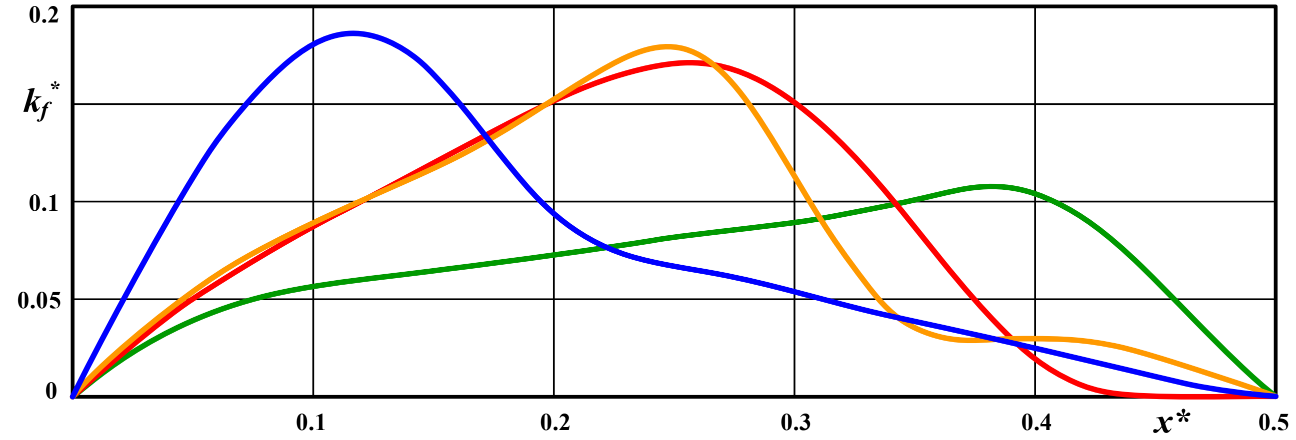
Fig. 14 (a) shows that a gradual increase in the pole tooth width d gives a positive effect on the initial stage – the interval Δx^* ,within which the force $F_{\Sigma x}$ is large than 70 % of its maximum value, increases as well as the force absolute value. However, when the pole tooth width d exceeds the value of one third of the pole base length l (d = 5 mm), a further increase in the parameter d, although leads to an increase in Δx^*, causes a significant decrease in the absolute values of the torque and the factor of energy use k_f^*. Therefore, when using rectangular poles, the effective control range of Δx^* is narrow and does not exceed 20% of the pole base length l. Further increase of the control range Δx^* is possible with a significant decrease in the factor of energy use k_f^*.

Fig. 14 shows a comparison of the rotational force $F_{\Sigma x}$ and the factor of energy use k_f^* depending on the coordinate x^* for a pole with a rectangular profile (curve 1), a trapezoidal pole with an extended profile (curve 2) and a trapezoidal pole with a

narrowed profile (curve 3).



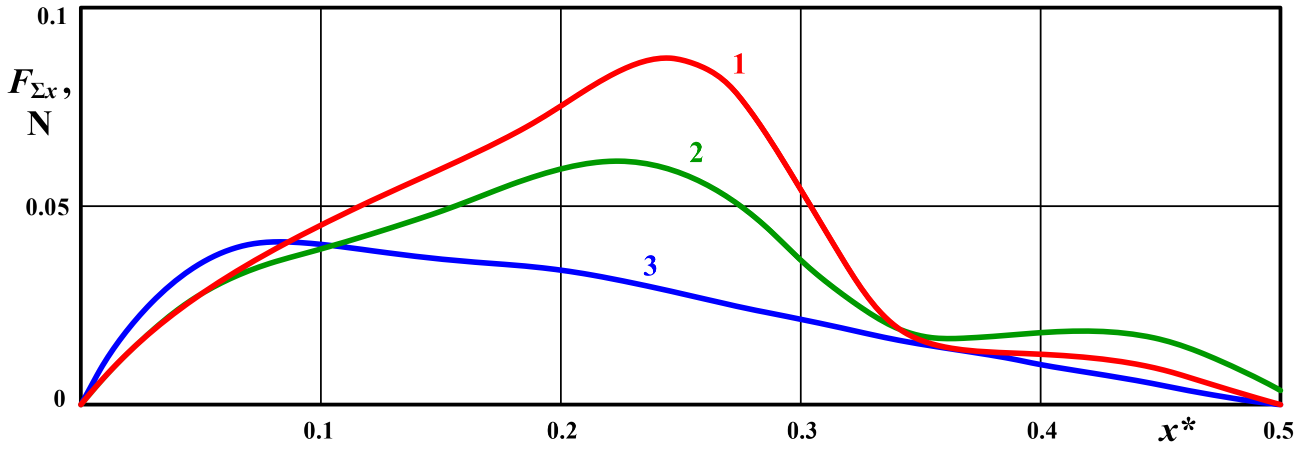
(a)



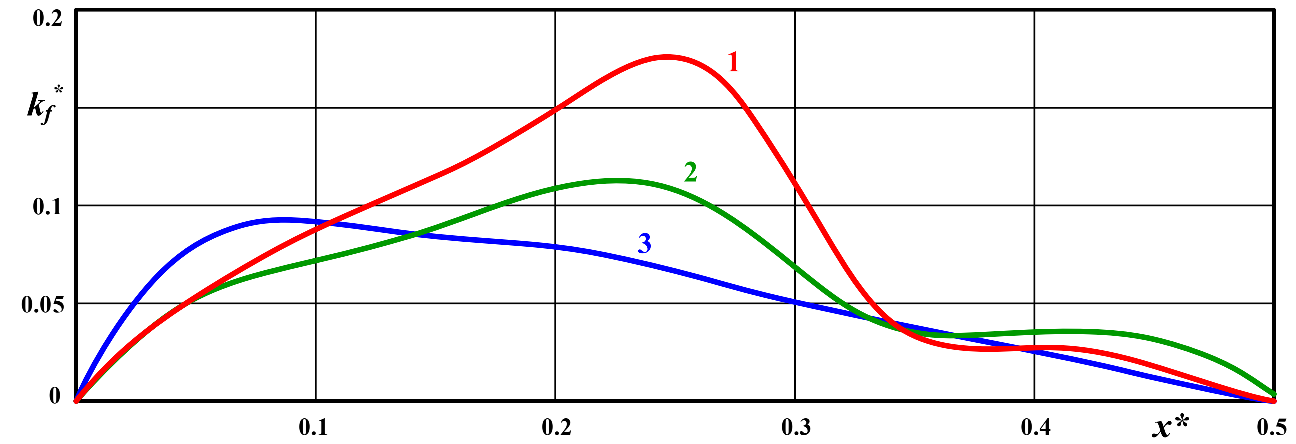
(b)

Figure 14 – The dependences for the pole with rectangular profile: (a) $F_{\Sigma x}(x^*)$, (b) $k_f^*(x^*)$

Analyzing Fig. 15, we can conclude that the use of the poles with a rectangular profile is more advisable for the proposed SRM design, as it provides the highest values of the rotational force and the factor of energy use. It should be noted that the decrease in the rotational force when using the trapezoidal pole with a narrowed profile is associated with an increase in the effective width of the air gap, whereas when using the trapezoidal pole with an extended profile it is associated with an increase in stray flux.



(a)



(b)

Figure 15 – A comparison of the dependencies for different pole shapes: (a) $F_{\Sigma x}(x^*)$, (b) $k_f^*(x^*)$

9.4. Minimizing the torque ripple of electric drive for switched reluctance motors

To increase the factor of energy use and to reduce the ripple of the torque, it is advisable to control the force F_Σ by changing the stator pole winding current according to a special law. Since the value of induction is proportional to the winding current, the force F_Σ is proportional to the square of the current (see (14)). Thus, to ensure the constant torque generated by the pole in a certain sector, it is necessary to form a special shape of the pole winding current. Because of that, the electric drive for the proposed SRM topology should meet the following requirements: the ability to regulate the output current shape, the ability to form steep edges of the current pulse, and the high efficiency.

Typically, SRMs are supplied with asymmetrical half-bridge converters [15]. Besides, shared topologies are used for more effective utilization of transistor switches [16, 17]. In order to improve converter efficiency, a soft switching control strategy and full-bridge topologies that allow synchronous rectifying [18] are used. In

the simplest case of SRM operation, the converter generates the constant current pulse in predefined stator pole winding based on the current chopping control that causes a significant torque pulsation. Some more advanced methods, for instance direct torque control [19] or use of torque sharing function [20] are able to reduce torque pulsation, however they involve the intersection of the currents of different poles of the stator that reduces SRM efficiency (Fig. 16).

The proposed control algorithm allows both to provide constant torque and to eliminate current intersection in SRM stator pole windings. The necessity of forming the sharp rising edge of winding current (Fig. 16, curve 3) makes it inappropriate to use the common asymmetrical half bridge converter because of its high operation frequency and thereby low efficiency. More attractive solution can be implemented in modular SRMs consisting of an even number of rotor and stator sections.

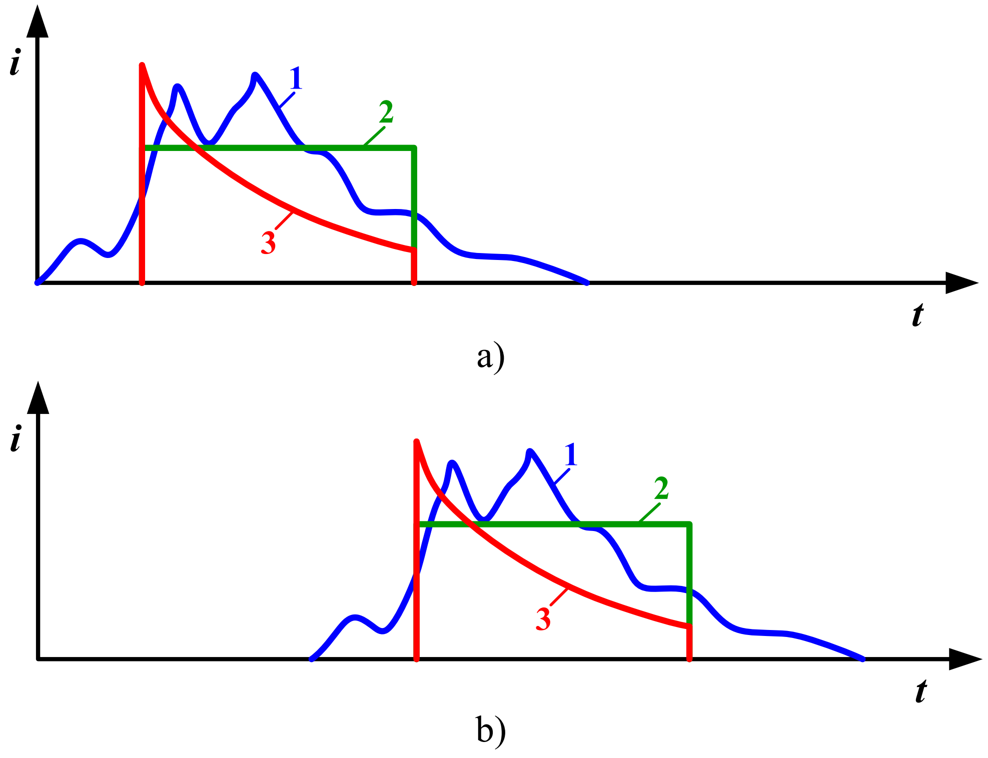


Figure 16 – Winding current shape in first pole (a) and second pole (b) of SRM:
1 – direct torque control, 2 – current chopping control, 3 – proposed control.

Let's consider a case of two-sectioned SRM. In such a motor, the total force F_{Σ} is a sum of the forces of the two sections, $F_{\Sigma 1}$ and $F_{\Sigma 2}$:

$$F_{\Sigma} = F_{\Sigma 1} + F_{\Sigma 2}. \quad (18)$$

As it was noted, the force F is proportional to second power of the winding current I, $F \sim I^2$. So, if we define the currents of the stator sections I_{SW1} and I_{SW2} as follows:

$$I_{SW1}(t) = I_{\Sigma}(t)\cos(\omega t); \quad (19)$$

$$I_{SW2}(t) = I_{\Sigma}(t)\sin(\omega t). \quad (20)$$

Then the total force F_Σ is proportional to the square of the total current:

$$F_{\Sigma} \sim I_{SW1}(t)^2 + I_{SW2}(t)^2 = I_{\Sigma}(t)^2, \quad (21)$$

and therefore it doesn't have pulsation as it's shown in Fig. 17.

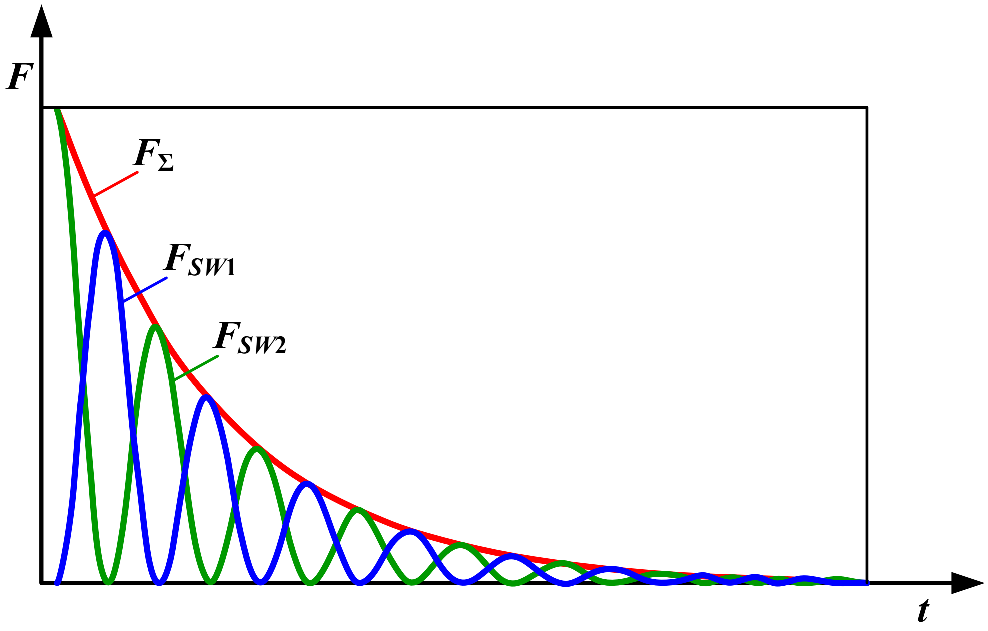


Figure 17 – The total force control in two-sectioned SRM

In conventional converter topologies, the regulation of the winding current amplitude in a wide range in accordance with a given shape of the total current $I_\Sigma(t)$ through harmonic currents as shown in formulas (22) and (23), requires more complex solutions, for example, two-stage conversion [21]. In single-stage converters, which are more efficient, it is advisable to regulate magnetic flux with additional stator winding. In this case, a total magnetic flux $\Phi_{SW(i)}$ of one SRM section is formed with two winding currents $I_{SW(i)1}$ and $I_{SW(i)2}$:

$$\Phi_{SW(i)}(t) \sim I_{SW(i)}(t) = I_{SW(i)1}(t) + I_{SW(i)2}(t). \quad (22)$$

If the current $I_{SW(i)1}$ is equal to $A\sin(\omega t)$ and the current $I_{SW(i)2}$ has the same amplitude A but is shifted the angle φ, $I_{SW(i)2} = A\sin(\omega t + \varphi)$, the section total flux $\Phi_{SW(i)}$ is calculated as follows:

$$\Phi_{SW(i)}(t) \sim 2A\sin(\omega t + \varphi/2)\cos(\varphi/2) =$$

$$= A^{*}\sin(\omega t + \varphi/2). \quad (23)$$

Therefore, it is possible to regulate the amplitude A^* in the range [0; 2A] through

changing the angle φ.

The proposed way of the total force control has the following advantages:

- a possibility to form sharp rising edge of the current and subsequently of the total force;

- a high efficiency of motor drive due to transistor soft switching at current zero crossing time intervals.

As a basic topology providing the quasi-harmonic current shape given by formulas (19) and (20), a resonant bridge converter [22] shown in Fig. 18 can be used.

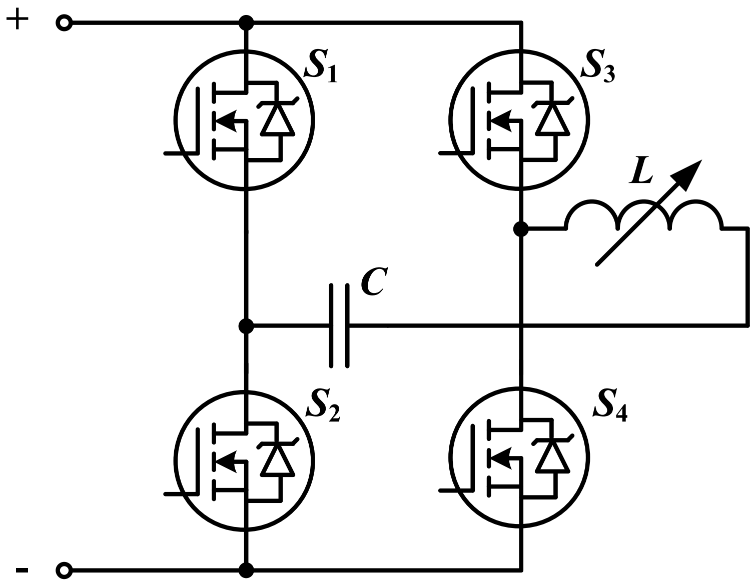


Figure 18 – Resonant bridge converter

The converter resonant circuit consists of a resonant capacitor *C* and a variable inductance of SRM stator pole winding *L*. The transistors S1-S4 are switched with the frequency

$$\omega = \frac{2}{\sqrt{LC}}, \tag{24}$$

at zero current.

The electric drive for one two-sectioned stator pole includes four identical resonant converters as shown in Fig. 19.

Such a modular drive structure additionally distributes the power among the converters [24].

As mentioned above, the stator poles operate one by one, therefore only one stator electric drive section can be used simultaneously. So, it may be connected to each stator pole via bidirectional switches S_{W11}- S_{W1n} and S_{W21}- S_{W2n} as shown in Fig. 20.

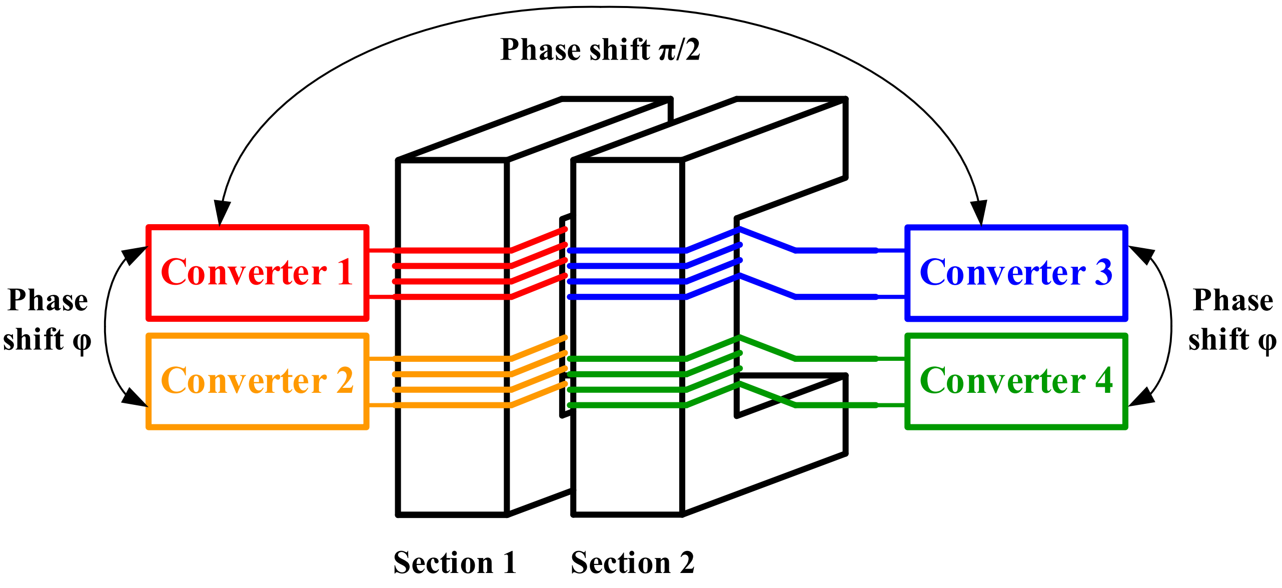


Figure 19 – Electric drive for one two-sectioned stator pole

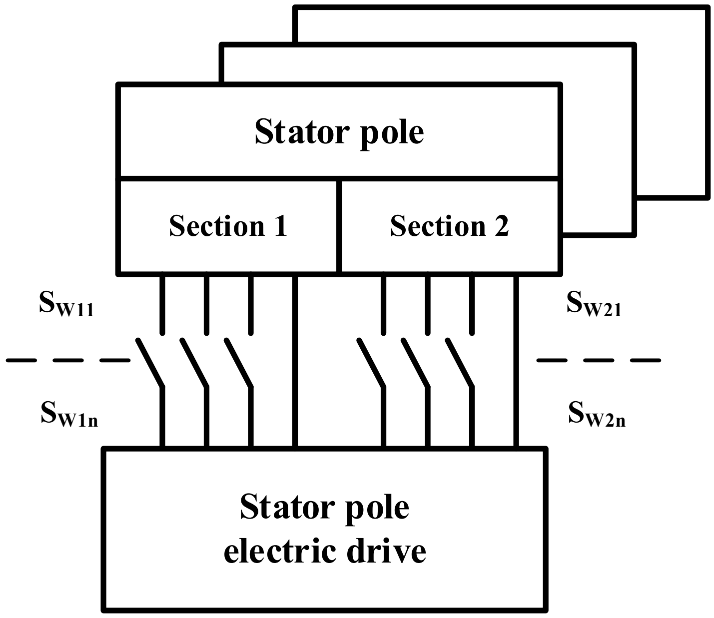


Figure 20 – Proposed SRM electric drive structure

SRM electric drive model is designed in MATLAB Simulink®. One converter model is shown in Fig. 21 (a) and a full SRM drive model is shown in Fig. 21 (b).

The following values of the parameters of the resonant elements are used in the simulation: variable winding inductance $L = 10^{-4}...10^{-3}$ H, capacitance of the resonant capacitor $C = 10^{-4}$ F.

The diagrams of the section winding currents and the section forces over time are shown in Fig. 22 (a) and (b) respectively.

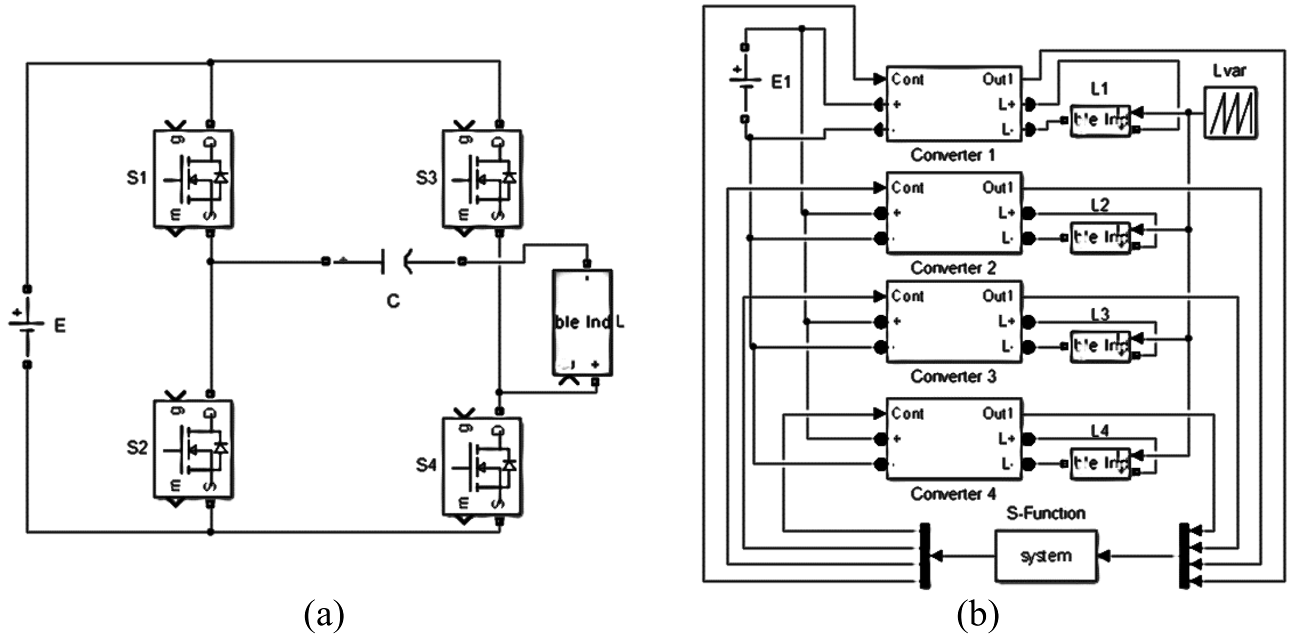


Figure 21 – SRM model: (a) one converter model, (b) full SRM drive model

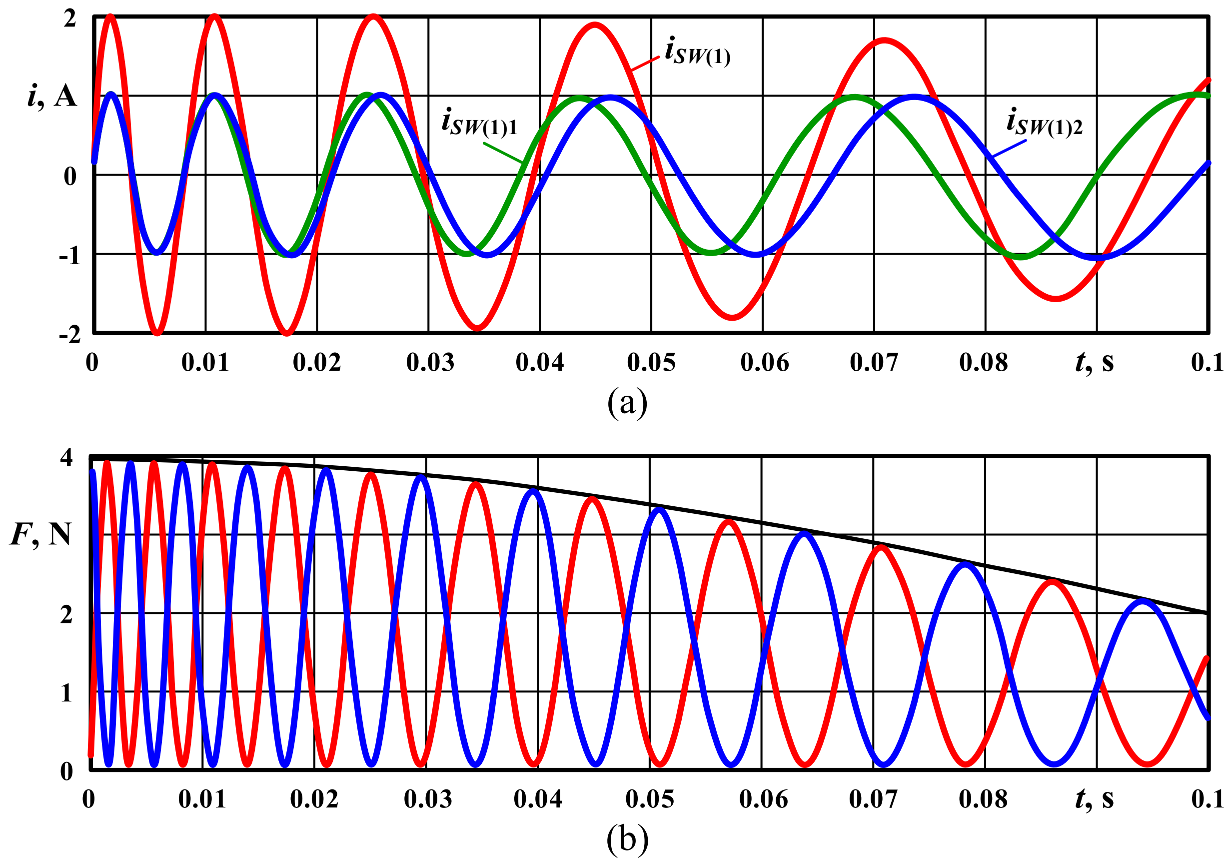


Figure 22 – The diagrams over time: (a) section currents, (b) SRM forces

As we can see in Fig. 22 (a), the phase shift control of two section currents $I_{SW(1)1}$ and $I_{SW(1)2}$ of the stator pole makes it possible to regulate the amplitude of the equivalent current $I_{SW(1)}$ that allows to obtain the total force F_Σ without pulsation as

ISBN 978-3-949059-44-5

considered in the theory.

Conclusions

1. Although the brushless synchronous DC motors with permanent magnets are a kind of standard in electric cars today, the steady development of technologies and design ideas as well as the changes in the market conditions for motor components of electric vehicles lead to the fact of rising the interest to other decisions. So that, simple and cheap switched reluctance motors are considered now as promising alternative, that makes the studies directed to enhancing their characteristics highly relevant.

2. The disadvantages of classical switched reluctance motors, such as low specific torque and its significant ripple, caused by their design features and operation principles can be eliminated by forming a special current shape in the stator windings and by improving the motor topology through optimizing the shape of the poles and their ratio.

3. A new represented topology of SRM has U-shaped stator and rotor poles. It characterized by reducing the magnetic material and the total weight of the motor. The modular structure of the stator and rotor poles makes it possible to produce them separately by cheaper technology comparing to a classical SRM topology. To provide the higher density of the poles and so prevent the reduction of the specific torque, it is proposed to use paired windings for the stator poles.

4. It was defined that to ensure efficient motor operation the condition $l_{leak} >> l_g$ (where l_{leak} and l_g are the air gap between the stator pole teeth and the stator and rotor poles’ gap respectively) should be kept during the entire operating time. Another important condition is the tendency of the braking force F_{br} to zero, which requires the working rotor pole to be as close as possible to corresponding stator pole when activating it during rotor rotation.

5. The SRM topology with U-shaped poles placed in accordance with $(n+1)/n$ ratio, where numerator is the stator pole number and the denominator is the rotor pole number, provides a higher density of the rotor poles' location relative to the stator ones, which makes it possible to obtain a higher accelerating force, so, this topology is considered as more preferable in practice.

6. In order to verify the theoretical positions, a motor with U-shaped poles located by $(n+1)/n$ topology at $n = 7$ and with the simultaneous control of three poles was developed and calculated. As a result, the developed motor with the dimensions $l = 313$ mm, $D = 520$ mm provides a torque 1150 N/m and has a maximum speed 9375 rpm. The losses on the magnetic circuit magnetization reversal at the maximum operating frequency amounted to 8%.

7. The analysis of the simulation results showed that the use of the poles with a rectangular profile is more advisable for the proposed U-shaped pole SRM design, as it provides the highest values of the rotational force and the factor of energy use.

8. The electric drive for the proposed SRM topology with U-shaped poles should meet the following requirements: the ability to regulate the output current shape, the ability to form steep edges of the current pulse, and the high efficiency. A

resonant bridge converter is chosen as an effective basic circuit providing the needed quasi-harmonic current shape of the stator pole winding.

9. The use of modular SRM topology consisting of an even number of rotor and stator sections makes it possible to implement the effective phase shift control method providing the formation of sharp rising edge of the current and subsequently of the motor total force, a stability of the motor total force without pulsation, and a high efficiency of motor drive due to transistor soft switching at current zero crossing time intervals.

Verweise / References

Chapter 1.

1. Формовочные материалы и смеси / С. П. Дорошенко, В. П. Авдокушин, К. Русин, И. Мацашек. – Київ: Вища школа, 1980. – 416 с.

2. Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия / [А. Н. Болдин, Н. И. Давыдов, С. С. Жуковский та ін.]. – Москва: Машиностроение, 2006. – 507 с.

3. Илларионов И. Е. Теоретические и технологические основы разработки фосфатных смесей / И. Е. Илларионов. – Липецк, 1989. – 148 с.

4. Копейкин В. А. Огнеупорные растворы на фосфатных связующих / В. А. Копейкин, В. С. Клементьева, Б. Л. Красный. – Москва: Металлургия, 1986. – 102 с.

5. Лютий Р.В. Формувальні матеріали: Підручник / Р. В. Лютий, І. М. Гурія. – Київ: КПІ ім. І. Сікорського. – 2020. – 257 с.

6. Дорошенко С. П. Формувальні суміші / С. П. Дорошенко. – Київ: ІЗМН, 1997. – 140 с.

7. Лысенко Т. В. Управление процессами в литейной форме / Т. В. Лысенко, В. П. Малахов, А. Л. Становский. – Одесса: ВМВ. – 2009. 475 с.

8. Управление литейными системами и процессами: Монография / [О. И. Пономаренко, Т. В. Лысенко, А. Л. Становский, О. И. Шинский]. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – 368 с.

9. Kingery W. D. Introduction to Ceramics, 2nd Edition / W. D. Kingery, H. K. Bowen, D. R. Uhlmann. – Canada: John Wiley & Sons, Inc., 1976. – 1056 c.

10. Уайгант Д. Ф. Химия фосфатных связующих / Дж. Ф. Уайгант // Процессы керамического производства / Дж. Ф. Уайгант. – Москва: Изд-во иностранной литературы, 1960. – С. 210–232.

11. Журавлев В. Ф. Химия вяжущих веществ / В. Ф. Журавлев. – Ленинград: Госхимиздат, 1951. – 268 с.

12. Сычев М. М. Неорганические клеи / М. М. Сычев. – Ленинград: Химия, 1974. – 160 с.

13. Голынко-Вольфсон С. Л. Химические основы технологии и применения фосфатных связок / С. Л. Голынко-Вольфсон, Л. Г. Судакас. – Ленинград: Химия, Ленингр. отд, 1968. – 191 с.

14. Судакас Л. Г. Фосфатные вяжущие системы / Л. Г. Судакас. – Санкт-Петербург: РИА «Квинтет», 2008. – 260 с.

15. Васин Ю.П. Теоретические основы выбора фосфатных формовочных смесей / Ю. П. Васин // Международная конференция «Феррифосфатные ХТС и технология получения на их основе высококачественных отливок». – 1987. – С.9–11.

16. Гамов Е. С. Теория твердения и технология применения формовочных смесей на основе железофосфатных связующих: дис. докт. техн. наук: 05.16.04 / Гамов Е. С. – Липецк, 1990. – 312 с.

17. Жуковский С. С. Формы и стержни из холоднотвердеющих смесей /

С. С. Жуковский, А. М. Лясс. – Москва: Машиностроение, 1978. – 224 с.

18. Илларионов И. Е. Металлофосфатные связующие и смеси / И. Е. Илларионов. – Чебоксары: ЧГУ. – 1995. – 524 с.

19. Разработка и применение металлофосфатных связующих для получения формовочных, стержневых и теплоизоляционных смесей и покрытий / [И. Е. Илларионов, И. А. Стрельников, В. А. Гартфельдер и др.]. // Теория и технология металлургического производства. – 2018. – №4(27). – С. 4–11.

20. Дорошенко С. П. Состояние, проблемы и перспективы применения ХТС / С. П. Дорошенко // Міжнародна конференція «Феррифосфатные ХТС и технология получения на их основе высококачественных отливок». –1987. – С. 6–8.

21. Корольков Д.В. Основы неорганической химии.– М.: Просвещение, 1982. – 270 с.

22. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание: В 4-х т. / Гурвич Л.В., Вейц И.В., Медведев В.А. и др. – М.: Наука, 1978 – 1986.

23. Сайт о химии [Электронный ресурс]: термодинамические свойства веществ. – Режим доступа: http://www. Xumuk.ru/tdsv_poisk/search.php.

24. Лютий Р. В. Формовочные и стержневые смеси с фосфатными связующими и комбинированным наполнителем, отверждаемые при нагреве / Р. В. Лютий, А. С. Кочешков, Д. В. Кеуш // Вестник ДГМА, 2011. – №1(22). – С.203…206.

25. Liutyi R. Structural Construction of Binders Based on Orthophosphoric Acid and Refractory Materials / R. Liutyi, D. Liuta, I. Petryk // Advances in Materials Science and Engineering. – Volume 2021, Article ID 6667769. – https://doi.org/10.1155/2021/6667769.

26. Кеуш Д.В. Закономерности образования связующих из ортофосфорной кислоты и огнеупорных наполнителей / Д.В. Кеуш // Процессы литья, 2015. – №4(112). – С. 40...46.

27. Лютый Р. В. Связующая система SiO_2 – H_3PO_4 для литейных стержней / Р. В. Лютый, Д. В. Кеуш // Литейное производство, 2017. – №4. – С.23…28.

28. Лидин Р. А. Химические свойства неорганических веществ: Учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., испр. / Р. А. Лидин. – Москва: Химия, 2000. – 480 с.

29. Лидин Р. А. Константы неорганических веществ: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. / Р. А. Лидин, Л. Л. Андреева, В. А. Молочко. – Москва: Дрофа, 2006. – 685 с.

30. Патент КНР CN104815943 (А). Новое модифицированное фосфатное неорганическое связующее для отливки из алюминиевого сплава и способ его получения, 2018 р.

31. Патент РФ №2148042. Способ получения фосфатного связующего / Ефимов К.М., Джуринский Б.Ф., Козлов Б.И.

32. Коган Б. С. Термодинамика основных сульфатов алюминия / Б. С. Коган, Л. А. Трифонова, Т. Г. Потапова // Успехи в органической и

неорганической химии. – 2016. – С. 232–247.

33. Химический энциклопедический словарь / Редкол.: Кнунянц И.Л. и др. – Москва: Советская энциклопедия, 1983. – 792 с.

34. Downs A. J. Chemistry of aluminium, gallium, indium, and thallium: First edition / A. J. Downs. – London: Chapman & Hall, 1993. – 526 p.

35. Рипан Р. Неорганическая химия. Химия металлов / Р. Рипан, И. Четяну. – Москва: Мир, 1972. – 872 с.

36. Lorent B. Thermogravimetrische und thermoanalytische Untersuchungen kondensierden Phosphate / B. Lorent, M. Szeplaki // Technische. – 1967. – №11. – С. 357–363.

37. Домбровский Н. М. Термографическое исследование динатрийфосфата / Н. М. Домбровский // Журнал научной химии. – 1960. – №8. – С. 1699–1710.

38. Рабинович В. А. Краткий химический справочник / В. А. Рабинович, З. Я. Хавин. – Ленинград: Химия, 1977. – 85 с.

Chapter 2.

1. Всемирная организация здравоохранения: Ситуация с COVID-19 в Европейском регионе ВОЗ. URL: https://who.maps.arcgis.com/ apps/opsdashboard/index.html #/a19d5d1f86ee4d99b013eed 5f637232d (дата звернення: 15.05.2020).

2. Кабінет Міністрів України: Аналітичні панелі (дашборди). URL: https://covid19.gov.ua/analitic hni-paneli-dashbordy (in Ukrainian) (дата звернення: 15.05.2020).

3. Варивончик Д.В. Оперативний моніторинг показників профілактики на робочому місці та реєстрації випадків гострого професійного захворювання, обумовленого COVID-19 (на основі опублікованих даних 08.05.2020). URL : https://www.facebook.com/DO M.NMAPO (in Ukrainian).

4. Яворовський О.П., Шкурба А.В., Скалецький Ю.М., Брухно Р.П., Зхарчук Л.В., Бугро В.І., Риган М.М Гігієна та охорона праці медичного персоналу в умовах подолання пандемії COVID-19 - Environment & Health - № 3.- 2020 – С.10-18.

5. Торгово-промислова палата Австралії (ACCI). 2020. "Посібник роботодавця з COVID-19: управління робочими місцями в умовах спалаху", 16 березня. Режим доступу: www.victorianchamber.com.au/-/media/files/vcci/covid-19/covid19-employer-guide-ed-2-160320.pdf?la=en&hash= DA27020684457854A6B2214E1E5996CD3F2536E3 (дата звернення: 31 березня 2020).

6. Австралія, Уряд Нового Південного Уельсу. 2020. "Визначення випадку COVID-19 (коронавірусної інфекції)". Режим доступу: www.health.nsw.gov.au/Infectious/diseases/Pages/2019-ncov-case-definition.aspx (дата звернення 31 березня 2020).

7. Бізнес Нової Зеландії. Без дати. "Здоров'я і безпека на робочому місці: коронавірус". Режим доступу: www.businessnz.org.nz /__data/assets/pdf_file/0008/189260/200320-health-and-safety-covid-19.pdf (дата

звернення 31 березня 2020).

8. CIPD. 2020. "Коронавірус (COVID-19): посібник роботодавця". Режим доступу: www.cipd.co.uk/knowledge/fundamentals/emp-law/health-safety/coronavirus-employer-response-guide (дата звернення 31 березня 2020).

9. Підприємництво Сінгапуру. 2020. "Посібник з планування безперервного бізнесу в умовах COVID-19", 7 лютого. Режим доступу: www.enterprisesg.gov.sg/-/media/esg/files/media-centre/media-releases/2020/feb-2020/guide-on-businesscontinuity-planning-for-covid-19_2nd-edition_170220_ final.pdf?la =en (31 березня 2020).

10. Міжнародна організація праці (МОП). 2020а. "COVID-19 і світ працюючих: вплив і нормативне реагування", 18 березня. Режим доступу: www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/dgreports/dcomm/documents/briefingnote/wcms _738753.pdf [31 березня 2020).

11. Відповідь системи соціального захисту на кризу Covid-19: Як реагують країни Азії та Тихоокеанського регіону, 25 березня. Режим доступу: www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/asia/robangkok/documents/briefingnote/wcms_739587.pdf (31 березня 2020).

12. Конфедерація підприємців і роботодавців Ірландії (IBEC). 2020. Настанови з питань кадрових ресурсів – планування безперервного бізнесу/Коронавірус (Covid-19), 5 березня. Режим доступу: www.ibec.ie/-/media/documents/employerhub/employment-law/contracts-and-conditions-of-employment/contracts/hr-guidance_business-continuity-planning-andcoronavirus-5th-march-2020.pdf (31 березня 2020).

13. Сінгапур, Міністерство трудових ресурсів. 2020. "Рекомендовані заходи з дотримання безпечної дистанції на робочому місці", 13 березня. Режим доступу: www.mom.gov.sg/covid-19/advisory-on-safe-distancing-measures (31 березня 2020).

14. Дитячий фонд ООН (UNICEF). 2020. "Рекомендації для роботодавців щодо організації гнучкого режиму праці та інших належних практик в контексті COVID-19". Режим доступу: www.unicef.org/mongolia/media/1476/file (31 березня 2020).

15. Комісія з питань рівних можливостей у сфері зайнятості США. 2020, "Що ви повинні знати про Закон про американцівінвалідів (ADA), Закон про реабілітацію та COVID-19", 19 березня. Режим доступу:www.eeoc.gov/eeoc/newsroom/wysk/wysk_ada_rehabilitaion_act_coronavirus.cfm (31 березня 2020).

16. Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ). 2020а. "Пандемія коронавірусної інфекції (COVID-19)". Режим доступу:www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019 (31 березня 2020).

17. "Підстави для впровадження карантину в контексті стримування коронавірусної інфекції (COVID-19)", Перехідні рекомендації, 29 лютого. Режим доступу: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/331299/WHO-2019-nCov-IHR_Quarantine-2020.1-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y (31 березня 2020).

18. ISO 45003:2020, Менеджмент в области охраны труда и техники безопасности. Психологическое здоровье и безопасность на рабочем месте. Руководящие указания по управлению психосоциальными рисками.

19. CWA 17553: 2020, Маски для лица от сообщества - Руководство по минимальным требованиям, методам тестирования и использования.

20. Инициатива W3C по обеспечению доступности Интернета (WAI). Рекомендации по обеспечению доступности веб-содержимого (WCAG). WAI [онлайн]. Режим доступа: https://www.w3.org/WAI/standards-guidelines/wcag/.

21. Всемирная Организация (ВОЗ), 24 февраля 2010 года: Болезней готовности к чрезвычайным ситуациям, реагирование. Режим доступа: https://www.who.int/csr/disease/swineflu/frequent_asked_questions/pandemic/en/.

22. Всемирная Организация (ВОЗ), 2020. Вопросы здравоохранения /коронавируса. Режим доступа: https://www.who.int/health-topics/coronavirus#tab=tab_1.

23. Международная организация труда (МОТ), предотвращение и смягчение COVID-19 в работе. Режим доступа: https:// www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/ed_protect/protrav/safework/documents/instructionalmaterial/wcms_741813.pdf.

24. Международная организация труда (МОТ), Управление связанных с работой психологических рисков при COVID-19 пандемии. Режим доступа: https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/ed_protect/protrav/safework/documents/instructionalmaterial/wcms_748638.pdf.

25. Постанова від 17 квітня 2019 р. № 337 Кабінетом міністрів України про Порядок розслідування та обліку нещасних випадків, професійних захворювань та аварій на виробництві (Із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 1 від 05.01.2021).

26. ISO/PAS 45005:2020 «Система менеджменту охорони здоров'я та безпеки праці. Загальні рекомендації щодо безпеки праці під час пандемії COVID-19».

Chapter 3.

1. Viňáš, J., & Ábel, M. (2015). Analysis of laser welds on automotive steel sheets. In Materials Science Forum (Vol. 818, pp. 239-242). Trans Tech Publications. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.818.239

2. Fesovets, O., Strelko, O., Berdnychenko, Y., Isaienko, S., & Pylypchuk, O. (2019). Container transportation by rail transport within the context of Ukraine’s European integration. In Proceedings of 23rd International Scientific Conference. Transport Means.–2019.–Part I (pp. 381-386).

3. Планковский, С. И., Островский, Е. К., & Цегельник, Е. В. (2008). Импрегнированный катод на основе скандата бария. Авиационно-космическая техника и технология, (2), 78-84.

4. Sahul, M., Tomčíková, E., Sahul, M., Pašák, M., Ludrovcová, B., & Hodúlová, E. (2020). Effect of disk laser beam offset on the microstructure and mechanical properties of copper—AISI 304 stainless steel dissimilar metals joints. Metals, 10(10), 1294. https://doi.org/10.3390/met10101294

5. Kyrychenko, H. I., Strelko, O. H., Berdnychenko, Y. A., Petrykovets, O. V., & Kyrychenko, O. A. (2016). Scenarios modeling of cargo movement in the supply chains. Transport systems and transportation technologies, 12, 32-37. https://doi.org/10.15802/tstt2016/85882

6. Bernatskyi, A. V., Berdnikova, O. M., Klochkov, I. M., Sydorets, V. M., & Chinakhov, D. A. E. (2019, September). Laser welding in different spatial positions of T-joints of austenitic steel. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 582, No. 1, p. 012048). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1757-899X/582/1/012048

7. Shelyagin, V., Bernatskyi, A., Siora, O., Nabok, T., Shamsutdinova, N., & Sokolovskyi, M. (2021, August). Historical Review of Technological CO 2 Lasers Development, Manufacturing and Operation Stages at EO Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. In 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) (pp. 589-593). IEEE. https://doi.org/10.1109/UKRCON53503.2021.9575940

8. Bernatskyi, A., & Khaskin, V. (2021). The history of the creation of lasers and analysis of the impact of their application in the material processing on the development of certain industries. History of Science and Technology, 11(1), 125-149. https://doi.org/10.32703/2415-7422-2021-11-1-125-149

9. Slezak, T., & Sniezek, L. (2016). Fatigue Life of Welded Joints of High-Strength Structural Steel S960QL. In Solid State Phenomena (Vol. 250, pp. 169-174). Trans Tech Publications Ltd. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.250.169

10. Knezović, N., & Topić, A. (2020). Influence of welding parameters on geometry and microstructure of laser-welded steels with increased carbon content. Annals of DAAAM & Proceedings, 7(1). 0418+. https://link.gale.com/apps/doc/A653725503/AONE?u=anon~dae3d584&sid=googleScholar&xid=f8b9eae1.

11. Topić, A., Bauer, B., Kožuh, Z., & Knezović, N. (2016). Gas composition influence on the microstructure and geometry of laser-welded joints in duplex stainless steel. Annals of DAAAM & Proceedings, 27. https://doi.org/10.2507/27th.daaam.proceedings.106.

Chapter 4.

1. Бурлаков В. И. Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Мат. международ. научно-техн. семинар, 20-24 февраля 2017. Г.Свалява, Карпаты. – К.: АТМ Украины, 2017 . – С. 63-66.

2. Бабичев А. П. Интенсификация вибрационной обработки / А. П. Бабичев, В. Г. Санамян, Н. Н. Горбунов, Р. В. Волков // Вопросы вибрационной технологии: Межвуз. сб. науч. ст. - Ростов н/Д : ДГТУ. 1999 . - С. 44-47.

3. Бабичев А. П. Вибрационная обработка в условиях ремонтных производств. / А. П. Бабичев, В. Г. Санамян, Х. Халед // Высокие технологии в машиностроении: современные тенденции развития: Материалы IX междунар. научн.-техн. семинара. – Алушта; Харьков, 1999 . - С. 20-21.

4. Рогов В. А., Шкарупа М. И. Сравнительный анализ механической

обработки сверхтвёрдых материалов шлифованием. // Технология машиностроения. М., 2009. № 5. — С. 12–16.

5. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова; НАН Украины. Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля. – Т. 5: Обработка материалов лезвийным инструментом / Под ред. С. А. Клименко. – К., 2006. – 316 с.

6. Бурлаков В. И. Улучшение качества поверхности деталей после виброцентробежной обработки для защиты их от поломок / В. И. Бурлаков // Защита металлургических машин от поломок: Сб. научн. тр. Вып. 4.- Мариуполь,2000. -С. 90-93.

7. Zhao X. F., Langford R. M., Shapiro I. P., Xiao P. Onset plastic deformation and cracking behavior of silicon carbide under contact load at room temperature // J. Am. Ceram. Soc. – 2011. – 94. – P. 3509–3514.

8. Работоспособность режущего инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ с вакуумно-плазменным покрытием / М. Ю. Копейкина, С. А. Клименко, Ю. А. Мельнийчук, В. М. Береснев // Сверхтвердые материалы. – 2008. – № 5. – С. 87–97.

9. Sugihara, T. Development of Novel CBN Cutting Tool for High Speed Machining of Inconel 718 Focusing on Coolant Behaviors / Sugihara, T., Tanaka, H., Enomoto, T. // Procedia Manufacturing. – 2017. – №10. – P. 436–442.

10. Chou Y. K. Experimental investigation on CBN turning of hardned AISI 52100 steel / Y. Chou, C. J. Evans, M. M. Barash // J. Mater. Process. Technol. – 2002. – № 124. – P. 274 – 283.

11. Петруша І.А. Термобаричне спікання і працездатність різального композиту cBN-TiC групи BL при точінні загартованої сталі Caldie / І.А. Петруша, В.М. Бушля, О.С. Осіпов та ін. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля, НАН Украины, 2015. – 548 с. – Вып. 18 – С. 338–345.

Chapter 5.

1. А.С. 348309 СССР. МКИ Е23F 21/16. Червячная фреза.

2. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. — Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. — 184 с.: ил.

3. https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/pages/default.aspx?country=ru

4. https://www.kennametal.com/ru/ru/home.html

5. https://www.iscar.com.ua/Products.aspx/countryid/46/ProductId/67

6. http://www.korloy.com/ru/main/main.do

7. https://www.walter-tools.com/ru-ru/tools/standard_products/holemaking/overview/reaming/Pages/default.aspx

8. https://www.widia.com/ru/ru/products/holemaking/reaming-tools.html

9. Кудинов В.А. Динамика станков. – М. : Машиностроение, 1967. - 359 с. - Для инженерно-технических работников машиностроительных заводов и научно-исследовательских институтов.

10. Кудинов В.А., Чуприна В.М. Поузловой анализ динамических

характеристик упругой системы станка // Станки и инструмент. - 1989.- №11. - С.8-11.

11. Крепак, А. С. Анализ результатов исследований при работе инструментами пониженной виброактивности / А. С. Крепак, С. А. Крепак // Университетская наука - 2007 : в 2 т. : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (Мариуполь, 2007 г.) / ГВУЗ «ПГТУ». – Мариуполь, 2007. – Т. 2. – С. 28-29.

Chapter 6.

1.Быков А.И.,Ванеев Б.Н.,Главный В.Д. Надежность взрывозащищенного и рудничного електрооборудования. - М.: Недра, 1979. - 302 с.

2.Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надежность электрических машин. - Л.: Энергия, 1976.-218 с.

3.Меламедов И.М. Физические основы надежности. - М.: Энергия, 1970. - 152 с.

4.Гук Ю.Б., Лосев Э.А., Мясников А.В. Оценка надежности електроустановок. - М.:Энергия, 1974. - 200 с.

Chapter 7.

1. Intelligent electrical networks: elements and modes. For the general ed. acad. NAS of Ukraine Kirilenko O. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2016. - 400 p.

2. The Advanced Microgrid Integration and Interoperability Sandia National Laboratories.Март 2016

3. Levent Yavuz, Ahmet Önen, S.M. Muyeen, Innocent Kamwa. Transformation of microgrid to virtual power plant – a comprehensive review // IET Gener. Transm. Distrib., 2019, Vol. 13 Iss. 11, pp. 1994-2005.

4. Ramsay C. The Virtual Power Plant: Enabling Integration of distributed generation and demand. – FENIX Bulletin 2, Jan 2008; FENIX PROJECT (fenix-project.org)

5. A Two Stage Increase-decrease Algorithm to Optimize Distributed Generation in a Virtual Power Plant. 2016. – http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216314059?via%3Dihub

6. https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:c981f877826aa27be7991a852109095a255b0d90/peg-part01-ru.pdf

7. Denysiuk S., Strzelecki R. Formation of components of an intelligent platform for managing energy systems and networks // Energy: economics, technology, ecology. – 2019. – № 3. – pp. 7–22.

8. Z. Hu, J. Kim, J. Wang, and J. Byrne, "Review of dynamic pricing programs in the US and Europe : Status quo and policy recommendations," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 42, pp. 743–751, 2015.

9. Chopra C., Meindl P. Supply Chain Management, Third. New Jersey: Prentice Hall, 2007.

10. Kelly-Detwiler, P. Solar and Storage Offerings Have Long-Term Implications for Electricity Markets. Natural Gas & Electricity. https://doi.org/10.1002/gas.21839

11. Zhuikov V.Ya., Boyko I.Yu. Dynamic electro-cost model of energy generating system // Electronics and communication: scientific and technical journal. – 2016. – V. 21, № 6(95). – P. 27–33.

12. Zhuikov V., Boiko I., Denysiuk S. Model of dynamic tariffing Microgrid's electricity consumption in local energy markets // Science and Education a New Dimension. IX (31), Issue 250. Hungary, 2021. P. 46-49.

13. Zhuikov V.Ya., Denysiuk S.P. Energy processes in electrical circuits with key elements. – Kyiv: TEXT Publishing House, 2010. – 264 p.

14. Denysiuk S.P., Kolomiychuk M.O. A.S. № 1007859 Ukraine. "Algorithm for assessing the financial and technical performance of Microgrid in dynamic modes" Certificate of registration of copyright to the work № 1007859, date of registration… .2021.

15. Kalyuzhny D.M., Karyuk A.O., Shcherbak I.E. Synopsis of lectures on the course "Electricity and power saving". – Kharkiv: KhNUMG them. O.M. Beketov, 2016. – 124 c.

16. Kalenchuk-Porkhanova A.A. Apparatus for approximation for analysis and synthesis of complex systems // Pr. International. conf. "50 years of the Institute of Cybernetics. V.M. Glushkova National Academy of Sciences of Ukraine ". – Kyiv, 2008. – P. 354–361.

17. Denisyuk S.P., Opryshko V.P. Research of programs on management of demand for the electric power and the analysis of efficiency of their use // Technology Audit & Production Reserves. – 2016. – V. 3 (29) – P. 69–73.

18. https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/uk/Documents/energy-resources/deloitte-uk-energy-as-a-service-report-2019.pdf

Chapter 8.

1. *Браницкий А. А.* Обнаружение аномальных сетевых соединений на основе гибридизации методов вычислительного интеллекта: автореф. дис. канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2018. 18 с.

2. *Биковська Д.Г., Пахомова В.М.* Виявлення мережевих атак на створеному програмному комплексі з використанням методів штучного інтелекту // Тези XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті» 15-16 грудня 2020 р. Дніпро: ДНУЗТ, 2020. С. 144.

3. *Биковська Д.Г.* Визначення мережевих атак з використанням методів штучного інтелекту : дипломна робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра : спец. 125 - кібербезпека / наук. керівник В.М. Пахомова; Дніпров. нац. ун-т залізн. транс. ім. акад. В.А. Лазаряна. Дніпро, 2020. 81 с.

4. *Видиш А.Д., наук. керівник Пахомова В.М.* Визначення категорії мережевих атак на комп'ютерну мережу з використанням нейронечіткої мережі // Інформаційно-телекомунікаційні технології та комп'ютерне моделювання. Збірник тез доповідей 81 Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених, магістрантів та студентів «Наука і сталий розвиток транспорту» 28 жовтня 2021 р. Дніпро: ДНУЗТ, С. 23-24.

5. *Жульков Е.В.* Построение модульных нейронных сетей для обнаружения

классов сетевых атак: автореф. дис. канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2007.16 с.

6. *Котов В.Д., Васильев В.И.* Система обнаружения сетевых вторжений на основе механизмов иммунной модели. Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2011. С. 180-189. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-obnaruzheniya-setevyh-vtorzheniy-na-osnove-mehanizmov-immunnoy-modeli/viewer

7. *Павленко І.І., наук. керівник Пахомова В.М.* Створення самоорганізуючої карти для визначення класів мережевих атак категорії PROBE // Інформаційно-телекомунікаційні технології та комп'ютерне моделювання. Збірник тез доповідей 81 Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених, магістрантів та студентів «Наука і сталий розвиток транспорту» 28 жовтня 2021 р. Дніпро: ДНУЗТ, С. 24-25.

8. *Пахомова В.М., Видиш А.Д.* Дослідження можливостей багатошарової нейронної мережі щодо визначення категорії мережевих атак // Матеріали 81 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» 22-23 квітня 2021 р. М-во освіти і науки України. Дніпров. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна [та ін.]. Дніпро, 2021. С. 357-358.

9. *Пахомова В. М., Коннов М. С.* Дослідження двох підходів до виявлення мережевих атак з використанням нейромережної технології. Наука та прогрес транспорту. 2020. № 3(87). С. 81-93. URL:https://doi.org/10.15802/stp2020/208233

10. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 106532 від 21.07.2021: Методика виявлення загроз на комп'ютерну мережу засобами багатошарової нейронної мережі. Автори: *Жуковицький І.В., Пахомова В.М.* Україна: Український інститут інтелектуальної власності.

11. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 106964 від 04.08.2021: Методика аналізу різних підходів щодо виявлення мережевих атак з використанням нейромережної технології. Автори: *Пахомова В.М., Коннов М.С.* Україна: Український інститут інтелектуальної власності.

12. *Фролов П.В., Чухраев И.В., Гришанов К.М.* Применение искусственных нейронных сетей в системах обнаружения вторжений. Системный администратор. 2018. № 9 (190). URL: http://samag.ru/archive/article/3724

13. *Фролов П.В., Вершинин Е.В., Медведева С.А.* Исследование методов обнаружения сетевых атак. Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 11. С. 55-59.

14. *Amini M., Rezaeenour J., Hadavandi E.* A Neural Network Ensemble Classifier for Effective Intrusion Detection using Fuzzy Clustering and Radial Basis Function Networks. International Journal on Artificial Intelligence Tools. 2016. Vol. 25. Iss. 02. pp. 1-32. DOI: https://doi.org/10.1142/s0218213015500335

15. CIC DATASET FORM for «NSL-KDD». URL: http://205.174.165.80/ CICDataset/NSL-KDD/ Dataset/

16. *De Castro, L. N., Von Zuben, F. I.* Artificial Immune Systems: Part 1 – Basic Theory and Applications. Technical Report – RT DCA 01/99, FEEC/UNICAMP, 1999, Brazil, 95 p.

17. *Dubey R., Rathore D., et al.* An empirical study of intrusion detection

system using feature reduction based on evolutionary algorithms and swarm intelligence methods. International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12. No. 19. P. 8884-8889.

18. *Grill M., Pevny T., Rehak M.* Reducing false positives of network anomaly detection by local adaptive multivariate smoothing. Journal of Computer and System Sciences. 2017. 83 (1). pp. 43-57. URL: https://doi.org/10.1016/j.jcss.2016.03.007

19. Internet Security Threat Report. URL: https://www.symantec.com/content/dam/symantec/docs/reports/istr-242019-en.pdf

20. KDD Cup 1999 Data. URL: http://kdd.ics.uci.edu/databases/kddcup99/kddcup99.html

21. NSL-KDD dataset. URL: https://www.unb.ca/cic/datasets/nsl.html

22. *Ring M., Wunderlich S., Scheuring D., Landes D., Hotho A.* A Survey of Network-based Intrusion Detection Data Sets. Компьютер и безопасность. 2019. DOI: 10.1016 / j.cose.2019.06.005

23. *Saied A., Overill R. E., Radzik T.* Detection of known and unknown DDoS attacks using Artificial Neural Networks. Neurocomputing. 2016. Vol. 172. pp. 385-393. DOI: https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.04.101

24. *Zhukovyts'kyy I.V., Pakhomova V.M.* Identifying threats in computer network based on multilayer neural network. Наука та прогрес транспорту. 2018. № 2 (74). С. 114-123. URL: https://doi.org/10.15802/stp2018/130797

25. *Zhukovyts'kyy I.V., Pakhomova V.M., Ostapets D.O., Tsyhanok O.I.* Detection of attacks on a computer network based on the use of neural network complex // Наука та прогрес транспорту. 2020. № 5(89). С. 68-79. DOI: 10.15802/stp2020/218318

Chapter 9.

1. Trends and developments in electric vehicle markets – Global EV Outlook 2021 – Analysis – IEA. Available online at https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021/trends-and-developments-in-electric-vehicle-markets.

2. Nuca, I., Todos, P., & Eşanu, V. Urban electric vehicles traction: Achievements and trends. In 2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, 2012, pp. 76-81. IEEE. doi:10.1109/icepe.2012.6463948.

3. Bitar, Z., & Al Jabi, S. Studying the performances of induction motor used in electric car. Energy Procedia, 2014, 50, 342-351. Available online at https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214007772.

4. Wang, B., Liu, Y., Vakil, G., Yang, T., & Zhang, Z. Feasibility of Permanent Magnet Fault Tolerant Machines for Aircraft Starter/Generator Systems. In 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2020, Vol. 1, pp. 2104-2110. IEEE. doi:10.1109/icem49940.2020.9270965.

5. Jape, S. R., & Thosar, A. Comparison of electric motors for electric vehicle application. international Journal of Research in Engineering and Technology, 2017 6(09), 12-17. Available online at https://ijret.org/volumes/2017v06/i09/IJRET20170609004.pdf.

6. Vijayakumar, K., Karthikeyan, R., Paramasivam, S., Arumugam, R., &

Srinivas, K. N. Switched Reluctance Motor Modeling, Design, Simulation, and Analysis: A Comprehensive Review. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(12), pp. 4605–4617. doi:10.1109/tmag.2008.2003334.

7. Tang, Y. U.S. Patent No. 8,761,985. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2014. Available online at https://patents.google.com/patent/US20130241445A1/en.

8. Shibamoto, T., Nakamura, K., Goto, H., & Ichinokura, O. A design of axial-gap switched reluctance motor for in-wheel direct-drive EV. In 2012 XXth International Conference on Electrical Machines, 2012, pp. 1160-1165.

9. Hu, Y., Gan, C., Cao, W., & Finney, S. Fault Diagnosis of Switched Reluctance Motors in Electrified Vehicle Applications. In New Applications of Electric Drives. IntechOpen, 2015. Available online at https://www.intechopen.com/books/new-applications-of-electric-drives/fault-diagnosis-of-switched-reluctance-motors-in-electrified-vehicle-applications.

10. Lukianov, M.O., Verbytskyi, Ye.V. Design and control features of switched-reluctance motor with minimization torque pulsation. Microsystems, Electronics and Acoustics, № 25(1), pp. 20-26 (Ukr). doi: 10.20535/2523-4455.mea.198991.

11. Neiman, L.A. & Neiman, V.Yu. (). Application of the conductivity method to account for the force of one-sided magnet-ic attraction of an asymmetric electromagnet. Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2015, №2(97), pp. 214-218 (Rus).

12. Ding, W., Liu, G., & Li, P. A Hybrid Control Strategy of Hybrid-Excitation Switched Reluctance Motor for Torque Ripple Reduction and Constant Power Extension. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 1–1. doi:10.1109/tie.2019.2891467.

13. Kabir, M. A., & Husain, I. Segmented rotor design of concentrated wound switched reluctance motor (SRM) for torque ripple minimization. 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2016. doi:10.1109/ecce.2016.7855420.

14. Lee, D.-H., Pham, T. H., & Ahn, J.-W. Design and Operation Characteristics of Four-Two Pole High-Speed SRM for Torque Ripple Reduction. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(9), 3637–3643. doi:10.1109/tie.2012.2208432.

15. Liaw, C.-M., Hu, K.-W., Wang, J.-C., & Ho, C. Y. Development and Operation Control of a Switched-Reluctance Motor Driven Flywheel. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 1–1. doi:10.1109/tpel.2018.2814790.

16. Deng, X., & Mecrow, B. Design and comparative evaluation of converter topologies for six-phase switched reluctance motor drives. The Journal of Engineering, 2019 (17), pp. 4017–4021. doi:10.1049/joe.2018.8031.

17. Hu, Y., Wang, T., & Ding, W. Performance evaluation on a novel power converter with minimum number of switches for a six-phase switched reluctance motor. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 1–1. doi:10.1109/tie.2018.2840480.

18. Ellabban, O., & Abu-Rub, H. Switched reluctance motor converter topologies: A review. 2014 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), pp. 840-846. doi:10.1109/icit.2014.6895009.

19. Deng, X., Mecrow, B., Gadoue, S., & Martin, R. A torque ripple minimization method for six-phase switched reluctance motor drives. 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2016. doi:10.1109/icelmach.2016.7732641.

20. Xue, X. D., Cheng, K. W. E., & Ho, S. L. Optimization and Evaluation of Torque-Sharing Functions for Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(9), 2076–2090. doi:10.1109/tpel.2009.2019581.

21. Liu, H., Loh, P. C., Wang, X., Yang, Y., Wang, W., & Xu, D. Droop Control With Improved Disturbance Adaption for a PV System With Two Power Conversion Stages. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10), pp. 6073–6085. doi:10.1109/tie.2016.2580525.

22. Denisov, Y., Gorodny, A., Gordienko, V., Yershov, R., Stepenko, S., Kostyrieva, O., & Prokhorova, A. Switch operation power losses of quasi-resonant pulse converter with parallel resonant circuit. 2016 IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2016. doi:10.1109/elnano.2016.7493078.

23. Ievgen Verbytskyi, Oleksandr Bondarenko, Dmitri Vinnikov. Multicell-type current regulator based on Cuk converter for resistance welding. 2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, 2017, Pp. 1 – 6. doi:10.1109/RTUCON.2017.8124844.

24. Galkin, I.; Blinov, A.; Verbytskyi, I.; Zinchenko, D. Modular Self-Balancing Battery Charger Concept for Cost-Effective Power-Assist Wheelchairs. Energies 2019, 12, 1526. doi: 10.3390/en12081526.

SCIENTIFIC EDITION

MONOGRAPH

PROSPEKTIVE GLOBALE WISSENSCHAFTLICHE TRENDS

INNOVATIVE TECHNIK, TRANSPORT, SICHERHEIT

PROSPECTIVE GLOBAL SCIENTIFIC TRENDS

INNOVATIVE TECHNOLOGY, TRANSPORT, SECURITY

MONOGRAPHIC SERIES «EUROPEAN SCIENCE»

BOOK 7. PART 8

Authors:
Bernatskyi A.V. (3), Bondarenko I.V. (9), Burlakov V.I. (4), Burlakova G.Y. (4), Denysiuk S. (7), Fedoriv M. (6), Galushchak I. (6), Garmash S.N. (2), Kolomiichuk M. (7), Kudinova E. (5), Kurliak P. (6), Liuta D. (1), Liutyi R. (1), Lukashenko V.A. (3), Manoilov O. (5), Pakhomova V.N. (8), Shamsutdinova N.O. (3), Siora O.V. (3), Sokolovskyi M.V. (3), Tyshkovets M. (1), Verbytskyi I.V. (9)

The scientific achievements of the authors of the monograph were also reviewed and recommended for publication at the international scientific symposium
«Prospektive globale wissenschaftliche Trends '2021 / Prospective global scientific trends' 2021»
(November 30, 2021)

The monograph is included in
International scientometric databases

500 copies
December, 2021

Published:
ScientificWorld -NetAkhatAV
Lußstr 13,
Karlsruhe, Germany
in conjunction with Institute «SE&E»
Monograph published in the author's edition

e-mail: orgcom@sworld.education
www.sworld.education

ISBN 978-3-949059-44-5

NEXTAGE